

GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM
in der Helmholtz-Gemeinschaft

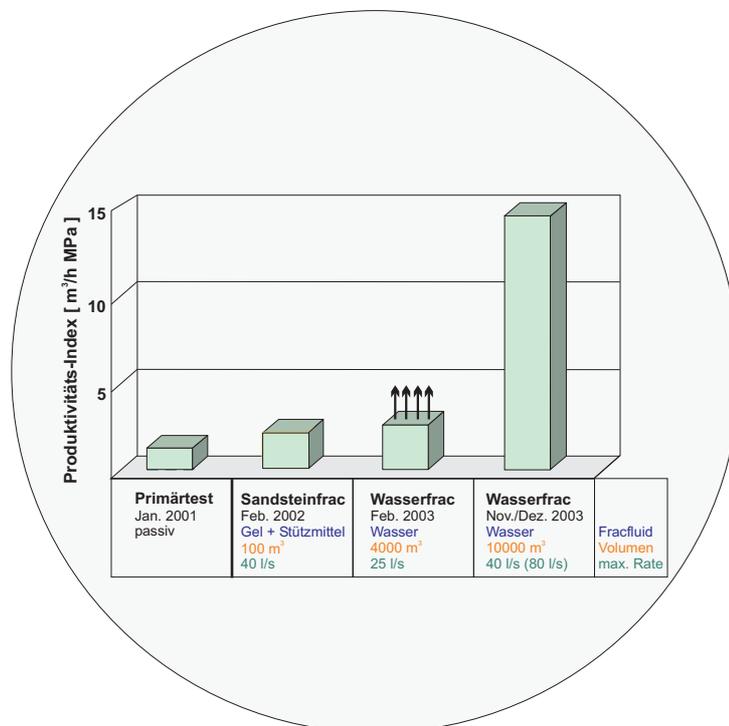
Ernst Huenges
Helmuth Winter
(Herausgeber)

**Experimente zur
Produktivitätssteigerung
in der Geothermie-Forschungsbohrung
Groß Schönebeck 3/90**

Scientific Technical Report STR04/16

Geothermie Report 04-2

Experimente zur Produktivitätssteigerung in der Geothermie-Forschungsbohrung Groß Schönebeck 3/90



Ernst Huenges, Helmuth Winter
(Herausgeber)

Scientific Technical Report STR04/16

Vorwort

Der vorliegende Report fasst die wissenschaftlichen und technischen Arbeiten zur Steigerung der Produktivität von Thermalwasser in der Geothermie-Forschungsbohrung Groß Schönebeck 3/90 zusammen, die von 2002 bis 2004 durchgeführt wurden.

Das Ziel des Projektes ist die Erschließung von heißen Wässern in tiefen Speichergesteinen, die sich zur Erzeugung von elektrischem Strom eignen. Dies erfordert die Bereitstellung einer kontinuierlichen Förderung heißer Tiefenwässer mit Temperaturen $> 150\text{ °C}$ und Fließraten $> 50\text{ m}^3/\text{h}$. In Tiefen mit Mindesttemperaturen um 150 °C ist die natürliche Permeabilität (Durchlässigkeit) der Gesteine jedoch nicht ausreichend. Die Gesteine müssen stimuliert werden, d. h. zu vorhandenen Rissen werden zusätzliche künstlich erzeugt, damit das Wasser ungehindert zirkulieren kann. Bereits vorliegende Erkenntnisse zur Erschließung und Charakterisierung der in weiten Regionen des Norddeutschen Sedimentbeckens in Tiefen von etwa 4000 bis 5000 Metern verbreiteten Speichertypen basieren größtenteils auf Erfahrungen der Erdöl- und Erdgasindustrie. Für die geothermische Nutzung sind diese jedoch nur eingeschränkt anwendbar, da bei der Erschließung von Kohlenwasserstoffen schon kleine Fließraten genügen. Daher liegt der Schlüssel zum Durchbruch der Geothermie in der Entwicklung effektiver Stimulationstechniken zur gezielten Produktivitätssteigerung geothermischer Reservoirs.

Die Geothermiebohrung Groß Schönebeck schließt geothermisch relevante Horizonte des Norddeutschen Beckens zwischen 3900 m und 4300 m in einem Temperaturniveau von etwa 150 °C auf. Diese Bohrung bietet derzeit die einzigartige Möglichkeit, die geothermische Nutzbarkeit unterschiedlicher Gesteinsformationen des Rotliegenden vertiefend zu untersuchen: die Vulkanite an der Basis und den darüber liegenden Sandstein. Experimente zur Erhöhung der Zuflussrate von heißen Wässern aus Sandsteinformationen durch hydraulische Stimulation konnten bereits erfolgreich durchgeführt werden (siehe Berichte zu den Projekten BEO 0327063 und ZIP 0327063C). Die erzielten Fließraten reichten jedoch für eine wirtschaftliche Elektrizitätserzeugung noch nicht aus. Daher wurden die Sandsteinformationen gemeinsam mit darunter liegenden Vulkaniten durch neu konzipierte Stimulationsverfahren erschlossen. Die angewendeten Methoden gleichen den vorhergehenden Projekten, indem durch hydraulisches Pumpen zusätzliche Risse im Gestein geschaffen werden. Bei entsprechender Produktionssteigerung von heißen Wässern aus dem Untergrund ist als anschließender Schritt eine zweite Bohrung geplant, mit der ein Förder- und Versenkkreislauf hergestellt werden kann. Ein geothermisches Kraftwerk vervollständigt die Installation.

Da im Sedimentbecken von den Niederlanden über Norddeutschland bis nach Polen ähnliche geologische Verhältnisse vorliegen, haben die Ergebnisse aus der Bohrung Groß Schönebeck Pioniercharakter. Der Lern- und Anwendungseffekt aus den Experimenten kann unter diesem Aspekt als besonders beachtenswert eingestuft werden.

In diesem Report werden auch Ergebnisse aus vorliegenden Abschlußberichten der Kooperationspartner auszugsweise wiedergegeben. Den jeweiligen Autoren sei hiermit herzlich gedankt.

Mit regionalgeologischen Studien wurden Internstruktur und räumliche Ausdehnung des Reservoirs erfasst. Geophysikalische Untersuchungen begleiteten die hydraulischen Experimente um die Prozesse der Fluidausbreitung im Reservoir im Untergrund zu verfolgen. Zusätzliche Studien zur energetischen Umsetzung und verfahrenstechnischen Komplettierung ergänzen die bohrungsbezogenen Arbeiten und tragen wesentlich zum Gelingen des Projektziels bei.

Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des *Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit* im Rahmen des Zukunftsinvestitionsprogrammes der Bundesregierung unter dem Förderkennzeichen ZIP 0327508 gefördert. Dafür bedanken sich die Herausgeber auch im Namen der Autoren.

Dank gilt auch dem Vorstand des GeoForschungsZentrum Potsdam für die Unterstützung des Projektes. Ebenso sei an dieser Stelle den Firmen und Behörden gedankt, die an der erfolgreichen Durchführung der Stimulationsexperimente in Groß Schönebeck mitgewirkt haben, besonders unseren langjährigen Projektpartnern BGR Hannover, GTN Neubrandenburg, MeSy Bochum und BWG Neubrandenburg.

Dr. Ernst Huenges

Dr. Helmuth Winter

Kooperationspartner im Zeitraum von 2002 bis 2004

- BWG Boden-Wasser-Gesundheit GbR (Neubrandenburg)
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hannover)
- GTN Geothermie Neubrandenburg GmbH (Neubrandenburg)
- Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (Hannover)
- Messsysteme GmbH (Bochum)
- Universität Leipzig

Mitarbeiter der Geothermieprojektgruppe im Berichtszeitraum

Jan Henniges, Dr. Heinz-Gerd Holl, Dr. Suzanne Hurter, Silke Köhler, Dr. Björn Legarth, Mathias Poser, Dr. Ali Saadat, Angela Spalek, Ute Trautwein, Jörg Schrötter, Dr. Helmuth Winter, Dr. Markus Wolfgramm, Falko Zetsche, Dr. Günter Zimmermann

In diesem Report sind Beiträge enthalten von

Jörn Bartels (Fa. GTN Geothermie Neubrandenburg, Neubrandenburg),
Wulf Brandt (Aetna Energiesysteme GmbH, Wildau)
Anne Cyganiak (Freie Universität Berlin),
Erik Danckwardt (Universität Leipzig),
Franz Jacobs (Universität Leipzig),
Frank Kabus (Fa. GTN Geothermie Neubrandenburg, Neubrandenburg),
Torsten Kellner (Fa. GTN Geothermie Neubrandenburg, Neubrandenburg),
Rudolf Kniess (Universität Leipzig),
Birgit Rohstock (Fa. GTN Geothermie Neubrandenburg, Neubrandenburg),
Fritz Rummel (Fa. MeSy Messsysteme, Bochum),
Andrea Seibt (Fa. Boden Wasser Gesundheit GbR, Neubrandenburg),
Peter Seibt (Fa. GTN Geothermie Neubrandenburg, Neubrandenburg),
Torsten Tischner (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover),
Markus Wolfgramm (Fa. GTN Geothermie Neubrandenburg, Neubrandenburg),

sowie von

Kemal Erbas (Wiss. Vorstandsstab GFZ Potsdam),

den Mitarbeitern der GFZ Sektionen

2.2 Geophysikalische Tiefensondierung

Albrecht Schulze, Michael Weber, Falko Zetsche,

2.3 Erdmagnetfeld

Paul Bedrosian, Oliver Ritter, Ute Weckmann,

5.2 Geothermie

Jan Henniges, Heinz-Gerd Holl, Silke Köhler, Björn Legarth, Ali Saadat, Jörg Schrötter, Angela Spalek, Martina Pischner, Andreas Reinicke, Ute Trautwein, Thomas Voss und Günter Zimmermann.

Die Beiträge der Autoren werden in Auszügen wiedergegeben und sind teilweise den Projektabschlussberichten entnommen, die dem GFZ Potsdam vorliegen.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhalt

1	Einführung	10
1.1	Standortrecherche Deutschland <i>mit Beiträgen von M. Wolfgramm</i>	10
1.2	Ausgangssituation Groß Schönebeck	13
2	Reservoircharakterisierung.....	14
2.1	Reservoirgeologie <i>mit Beiträgen von H.-G. Holl</i>	14
2.2	Laboruntersuchungen unter simulierten in situ Bedingungen <i>mit Beiträgen von U. Trautwein</i>	15
2.3	Durchströmungsversuche an Reservoirgesteinen <i>mit Beiträgen von M. Wolfgramm und A. Seibt</i>	18
2.4	Modellierung hydraulisch-chemischer Prozesse während der Stimulation <i>mit Beiträgen von J. Bartels</i>	20
3	Langzeit-Pumptest nach Sandsteinfrac von August bis September 2002 .	22
3.1	Hydraulische Ergebnisse des Produktionstests <i>mit Beiträgen von A. Reinicke und G. Zimmermann</i>	22
3.2	Zusammensetzung des Reservoir-Fluids <i>mit Beiträgen von A. Seibt</i>	25
3.3	Geochemische Modellierungen <i>mit Beiträgen von T. Kellner, A. Seibt und M. Wolfgramm</i>	28
3.4	Mineralausfällungen während des Produktionstests („scaling“) <i>mit Beiträgen von H.-G. Holl und M. Wolfgramm</i>	29
3.5	Bewertung der Eignung von Wässern für die geothermische Nutzung <i>mit Beiträgen von T. Kellner, A. Seibt und M. Wolfgramm</i>	31
3.6	Gesteins-Fluid-Wechselwirkungen <i>mit Beiträgen von T. Kellner, A. Seibt und M. Wolfgramm</i>	32
3.7	Konditionierung des Fracfluids <i>mit Beiträgen von T. Kellner, A. Seibt und M. Wolfgramm</i>	33
4	Stimulationsexperimente und operative Arbeiten.....	35
4.1	1. Wasserfrac im offenen Bohrloch von 3883 bis 4294 m <i>mit Beiträgen von B. Legarth, T. Tischner, A. Reinicke, G. Zimmermann und F. Rummel</i>	35
4.2	Bohrlochstabilität	40
4.3	Operativer Ablauf der Sicherungsarbeiten <i>mit Beiträgen von B. Legarth, A. Saadat, P. Seibt und W. Brandt</i>	40

4.4	2. Wasserfrac im gesicherten Bohrloch <i>mit Beiträgen von B. Legarth und G. Zimmermann</i>	43
4.5	Modellierung der Rissbildung während der Stimulation (Hauptphase) <i>mit Beiträgen von B. Legarth</i>	50
4.6	Technische Schwierigkeiten.....	54
5	Produktionstest nach dem 2. massiven Wasserfrac	55
5.1	Durchführung der Produktionstests <i>mit Beiträgen von G. Zimmermann</i>	55
5.2	Injektivitäts- und Produktivitätsentwicklung <i>mit Beiträgen von B. Legarth und G. Zimmermann</i>	58
5.3	Veränderungen der Fluidchemie während der hydraulischen Experimente <i>mit Beiträgen von A. Seibt</i>	60
5.4	Lernpunkte und weiterer Forschungsbedarf	61
6	Geophysikalische Untersuchungen	62
6.1	Seismische Messungen während der Stimulation <i>mit Beiträgen von A. Schulze, M. Weber und F. Zetsche</i>	62
6.2	Magnetotellurische Messungen <i>mit Beiträgen von P. Bedrosian, A. Cyganiak, O. Ritter und U. Weckmann</i>	64
6.3	Geoelektrische Oberflächen-Bohrloch Messungen <i>mit Beiträgen von E. Danckwardt, F. Jacobs und R. Kniess</i>	69
6.4	Lernpunkte zu geophysikalischen Messungen und Forschungsbedarf.....	73
7	Bohrlochmessungen	76
7.1	Übersicht der durchgeführten Messungen <i>mit Beiträgen von M. Pischner und T. Voss</i>	76
7.2	Verrohrungsinspektion <i>mit Beiträgen von B. Legarth</i>	77
7.3	Kalibermessungen vor und nach der Stimulation (open hole) <i>mit Beiträgen von H.-G. Holl</i>	78
7.4	Lithologische Differenzierung <i>mit Beiträgen von H.-G. Holl</i>	81
7.5	Strukturabbildende Verfahren <i>mit Beiträgen von H.-G. Holl und M. Pischner</i>	85
7.6	DTS Messungen <i>mit Beiträgen von K. Erbas und J. Henninges</i>	87
7.7	Lernpunkte Bohrlochmessungen und Forschungsbedarf.....	90

8	Energieverfahrenstechnik	93
8.1	Materialauswahl für Geothermieranlagen <i>mit Beiträgen von F. Kabus und B. Rohstock</i>	93
8.2	Geothermische Stromerzeugungsanlagen <i>mit Beiträgen von S. Köhler</i>	99
9	Zusammenfassung.....	105
10	Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse.....	108
11	Literaturverzeichnis	110
	Anhang - Übersicht	115
	Anhang A 1 Komplettierung der Bohrung Groß Schönebeck 3/90	116
	Anhang A 2 Bohrlochmessungen in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90...	117
	Anhang A 3 Magnetotellurische Messungen	119
	Anhang A 4 Gleichstromgeoelektrische Messungen	133
	Anhang A 5 Glossar	138

1 Einführung

Die Forschungsbohrung Groß Schönebeck 3/90 mit dem In situ Geothermielabor ermöglicht die Durchführung geologischer und geophysikalischer Messungen und hydraulischer Experimente. Die am Standort herrschenden Temperaturverhältnisse und die vorhandenen Tiefenwässer bieten ideale Voraussetzungen für Experimente unter realen Bedingungen.

Die Bohrung im Nordosten Brandenburgs wurde auf der Basis einer umfangreichen geologischen und bohrtechnischen Analyse ausgewählt. Die Bohrung erschließt geothermisch interessante Horizonte des Norddeutschen Beckens in Tiefen zwischen 3900 und 4300 Metern bei einem Temperaturniveau von $> 150\text{ °C}$. Sie wurde bereits 1990 zur Exploration von Kohlenwasserstoffen bis in eine Tiefe von 4240 Metern abgeteuft. Da kein Gas, sondern nur große Mengen heißes Wasser gefördert wurden, wurde die Bohrung mit Zement verfüllt und aufgelassen. Im Jahr 2000 stellte das GeoForschungsZentrum Potsdam Mittel zur Verfügung, um die Bohrung zu Forschungszwecken wieder zu öffnen und bis auf 4294 Meter zu vertiefen.

Ein erster Produktionstest (Primärtest) zur Bestimmung des Ausgangszustandes verlief positiv. Die Arbeiten wurden mit dem vom Bundesministerium für Wirtschaft finanzierten Projekt „Erschließung klüftig-poröser Speicher im Norddeutschen Becken - Experimente zur Stimulation von Sandsteinen in der Geothermiebohrung Groß Schönebeck“ mit der Stimulation der Sandsteinhorizonte im Jahr 2002 fortgesetzt. Mit der Stimulation von Sandsteinen in zwei verschiedenen Tiefenabschnitten konnte bereits eine Produktivitätssteigerung von heißen Tiefenwässern erzielt werden. Zur zusätzlichen Stimulation von Vulkanitgesteinen wurde beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit das Projekt „Erschließung potenzieller geothermischer Speicher im Norddeutschen Becken – wissenschaftliche Grundlagen und Experimente zur Stimulation von Vulkaniten in der Geothermiebohrung Groß Schönebeck“ (FuE-Vorhaben BMU ZIP 0327508) bewilligt. Darüber wird im Folgenden berichtet.

1.1 Standortrecherche Deutschland

mit Beiträgen von M. Wolfgramm

Die Arbeiten dieses Projekts wie auch der vorhergehenden Forschungsprojekte zum Aufschluss von hydrothermalen Speichergesteinen (BEO 0327063 und ZIP 0327063C) wurden im in situ Geothermielabor Groß Schönebeck des GeoForschungsZentrums Potsdam durchgeführt. Ziel ist es, durch Experimente an einem Referenzstandort mit einem für Norddeutschland charakteristischen geologischen Aufbau Erfahrungen über die Nutzbarmachung heißer Tiefenwässer zur geothermischen Stromerzeugung zu gewinnen. Diese Erkenntnisse sollen dann auf Projekte an anderen Standorten übertragen werden können. Dazu wurde eine erweiterte Standortrecherche erarbeitet, mit dem Ziel, diejenigen Gebiete in Deutschland zu charakterisieren, die für die geothermische Stromerzeugung geeignet sind. Diese Studie wurde von Geothermie Neubrandenburg (GTN) im Auftrag des GFZ erstellt. Die folgenden Ergebnisse sind dem Bericht von GTN entnommen.

Um eine geothermische Stromerzeugung energetisch sinnvoll zu gestalten, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Temperaturen $> 100\text{ °C}$,
- Aquifere mit günstigen hydraulischen Eigenschaften (Permeabilität, Porosität, Produktivität),
- Aquifer-Mächtigkeit und –Ausdehnung müssen entsprechend groß sein,
- Tiefenfluide mit handhabbarer Zusammensetzung.

Für reine Porenspeicher gelten die Mindestanforderungen:

- Porositäten größer 15%,
- Permeabilitäten von mindestens 500 mD,
- Mächtigkeiten des Aquifers mindestens 20 m (Sandsteine).

Für Kluftspeicher gibt es nach Rockel et al. (1997) kaum Kriterien zur Erfassung und Prognose.

Auf Basis der Daten von etwa 200 Bohrungen aus den Bereichen des Norddeutschen Beckens, des Oberrheingrabens und des Molassebeckens für die Zielhorizonte des Rotliegend, Buntsandstein und Malm werden die hydraulisch wirksamen Parameter beschrieben und für die relevanten Gebiete bewertet.

Im Rahmen dieser Studie wurden Gebiete ermittelt, in denen die Sedimente des Malm, Buntsandstein oder Rotliegend für eine geothermische Stromerzeugung geeignet sind. Um eine geothermische Stromerzeugung nach wirtschaftlichen und energetischen Gesichtspunkten sinnvoll zu gestalten, sind hierfür Fluidtemperaturen von mindestens 100 °C und hohe Produktivitäten von $75\text{ m}^3\text{h}^{-1}\text{MPa}^{-1}$ notwendig. Aus diesen Betrachtungen konnten Gebiete innerhalb der jeweiligen stratigraphischen Einheiten gefunden werden, die eine geothermische Stromerzeugung ermöglichen könnten. Für diese Bereiche sind weitere standortspezifische Untersuchungen notwendig.

So erwies sich der **Malm** im Prinzip nur in einem Gebiet südlich von München geeignet. Die hydraulischen Eigenschaften der relevanten Gesteine sind durch die primär guten Porositäten in ehemaligen Riffkörpern sowie in diagenetisch erzeugten Dolomiten möglich. Hier konnte die sekundäre Verkarstung die vorhandene reaktive Oberfläche nutzen, um die Porenräume zu vergrößern. Temperaturen $> 100\text{ °C}$ werden nur in Gebieten südlich von München erreicht, da hier die größten Versenkungstiefen bei relativ hohen geothermischen Gradienten gefunden werden. Ein positiver Aspekt ist, dass die Salinitäten der Tiefenwässer mit $0 - 3\text{ g/l}$ extrem gering sind. Somit weisen die Wässer eine gute Handhabbarkeit auf. Die Korrosionsgefahr ist gering und Lösungs- und Fällungsprozesse sind nur untergeordnet wirksam.

Der **Mittlere Buntsandstein** ist im Sinne der Aufgabenstellung sowohl im Oberrheingraben als auch im Norddeutschen Becken nutzbar. Während im Norddeutschen Becken nur in einigen Spezialsenken flachmarine und Küstensande sowie

hydraulisch geeignete fluviatile Sandsteinpakete mit Mächtigkeiten > 20 m (Detfurth-, Solling- und Quickborn-Sandsteine) in relevanten Tiefenbereichen gefunden wurden, sind die fluviatilen Sandsteine des Oberrheingrabens weit verbreitet und im zentralen Oberrheingraben mit 350 – 550 m sehr mächtig ausgebildet. Während die kleinräumigen Bildungen im Norddeutschen Becken durch gute hydraulische Eigenschaften bestimmt werden, können im Oberrheingraben für den Mittleren Buntsandstein Durchlässigkeiten von durchschnittlich 30 – 50 mD (Kernporosität) nachgewiesen werden. Dagegen lassen Produktionstests lokal auf Permeabilitäten von 450 mD schließen. Bei dem Buntsandsteinspeicher handelt es sich also um einen Kluft-Porenspeicher. Für eine geothermale Nutzung ist es hier erforderlich, höffige Kluftsysteme anzuschließen, um ausreichend hohe Produktivitäten zu erzielen. Daraus ergibt sich großer Forschungsbedarf, da noch nicht klar ist, inwieweit sich mehrere geothermische Nutzungen beeinflussen, die das gleiche Störungssystem nutzen.

Die Salinität der Wässer liegt etwa bei 100 – 250 mg/l (Na-Cl-Typ; Na-Ca-Cl-Typ). Im Oberrheingraben wurden lokal auch sehr niedrig salinare Wässer gefunden. Dies wird auf die Zumischung meteorischer Wässer zurückgeführt. Prinzipiell weisen die Wässer einen hohen CO_2 -Gehalt auf, was im Zuge von Entgasungsprozessen zur Karbonatausfällung führen kann. Die Korrosionsgefahr ist aufgrund des hohen Lösungsinhaltes als hoch einzuschätzen.

Das **Rotliegend** in Deutschland ist für eine geothermische Nutzung nur sehr lokal und bedingt geeignet. Prinzipiell scheinen die am Südrand des Norddeutschen Beckens befindliche sandige Fazies und insbesondere die dort befindlichen äolischen Sandsteine potenziell geeignet zu sein. Dabei werden die relevanten Gebiete heute noch überwiegend durch die Kohlenwasserstoffindustrie genutzt, da die entsprechenden Sandsteine Erdgasspeicher bilden. Im Falle einer geothermischen Nutzung müssen allerdings mehrere Speicherhorizonte parallel genutzt werden, da die Produktivität eines Aquifers allein nicht ausreichend groß ist.

Das Rotliegend im Oberrheingraben ist in einem kleinen Gebiet zwischen Worms und Stockstadt in einer Tiefenlage, die eine Nutzung im Sinne der Aufgabenstellung gewährleistet. Allerdings sind die Matrixeigenschaften der fluviatilen Sandsteine meist mit mittleren Permeabilitäten von 0,1 – 10 mD sehr schlecht. Wiederum ist nur die kombinierte Nutzung des Kluft- und des Porenspeichers ausreichend.

Die Fluide weisen hohe Salinitäten von 200 – 300 mg/l (Ca-Na-Cl-Typ) auf. Somit besteht eine hohe Gefahr hinsichtlich Korrosion sowie Lösungs- und Fällungsprozessen.

Aus den Recherchen ergeben sich einige Problemstellungen, die weiteren Forschungsbedarf bedingen.

- So sind Prozesse und Wirkungen durch Fluide mit Temperaturen > 100 °C bei entsprechenden Salinitäten noch zu wenig erforscht.
- Kombinierte Kluft-Porenspeicher sind noch wenig erforscht. Das betrifft unter anderem den hydraulischen Wirkkreis von Kluftporenspeichern, wie er z. B. für die Bemessung von bergrechtlichen Bewilligungsfeldern benötigt wird. Auch ist noch nicht geprüft worden, inwieweit sich mehrere Anlagen in einem kleineren Gebiet auf die hydraulischen und thermalen Eigenschaften der Tiefen-

wässer auswirken. Das gilt sowohl für den Oberrheingraben als auch das Molassebecken.

- Stimulationsmethoden zur langfristigen Erweiterung von Kluftsystemen stehen in ihrer Erforschung erst am Anfang. Hier ist ein großes Potenzial enthalten, da flächenmäßig in einem Großteil Deutschlands keine Porenquifere für die erforderlichen Tiefenlagen vorhanden sind. Somit kommen hier nur Klüfte in Frage.
- Geochemische Prozesse sind häufig noch nicht umfassend genug bearbeitet, da sie schlecht zu quantifizieren sind. Vor allem über die Reaktionskinetik ist wenig bekannt. Geochemische Prozesse sind meist Ursache im Falle des Versagens einer geothermischen Anlage.
- Die genaue geologische Recherche und Aufarbeitung von Altdatenbeständen liefert wichtige Hinweise und sollte unverzichtbar für die Standorterkundung sein. Hierin steckt noch ein großes Potenzial.

1.2 Ausgangssituation Groß Schönebeck

Die ersten Stimulationsexperimente fanden in den Sandsteinhorizonten in 4200 Metern Tiefe im Jahr 2002 statt (Projekt ZIP 0327063C). Sie wurden noch weitgehend konventionell, d. h. auf der Basis der aus der Kohlenwasserstoff-Exploration vorliegenden Erfahrungen durchgeführt. Mehrere Hundert Kubikmeter einer speziell aufbereiteten Flüssigkeit wurden bei einem Überdruck von 17 MPa über die Bohrung in das Gebirge injiziert, um das Gestein hydraulisch aufzubrechen, neue Risse zu erzeugen und vorhandene zu erweitern. Stützmittel in Form kleiner Kügelchen (Carbolite, keramischer Sand) wurden eingebracht, um die Risse offen zu halten. Nach der Stimulation vorgenommene Messungen zeigen, dass nun mehr Wasser durch das Gestein zur Förderbohrung strömen kann. Mit einem anschließend durchgeführten Produktionstest konnten höhere Fließ- und Förderraten nachgewiesen werden. Die Produktivität der Bohrung konnte, jeweils durch ein Kurzzeit-Experiment nachgewiesen, von $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ nach der Aufwältigung auf $2,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ nach dem Proppant Frac gesteigert werden. In einem Langzeit-Pumptest fiel dieser Wert jedoch auf $0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$.

Das Experiment hat gezeigt, dass schon geringe Druckerregungen eine Reaktion des Gebirges bewirken. Die Risse können schon bei moderatem Druck initiiert bzw. geweitet werden. Die Testserie war zudem ein operationeller Erfolg. So wurden z. B. erstmals in Tiefen um 4 km im unverrohrten Bohrloch mechanische Packer problemlos mehrmals gesetzt und entfernt, ein Vorgang der generell ein hohes Risiko birgt. Für eine wirtschaftliche Nutzung des Reservoirs waren die erzielten Produktivitäten jedoch nicht ausreichend. Daher wurden die Experimente mit der massiven Stimulation der Sandstein- und Vulkanithorizonte fortgesetzt.

In den folgenden Kapiteln werden die Arbeiten über die Reservoircharakterisierung, die Untersuchungen der Fluide, die Stimulationsarbeiten sowie die begleitenden geophysikalischen Arbeiten und Arbeiten zur obertägigen Materialauswahl und Energieverfahrenstechnik vorgestellt.

2 Reservoircharakterisierung

2.1 Reservoirgeologie

mit Beiträgen von H.-G. Holl

Charakterisierung und Verbreitung der Vulkanite

Das Norddeutsche Becken ist Teil eines großräumig angelegten Senkensystems, das in Europa von der Nordsee bis nach Polen reicht. Es liegt zwischen dem Baltischen Schild im Norden und den Variskischen Gebirgszügen im Süden. Die Beckenfüllung enthält bis zu 12 km mesozoische und paläozoische Sedimente. Tektonische Bewegungen im späten Karbon bis frühen Perm führten zur Ablagerung von vulkanischen Gesteinen, die bis zu 2 km mächtig sind. Diese etwa 300 Millionen Jahre alten Vulkanite bestehen aus Rhyolit, Ignimbrit, Andesit und, weniger häufig, Basalt (Breitkreuz and Kennedy, 1999; Benek et al., 1996). Die Vulkanite werden überdeckt von einer klastischen Sequenz aus dem Rotliegend, bestehend aus fluviatilen und äolischen Ablagerungen (Rieke et al., 2001). Die sedimentäre Abfolge wird fortgesetzt mit Wechsellagen von Salzen und Karbonaten, abgelagert während des Zechsteins. In der Kreidezeit verursachten Salzbewegungen lateral stark variierende Schichtmächtigkeiten. Im Hangenden folgen mesozoische, tertiäre und quartäre Sedimente.

Geologische Internstruktur am Standort Groß Schönebeck

Im Hinblick auf die Rolle des Rotliegend-Untergrundes am Standort Groß Schönebeck als potenziellem geothermischen Reservoir wurden verschiedene seismische Untersuchungen herangezogen.

In der Umgebung der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 wurden die reflexionsseismischen Profile Liebenwalde LEW 01, LEW 24 und LEW25 auf Anzeichen von geologischen Störungszonen überprüft und neu interpretiert. In einem zweiten Arbeitsschritt wurden zusätzlich die Profile Prenzlau PRZL9202 und PRZL9203 mit einbezogen (Berichte der GGD Leipzig vom 01.12.2001 und 02.08.2002). Alle drei Liebenwalder Profile wurden tiefengestreckt, wozu die notwendigen Geschwindigkeitsgrenzen korreliert wurden, und ein Abgleich zu den beiden kreuzenden Prenzlauer Profilen durchgeführt.

Durch die Neuinterpretation der reprozessierten Daten der Liebenwalder Profile konnten im Rotliegend Störungssysteme nachgewiesen und ein Modell zum tektonischen Bau des Prä-Zechstein im Raum Groß Schönebeck erstellt werden. Das Modell divergenter Strike-Slip-Störungen erlaubt eine schlüssige Interpretation der regionalen Strukturen: als Folge von dextralen Blattverschiebungen entstanden synsedimentär transtensiv angelegte, intern gestaffelte Grabensysteme (Depotzentren) mit einer Streichrichtung von NNE nach SSW (Bild 2.1.1).

Der unmittelbare Bereich um die Bohrung Groß Schönebeck 3/90 zeigt sowohl bei Horizontkorrelation als auch bei den durchgeführten Analysen seismischer Attribute

und der Kohärenz Indizien von Störungen bzw. erhöhter Klüftigkeit. Eine flächenhafte Verfolgung ist jedoch nicht möglich.

Aus diesen Arbeiten bestehen konkrete Vorstellungen über die Strukturen im Zielgebiet. Dort befinden sich vorwiegend Sandsteine und Vulkanite, die von lithologieübergreifenden Trennflächensystemen durchzogen sind. Mit diesen Gesteinen wurden Experimente durchgeführt, um die Durchströmungseigenschaften zu bestimmen.

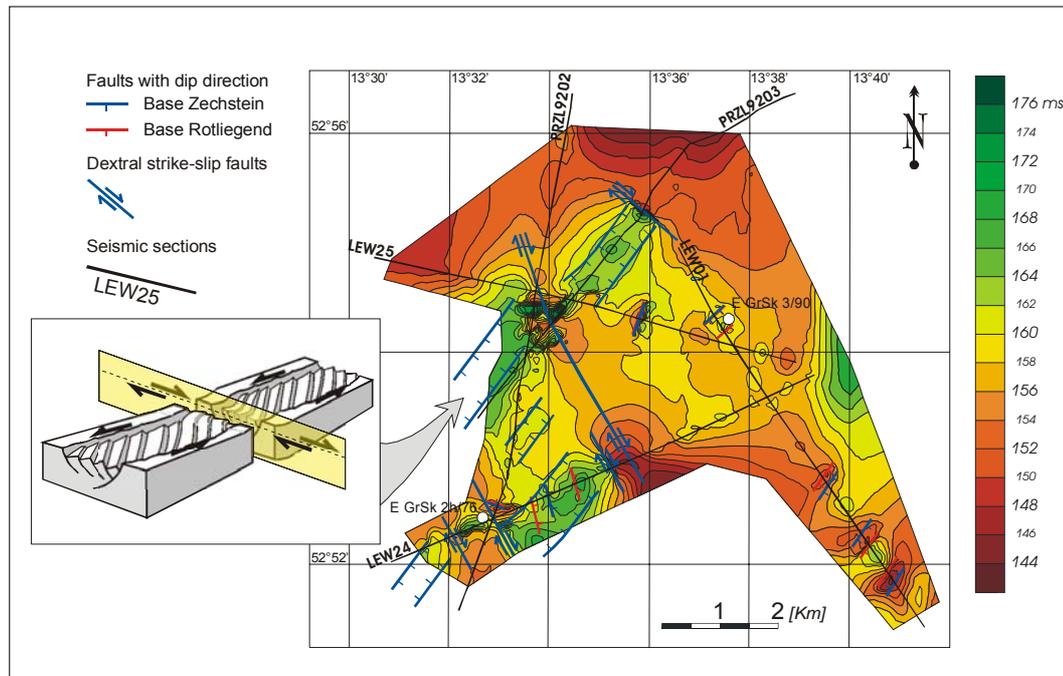


Bild 2.1.1: Strukturinterpretation der vertikalen Laufzeiten der Region um die Bohrung Groß Schönebeck (Horizont Z1 – H6, prozessiert von GGD Leipzig). Das Grabensystem streicht NNE – SSW. Weiße Kreise kennzeichnen die Bohrlokationen des Feldes Groß Schönebeck (aus Holl et al., 2004).

2.2 Laboruntersuchungen unter simulierten in situ Bedingungen mit Beiträgen von U. Trautwein

Voraussetzung für das Verständnis der physikalischen Prozesse, die im Reservoir ablaufen, sind Untersuchungen unter kontrollierten Laborbedingungen. Hierzu wurden die produktions- und injektionsbezogenen Änderungen des effektiven Spannungszustandes durch Variation des Porendrucks unter uniaxialen Verformungsbedingungen in einer Triaxialpresse simuliert. Dabei wurden hydraulische, elektrische und elastische Parameter während der Verformung kontinuierlich gemessen.

Das Prozessverständnis der Permeabilitätsentwicklung in den Reservoir-Sandsteinen soll aus der Erfassung der Porenraumstruktur mittels Bildanalyse von Dünnschliffen und Quecksilberintrusionmessungen abgeleitet werden. An drei Proben, die wie in Bild 2.2.1 dargestellt durch die Porenradienverteilung charakterisiert sind, wurde der Einfluss des Porendrucks untersucht:

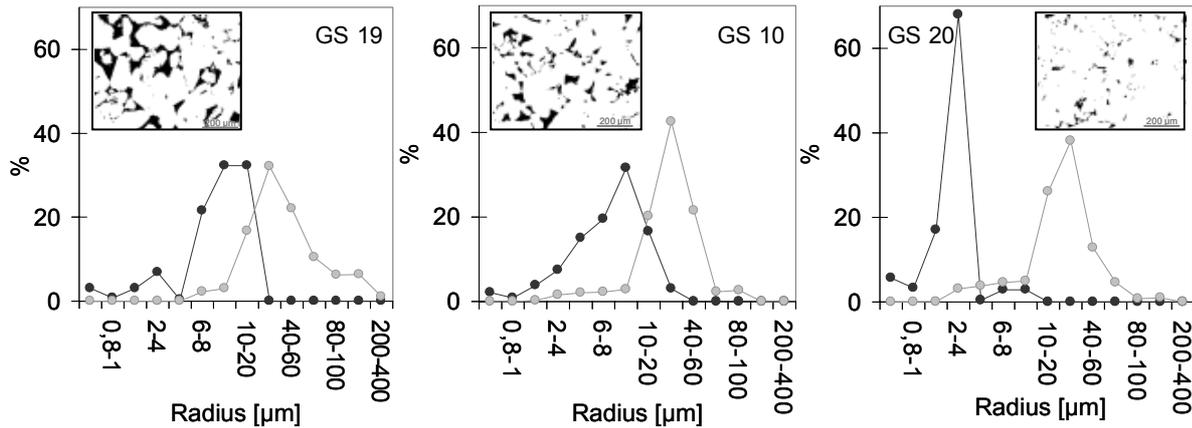


Bild 2.2.1: Dünnschliffbilder (binär, Porenraum in schwarz) und Porenradienverteilungen aus Quecksilberintrusion (schwarze Kurve) bzw. Bildanalyse (graue Kurve) von Proben aus verschiedenen Tiefen der Bohrung Groß Schönebeck 3/90: GS 10 (4197,1 m), GS 19 (4180,4 m) und GS 20 (4198,4 m), Trautwein (2004).

Die Absenkung des Porendrucks unter einaxialen Verformungsbedingungen bewirkt eine Zunahme der effektiven und deviatorischen Belastung (Trautwein und Huenges, 2003; Trautwein, 2004). Die damit verbundene Porositätsänderung ist gering gegenüber der Änderung von Permeabilität und Formationsfaktor. Bei großer Porendruckabsenkung kommt es zu einem Wiederanstieg der Permeabilität, der nicht mit der elektrischen Leitfähigkeit korreliert. Diese Diskrepanzen können nur aus Sicht der Porenraumstruktur erklärt werden (siehe Bild 2.2.2).

Porenraumparameter wie Konstriktivität, Tortuosität, effektive Radien und Konnektivität bestimmen die Leitfähigkeit eines Gesteins. Es sind geometrische Größen, die auf der Abstraktion der komplexen Porenraumstruktur auf Kapillaren von unterschiedlichem Durchmesser, Einschnürung, Vernetzung und Gewundenheit basieren. Da sie in der Regel nicht direkt gemessen werden können, werden sie im Folgenden qualitativ diskutiert.

Unter einaxialen Verformungsbedingungen führt die Porendruckabsenkung zu axialer Kompression des Gesteinskörpers. Dabei nehmen die Fließquerschnitte vor allem in lateraler Richtung (schichtparallel) ab und die Konstriktivität steigt. Werden dabei horizontale Verbindungen der Fließwege komplett geschlossen, sinkt auch die Konnektivität. Insgesamt nimmt die Tortuosität zu, ohne dass sich das Porenvolumen signifikant ändern muss.

Ein Wiederanstieg der Permeabilität in Richtung der größten Hauptnormalspannung ist abhängig vom Verhältnis zwischen effektiver Spannung und Differenzspannung sowie vom Gestein selbst (Ausgangsporosität) und wurde experimentell von zahlreichen Autoren (z. B. Bouteca et al., 2000; Khan and Teufel, 2000; Zhu and Wong, 1997) beobachtet. Erklärt wird der Permeabilitätsanstieg durch die Ausbildung von Mikrorissen in Richtung der größten Hauptnormalspannung. Eine aktuelle Zusammenfassung über die spannungspfadabhängige Permeabilitätsentwicklung gibt Heiland (2003). Die Öffnung von Fließwegen in axialer Richtung (senkrecht zur Schichtung) führt aus Sicht der Porenraumstruktur vor allem zu einer Zunahme der hydraulischen Konnektivität in axialer Richtung und damit zu einer Abnahme der Tortuosität.

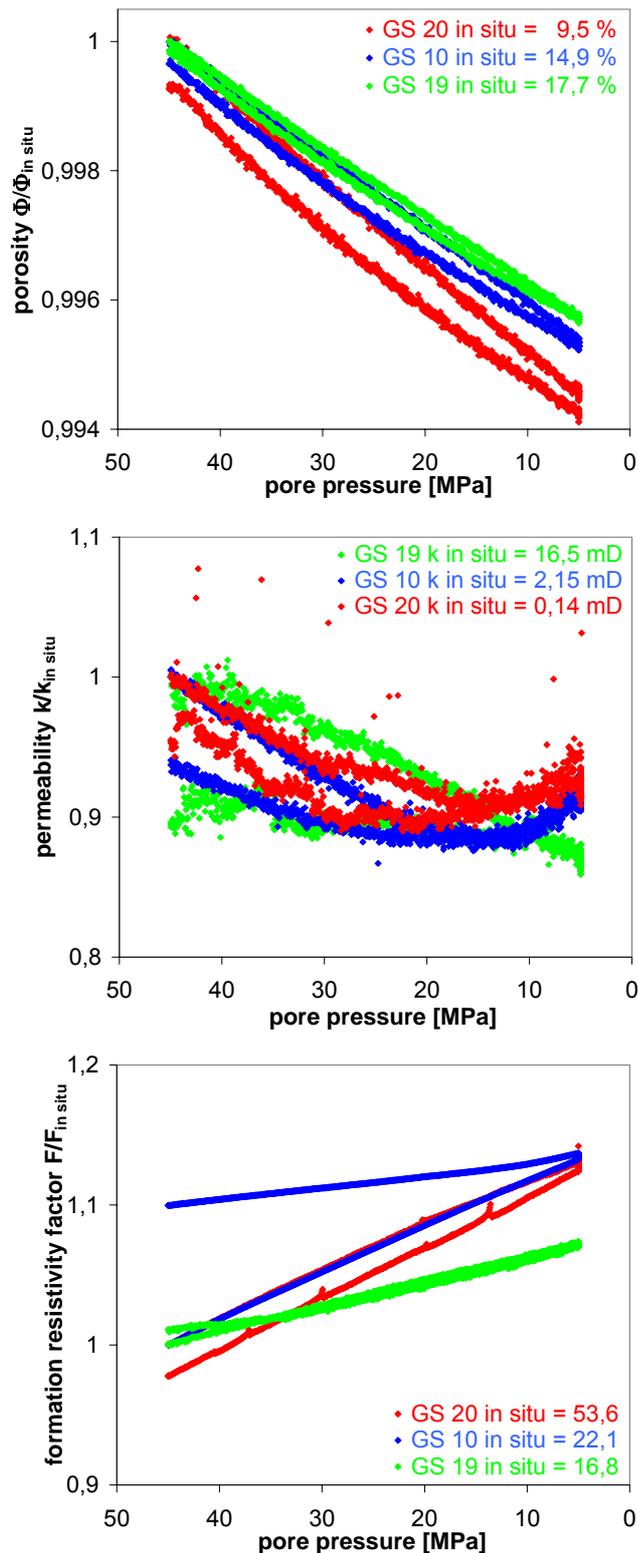


Bild 2.2.2: Porendruckinduzierte petrophysikalische Eigenschaften von Proben der Bohrung Groß Schönebeck 3/90, bezogen auf den jeweiligen in situ Wert (neben der Probennummer vermerkt). Oben: Porosität, Mitte: Permeabilität, Unten: Formationswiderstandsfaktor.

Die Zunahme der hydraulischen Konnektivität korreliert nicht mit der weiterhin abnehmenden elektrischen Konnektivität, worin sich die unterschiedliche Struktursensitivität des hydraulischen Transportes und der elektrischen Leitfähigkeit zeigt. Da die Permeabilität stärker vom Porenradius abhängig ist als die elektrische Leitfähigkeit, erfolgt der hydraulische Transport nur über die größeren Kanäle und ist damit heterogener verteilt als der elektrische (David et al., 1990). Einfache Netzwerkmodelle zeigen, dass die elektrische Tortuosität stets kleiner als die hydraulische ist (z. B. Dullien, 1992).

2.3 Durchströmungsversuche an Reservoirgesteinen

mit Beiträgen von M. Wolfgramm und A. Seibt.

In Vorbereitung der geplanten Open-hole-Stimulation mit Wasser aus einem Grundwasserleiter sind Versuche zur Konditionierung des Injektionsfluides durchgeführt worden. Wichtige Aussagen für dieses Konditionierungskonzept lieferten dabei die hier dokumentierten Ergebnisse des Durchströmungsversuches eines Rotliegend-Sandsteins. Ziel des Experimentes war u. a. die Reaktion von Tonmineralen auf chemisch unterschiedlich zusammengesetzte Injektionsfluide zu erfassen und zu messen, ob z. B. eine Reduzierung der Permeabilität durch Quellung und/oder Mobilisation von Tonmineralen erfolgen würde.

Ausgangspunkt war dabei eine petrographische Untersuchung von verschiedenen Rotliegend-Bohrkernen der Bohrung Groß Schönebeck 3/90, welche die lithologische Zusammensetzung der Rotliegend-Sedimente und ihres Inventars an Tonmineralen zeigen. Nach der Durchströmung wurde der Kern mikroskopisch untersucht. Die chemische Analyse der Wässer aus dem durchströmten Bohrkern sollten Hinweise auf Lösungs- und Fällungsreaktionen bzw. Tonmineralmobilisierung liefern.

Der Durchströmungsversuch stellt im Labormaßstab die hydraulische Stimulation nach, welche im Rahmen massiver Wasserfracs der Rotliegendgesteine erfolgen wird. Somit lassen sich Schlussfolgerungen über das hydraulische Verhalten während der Stimulationsexperimente gewinnen (Bild 2.3.1).

In diesem Versuch wurden in 18 Tagen etwa 3 % der vorhandenen Kalzitminerale gelöst. Unter der Annahme, dass Dolomitminerale mit ähnlichen Anteilen beansprucht wurden und dass eine Freisetzung von weiteren kogenetischen Mineralen (Hämatit etc.) erfolgt, kann durch die Verwendung von angesäuerten Injektionsfluiden eine deutliche Erhöhung der Porositäten stattfinden. Das sollte vor allem deshalb von Bedeutung sein, weil die Durchflussmengen und Temperaturen in den Rotliegend-Sandsteinen der Bohrung selbst deutlich höher sind, als es im Durchströmungsversuch simuliert wird.

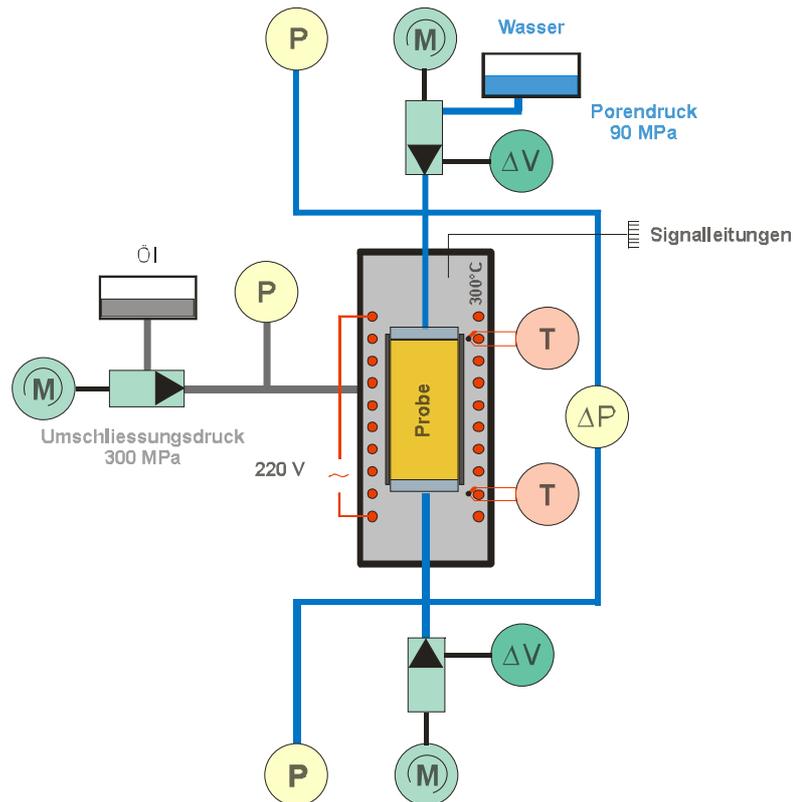


Bild 2.3.1: Schema des technischen Aufbaus der Durchflusszelle des Geoforschungszentrums Potsdam.

Der Durchströmungsversuch zeigt, dass eine Mobilisierung und Quellung von Tonmineralen durch den Einsatz von salzfreiem, angesäuertem Brunnenwasser ausgeschlossen werden kann. Mobilisierung und Transport von Feinstpartikeln sind aber abhängig vom Injektionsdruck. So können z. B. bei kurzfristigen Porendruckveränderungen Partikel mechanisch mobilisiert und über kleine Entfernungen transportiert werden. Diese Mobilisierung ist aber nur von den hydraulischen Parametern, nicht von der Chemie der Fluide, bestimmt. Durch den Einsatz von angesäuertem Wasser können Lösungserscheinungen an Karbonatmineralen sowie eine Mobilisierung von Schwermetallen beobachtet werden. Dies kann indirekt zu einer Mobilisierung von mit den Karbonaten verwachsenen Partikeln führen. In Injektionstesten ist mit erhöhten Schwermetall- und CO_2 -Gehalten zu rechnen. Eine Schädigung des Speichers durch diese Lösungsvorgänge lässt sich aber ausschließen. Dies ergibt sich aus dem geringen Anteil der Karbonatzemente am Gesamtgestein sowie ihrer unregelmäßigen Verteilung. Weitere Details zu diesem Experiment finden sich bei Wolfgramm et al. (2004).

2.4 Modellierung hydraulisch-chemischer Prozesse während der Stimulation mit Beiträgen von J. Bartels

Die Simulation und Modellierung von gekoppelten hydraulisch-chemischen Prozessen ist ein wichtiger Beitrag zum Verständnis der Vorgänge in stimulierten Bohrungen. Mit dieser Arbeit wurde die Geothermie Neubrandenburg GmbH beauftragt. Die folgende Zusammenfassung ist dem Bericht entnommen.

Hydrogeothermale Speicher, deren Erschließung mit der Nutzung generierter oder natürlicher Einzelklüfte oder Kluftsysteme verbunden ist, stellen hohe Anforderungen an Testauswertungsalgorithmen und Simulationsprogramme, die zu ihrer Analyse, Beschreibung und Prognose verwendet werden sollen. Die Ursachen für die erhöhte Komplexität des Problems gegenüber der Erschließung reiner Porenspeicher sind:

- der bestimmende Einfluss der konkreten, standortspezifischen Kluftgeometrie auf Fließverhalten, Wärmeausbreitung und Kinetik chemischer Reaktionen,
- die Wechselwirkung von "schnellen" Prozessen in den Klüften mit langsameren Prozessen in der porösen Matrix oder allgemeiner, die Wechselwirkung zwischen Transport (Kluft) und Speicherung (Matrix).

Die beiden Programme zur numerischen Simulation von Strömung und Wärmetransport im Untergrund SHEMAT und FEFLOW wurden hinsichtlich ihrer Eignung zur Berechnung des Fließverhaltens in Porenspeichern, die über eine Kluft an eine Injektionsbohrung angeschlossen sind, untersucht. SHEMAT erweist sich als geeignet für Berechnungen von Modellen mit relativ schlecht leitenden Klüften, in denen aber chemische Reaktionen im Reservoir und ihre Rückkopplung auf die Permeabilität wichtig sind. Für gekoppelte hydraulisch-thermische Berechnungen mit Klüften oder Kluftsystemen, die eine komplizierte Geometrie aufweisen oder deren Geometrie durch Anpassung im Modell ermittelt werden soll, stellt die neue Version 5 von FEFLOW ein geeignetes Werkzeug dar. Das gilt insbesondere für gut leitende Klüfte, deren Strömungsverhalten nicht mehr mit dem Darcy-Gesetz angenähert berechnet werden kann.

Die Berücksichtigung der Temperatur des ausgekühlten reinjizierten Formationsfluids führt dazu, dass die Anwendung einiger analytischer Verfahren zur Auswertung von transienten Druckkurven zu ungenau wird.

Das numerische Simulationswerkzeug „SHEMAT/Processing SHEMAT“ wurde substantiell weiterentwickelt. Es enthält jetzt ein Modul für chemische Reaktionen und eine graphische Benutzerumgebung. Damit wurde der Umfang der berechenbaren Mineralsysteme deutlich erweitert. Bild 2.4.1 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der Druck- und Temperaturverteilung für zwei Fälle mit um einen Faktor 10 verschiedenen Kluftleitfähigkeiten ohne chemische Reaktionen (Referenzsituation, Modellierung mit SHEMAT).

Die erste Anwendung dieser erweiterten Version erfolgte für Simulationsrechnungen zur Bestimmung des maximalen Einflusses chemischer Reaktionen bei einem Wasserfrac, wie er im Frühjahr 2003 in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 erfolgte. Sie ergeben den zeitlichen Verlauf und die räumliche Verteilung der Gebiete mit Auflösung oder Ausfällung der relevanten Zementminerale Calcit, Anhydrit und der amor-

phen SiO₂-Modifikationen. Es wird offensichtlich, dass eine Differenzierung entsteht und deshalb mindestens zweidimensionale gekoppelte hydraulisch-thermische Berechnungen notwendig sind.

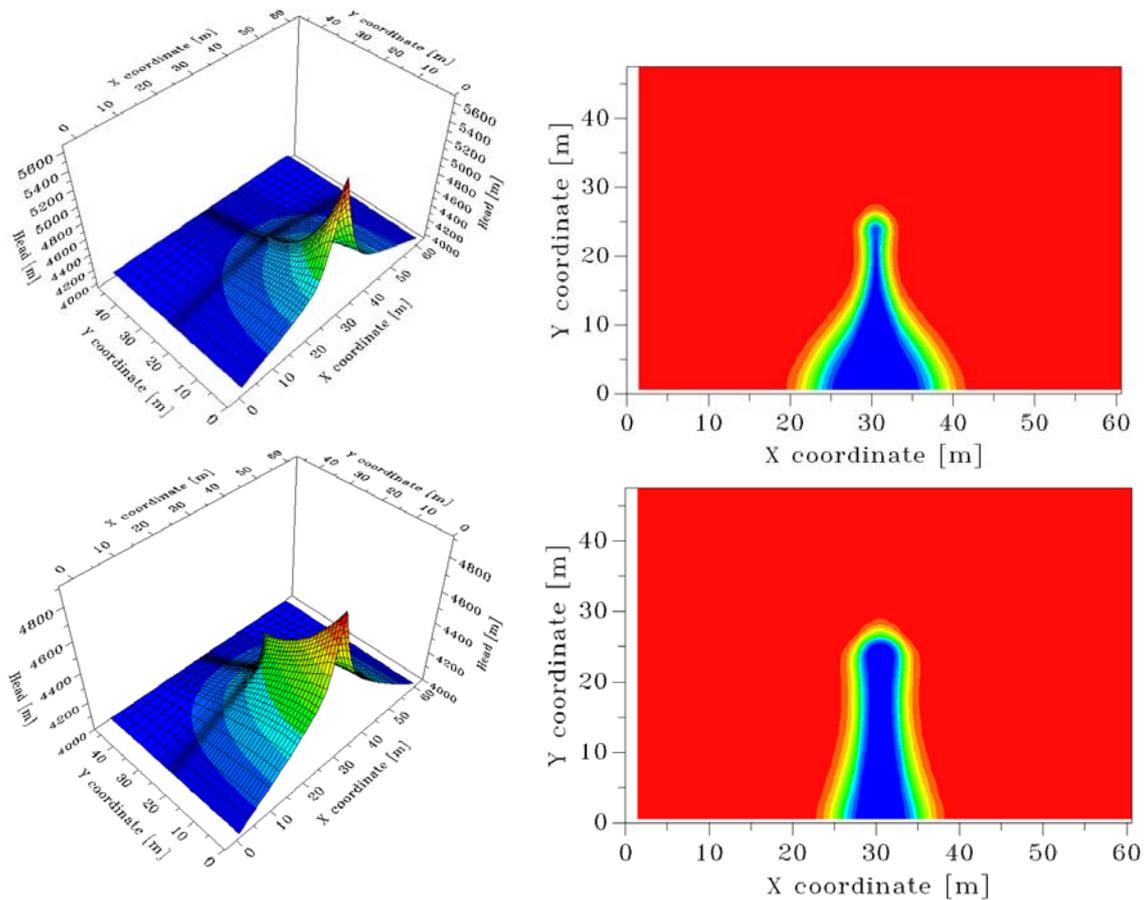


Bild 2.4.1: Druck (links) und Temperaturverteilung (rechts) für eine Kluft mit geringer (oben) und hoher (unten) Kluftleitfähigkeit. Beide unterscheiden sich um den Faktor 10: geringe Kluftleitfähigkeit: $5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$; hohe Kluftleitfähigkeit: $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$. Rot: 150 °C; blau: 40 °C.

Es kann klar gezeigt werden, dass die einfache Prognose der Fällungs- und Lösungstendenzen über die Interpretation des temperaturabhängigen Sättigungsindex eines Minerals versagt, wenn sich, wie im Falle der Injektion konditionierten Brunnenwassers, die thermodynamischen Randbedingungen durch gekoppelte Mineralreaktionen und Transport zu schnell ändern. Dann ist eine numerische Simulation aller gekoppelten Prozesse notwendig.

Die systematische Untersuchung der beteiligten Zementminerale ergibt eine sehr begrenzte Auswirkung von Ausfällung und Auflösung auf das hydraulische Verhalten, limitiert durch die Einwirkzeit, die Eindringtiefe und die maximal im Fluid auflösbaren Mineralmengen. Das Ergebnis rechtfertigt daher, bei der Interpretation der Stimulatio-
 onsexperimente eine hydraulisch-mechanische Modellierung anzuwenden.

3 Langzeit-Pumptest nach Sandsteinfrac von August bis September 2002

Zur Abschätzung der hydraulischen Parameter, welche in Folge der ersten beiden Sandsteinfrac-Stimulationen verändert wurden, fand von August bis September 2002 - noch vor den massiven Wasserfracbehandlungen - ein Langzeitpumptest mit einem kumulativen Fördervolumen von 700 m³ statt. Über einen Zeitraum von insgesamt 46 Tagen wurden unter moderaten Druckbedingungen die Durchlässigkeit der unterschiedlichen Gebirgshorizonte, die Ausdehnung des Reservoirs und die chemische Zusammensetzung des Tiefenwassers bestimmt. Im Vergleich mit den Daten vor der Testserie wurden die Auswirkungen der Sandsteinstimulationen abgeschätzt, deren Berücksichtigung für weiterführende Experimente von Bedeutung ist.

3.1 Hydraulische Ergebnisse des Produktionstests

mit Beiträgen von A. Reinicke und G. Zimmermann

Die Absenkung erreichte ein konstantes Niveau nach etwa 10 Tagen, die Fließrate jedoch erst zum Ende des Tests. Das zeigt sich auch im Produktivitäts-Index, der erst gegen Ende des Pumptests mit ca. 0,6 m³/h MPa ein nahezu konstantes Niveau erreicht. In der zweiten Phase des Pumptests wurden insgesamt ca. 580 m³ Schichtwasser während des Zeitraums von 37 Tagen gefördert. In Tabelle 3.1.1 sind die Ergebnisse des Produktionstests von 2002 zusammengefasst.

Tabelle 3.1.1: Ergebnisse der zwei Phasen des Produktionstests 2002. GOK: Geländeoberkante.

PARAMETER		PUMPTEST 1	PUMPTEST 2
Datum		10.06 – 25.06.2002	05.08 - 16.09.2002
Testintervall	[m unter GOK]	3874 – 4294	3874 – 4294
Einbautiefe der Förderpumpe	[m unter GOK]	300	330
Fördermenge	[m ³]	94,7	580
Testdauer	[Tage]	9	37
mittlere Fließrate	[m ³ /h]	0,45	0,66
Medium		Schichtwasser mit gelöstem Gas	Schichtwasser
Transmissibilität (Pegelmessung)	[m ³]	4,1 x 10 ⁻¹⁴	3,13 x 10 ⁻¹⁴
Produktivitätsindex	[m ³ /(h*MPa)]	2,5 x 10 ⁻¹⁴	0,6
Dichte	[kg/m ³]	1.180	1.180
Mineralisation	[g/l]	265	265

Die Bohrung war nach Abschluss des Langzeitpumptestes frei zugänglich und vollständig befahrbar. Jedoch sind in einzelnen Abschnitten Ablagerungen („scaling“) an der Rohrrinnenwand entstanden, die bei der ersten Einfahrt des Kalibertools zum Aufstehen der Sonde in etwa 2800 m Tiefe führten. Die darauf folgenden Einfahrten konnten diese Stelle problemlos passieren.

Auswertung von Pumpexperimenten mit der *Multirate-Superposition-Plot-Technique*

Für die Auswertung der Pumptestes wurde ein methodisch neues Rechenverfahren entwickelt. Im Allgemeinen wird das *Horner-Verfahren (HV)* (Horner, 1951) verwendet. Das *HV* abstrahiert das Reservoir als homogenen Porenfluidleiter mit laminarem Fließen und radialer Anströmung. Ferner setzt es eine konstante Fließrate voraus. Da eine konstante Fließrate aus technischen Gründen häufig nicht realisiert werden kann oder eine Fließratenänderung bewusst vorgesehen ist (z. B. beim Stufentest), ist es sinnvoll, eine verallgemeinerte Form des *HV* zur Testauswertung einzusetzen, die Veränderungen der Fließrate berücksichtigt. Bei der verwendeten Methode handelt es sich um eine modifizierte Form der *Multirate-Superposition-Plot-Technique (MSPT)*, die bei Earlougher (1977) beschrieben ist. Earlougher berechnet die Druckantwort p_w des Reservoirs durch Superposition der Lösungen der Einzelfließraten q_n zu den Zeiten t_n . Diese Summe wird genutzt, um die Druckdaten in einem Superpositions-Plot darzustellen. Jeder Fließratenbereich stellt in diesem Plot eine Gerade dar, deren Steigung b und Achsenabschnitt a zur Berechnung der Reservoirparameter Transmissibilität T und Skin S verwendet werden.

Weitere Vorteile der *MSPT* sind die Möglichkeiten, die Druckabhängigkeit der Transmissibilität durch Auswertung von Stufentests abzuschätzen und Pumptestes mit variabler Fließrate bereits während der Förder- bzw. Injektionsphase auszuwerten, so dass für Ergebnisse nicht das Testende abgewartet werden muss.

Die *MSPT* wurde ausführlich an synthetischen Datensätzen getestet und zur Auswertung der moderaten Pumptestes aus dem Sommer 2002 (PT1, Juni 2002 und PT2, August - September 2002) verwendet. Das *MSPT* und die Auswertung der Tests sind bei Reinicke (2003) sowie Reinicke et al. (2004) veröffentlicht.

Untersuchungen des *MSPT* an verrauschten Modelldatensätzen haben gezeigt, dass mit diesem Verfahren, solange die idealisierten Bedingungen eingehalten werden, vorgegebene Reservoirparameter mit hoher Genauigkeit reproduziert werden können.

Die beiden moderaten Pumptestes bieten eine gute Basis, um die Leistungsfähigkeit von *HV* und *MSPT* zu überprüfen. PT1 weicht deutlich von den Idealbedingungen ab, die für die Standard-Auswerteverfahren vorausgesetzt werden. PT2 hingegen kommt den Idealbedingungen sehr nahe. Daher wurden PT1 und PT2 zur Bestimmung von Transmissibilität und Skin sowohl mit dem *HV* als auch mit der *MSPT* untersucht.

Die Build-Up-Messungen unterteilen sich in zwei Bereiche. Zuerst wurde ein Packer (Packer-Daten) in der Bohrung installiert, anschließend wurde die Druckmessung ohne Packer mit einem Langzeit-Pegelmonitoring (Pegel-Daten) fortgeführt. Die Messungen wurden einzeln ausgewertet. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Ta-

belle 3.1.3 gezeigt. Die für die Bestimmung von Transmissibilität und Skin notwendigen Größen μ , c , ϕ , r_w und h sind in Tabelle 3.1.2 angegeben.

Tabelle 3.1.2: Parameter zur Auswertung der in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 durchgeführten Pumptests.

	Variable	Größe
μ	Viskosität	$4 \cdot 10^{-4} \text{ Pa s}$
C	Isothermale Kompressibilität	$5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$
ϕ	Mittlere Porosität der Reservoirgesteine	0.05
r_w	Bohrlochradius	0.075 m
H	Reservoirmächtigkeit	100 m

Tabelle 3.1.3: Transmissibilität und Skin, bestimmt aus den moderaten Pumptests mit dem HV und der MSPT. Das HV wurde für kurze Beobachtungszeiten angewendet, obwohl diese Randbedingungen außerhalb des Geltungsbereichs liegen.

		Transmissibilität [mDm]	Skin []
PT1-	<i>HV</i>	38	-6,6
Packer-Daten	<i>MSPT</i>	42	-6,6
PT1-	<i>HV</i>	27	-6,5
Pegel-Daten	<i>MSPT</i>	27	-6,6
PT2-	<i>HV</i>	67	-4,8
Packer-Daten	<i>MSPT</i>	59	-6,1
PT2-	<i>HV</i>	32	-5,8
Pegel-Daten	<i>MSPT</i>	33	-6,3

Das *HV* bestimmt mit 38 mDm ($1 \text{ mDm} = 10^{-15} \text{ m}^3$) eine kleinere Transmissibilität aus den PT1-Packerdaten als die *MSPT* mit 49 mDm. Der zu kleine Wert resultiert aus einer mittleren Fließrate, die für das *HV* angenommen werden muss, die kleiner ist als die letzte im Reservoir wirkende Fließrate. Bei PT2 liegt der umgekehrte Fall vor. Die mittlere Fließrate ist größer als die letzte im Reservoir wirkende Fließrate und daher bestimmt das *HV* mit 67 mDm eine zu große Transmissibilität. Die *MSPT* ermittelt hier 59 mDm.

Für die Pegelmessungen hingegen sind die Unterschiede zwischen den Verfahren aufgrund der langen Beobachtungszeit (PT1: 55 Tage, PT2: 107 Tage nach Pumpenstop) marginal. So ermitteln beide Verfahren eine Transmissibilität von 27 mDm aus PT1 und von etwa 33 mDm aus PT2. Dieser zweite Wert stellt auf Grund der guten Testbedingungen und der langen Beobachtungsdauer die bisher beste Ab-

schätzung der Transmissibilität für das Rotliegend in der Geothermie-Forschungsbohrung Groß Schönebeck 3/90 dar.

Der Skin wird in allen Auswertungen mit etwa -6 bestimmt. In diesem negativen Skin spiegelt sich die durch die Stimulationsmaßnahmen erzeugte Rissstruktur wieder, die für eine gute Anbindung des Reservoirs an die Bohrung sorgt.

Als Primärtest wurde 2001 ein Stickstofflittest in Groß Schönebeck durchgeführt und eine Transmissibilität von 20 mDm und ein Skin von -0,1 bestimmt (Tischner et. al., 2002). Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ist nicht möglich, da die Testbedingungen zu unterschiedlich sind. Berücksichtigt man, dass solch ein Stickstofflittest aufgrund seiner kurzen Testdauer stets zu große Transmissibilitäten liefert, so ist durch die Stimulationsmaßnahmen eine deutliche Erhöhung der Transmissibilität erreicht worden. Eine Verbesserung der Reservoiranbindung an die Bohrung konnte ebenso erzielt werden.

Der Vergleich von *HV* und *MSPT* hat gezeigt, dass bei ausreichend langer Beobachtungszeit des Build-Up beide Verfahren zu guten Ergebnissen führen. Variiert die Fließrate stark oder ist die Beobachtungszeit zu kurz, so sollte die *MSPT* für eine exakte Auswertung eingesetzt werden. Die *MSPT* stellt somit ein leistungsfähiges und einfach anzuwendendes Instrument dar, das eine zuverlässige Pumpstauswertung garantiert.

3.2 Zusammensetzung des Reservoir-Fluids

mit Beiträgen von A. Seibt

Die Fluide der Bohrung Groß Schönebeck wurden regelmäßig beprobt und chemisch analysiert, um Eingangsdaten für die Konditionierung des Injektionsfluids und zur Anlagenauslegung des übertägigen Thermalwasserkreislaufes zu gewinnen. Die wasserchemischen Untersuchungen wurden als Auftrag an Boden-Wasser-Gesundheit (BWG) in Neubrandenburg und Geothermie Neubrandenburg (GTN) vergeben. Die Ergebnisse sind im Folgenden den Berichten von BWG sowie GTN entnommen. Die Analyse der Gasgehalte und Zusammensetzung erfolgte in den Labors der Sektion Geochemie des GFZ. Die hier aufgeführten Ergebnisse sind in Wiersberg et al., 2004 publiziert.

Die Tiefenwässer in der Bohrung Groß Schönebeck stammen aus den Sandsteinen und Vulkaniten der Rotliegend-Formation. Diese Fluide sind generell durch Salinitäten von durchschnittlich 280 g/l charakterisiert (z. B. Naumann, 2000). Die Zusammensetzung der Tiefenwässer aus der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 für die verschiedenen Tests von 2001 bis 2002 finden sich in Tabelle 3.2.1.

Die Tiefenproben der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 wurden dabei jeweils aus den Hauptzuflusszonen der Bohrung genommen. Als typische Kennwerte für die Rotliegend-Fluide dieser Bohrung können eine Salinität von 260 g/l und ein pH-Wert um 6 angegeben werden. Nach den Hauptbestandteilen der wässrigen Lösung handelt es sich um ein Fluid vom Ca-Na-Cl-Typ. Relativ hohe Gehalte an Eisen, Mangan, Blei, Zink und Kupfer deuten auf eine metallreiche Fluidquelle hin.

Tabelle 3.2.1: Zusammensetzung der Rotliegendwässer in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 vor und nach der ersten Stimulation sowie den Pumptest.

Probe	GS 16 (4235 m)	GS-L 41 (4135 m)	GS-F 18 (4135 m)	GS-F 21 (4235 m)
Probenahme	nach Primärtest	nach erster Stimulation	nach Pumptest	nach Pumptest
Datum	09. 01. 2001	02. 03. 2002	14. 10. 2002	15. 10. 2002
Kationen	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Li ⁺	204	192	194	230
K ⁺	2900	2800	3070	3130
Na ⁺	38400	38150	37900	38700
Ca ⁺⁺	54000	52500	54000	56500
Mg ⁺⁺	430	420	391	379
Sr ⁺⁺	1900	1400	1475	1550
Ba ⁺⁺	34*	170	93	25
Fe*	114	200	193	57
Mn*	270	270	252	257
Zn ⁺⁺	74*	72	81	85
Pb ⁺⁺	180*	35	11	201
Cu ⁺⁺	7*		<0,75	<0,75
NH ₄ ⁺	75	80	75	200
Anionen				
Cl ⁻	167300	160000	160300	160400
Br ⁻	300	-	199	
SO ₄ ⁻	140	120	62	51
HCO ₃ ⁻	18,9	162	148	112
Allgemein				
TDS [g/l]	265,7	256,3	259,1	261,9
pH	5,7	5,9	5,7	5,5

Für eine genaue Bestimmung von Gasgehalt und Gaszusammensetzung hat sich der gasdichte Bohrloch-Fluidprobennehmer der Fa. Leutert (Leutert P.D.S. System) bewährt. Bei diesem Probennehmersystem wird der Gassammelbehälter erst im Zielhorizont zur Probennahme geöffnet. Obertägig wird die Probe mit einer speziellen Transferapparatur in einen Transport-Autoklaven überführt und schließlich im Labor des GFZ analysiert.

Die Gaszusammensetzung und Gasmenge der Tiefenprobe GS-F 21, genommen im Anschluss an die am 15.10.2002 im Bohrloch in 4235 m Tiefe durchgeführten Maßnahmen (Stimulation, Lifttest und Produktionstest), sind in Tabelle 3.2.2 zusammengefasst. Zum Vergleich sind die Ergebnisse der Tiefenproben GS 16 aufgeführt, welche ebenfalls mit dem P.D.S. Probennehmersystem in fast gleicher Tiefe, aber bereits am 09.01.2001, genommen wurde (Giese et al., 2002).

Die in beiden Proben nachgewiesenen geringfügigen Sauerstoffgehalte (< 0,4 Vol. %) sind auf atmosphärische Kontamination zurückzuführen, da Formationswässer in dieser Tiefe als praktisch sauerstofffrei angenommen werden können. Daher wurde zur Bestimmung der Zusammensetzung des Fluids anhand der gemessenen Sauerstoffkonzentration zunächst der atmosphärische Anteil bestimmt und über die Luftzusammensetzung dieser von den Rohdaten abgezogen.

Tabelle 3.2.2: Ergebnisse der Gasuntersuchungen von Fluiden der Bohrung Groß Schönebeck 3/90: Gaszusammensetzung und Gas-Wasser-Verhältnis der Proben GS 16 und GS-F 21 sowie von fünf Proben des Auslauffests. STP = Standardbedingungen: T = 273,15 K; p = 101325 Pa. *: O₂ - frei gerechnet, n. b.: nicht bearbeitet.

Probe	GS 16 (GIESE et al., 2002)	GS-F 21 (WIERSBERG et al., 2004)	Auslauffest, Probennahme am Bypass nach Separator (5 Proben, Bericht BWG)
Tiefe	4235 m	4230 m	4130 – 4309 m
Datum	09.01.2001	15.10.2002	01.12.2003
Gasanteil [m ³ Gas / m ³ Fluid] (STP)	0,88	1,01	0,6 – 0,9
Ar [vol. %]	0,06	0,05	0,01 - 0,05
He [vol. %]	0,43	0,36	0,5 - 0,6
N₂ [vol. %]	83,4	80,0	83 - 85
CO₂ [vol. %]	1,70	4,6	3 - 6
CH₄ [vol. %]	14,4	14,9	10 - 12
H₂ [vol. %]	<0,5	0,2	n. b.
O₂	*	*	*

Das Gas-Wasser-Volumenverhältnis beträgt im Tiefenfluid unter Standardbedingungen etwa 1:1. Hauptbestandteile der Gasphase sind Stickstoff (ca. 80 Vol. %), Methan (ca. 15 Vol. %) und Kohlendioxid (2-5 Vol. %). Als Nebenbestandteil tritt u. a. Helium (ca. 0,4 Vol. %) auf.

Erdgasvorkommen im Rotliegend mit vergleichbarer Zusammensetzung an Hauptbestandteilen sind aus dem Ostteil des Norddeutschen Beckens bekannt (Krooss et al., 1995; Gerling et al., 1997). Eine hauptsächlich von Stickstoff dominierte Erdgaszusammensetzung kann durch Gasgenese und Migration aus hochreifen Kohlen des Karbon zu einem Zeitpunkt erklärt werden, zu dem die Genese von Methan bereits überwiegend abgeschlossen und Methan in die Atmosphäre entwichen war (Krooss et al., 1995).

Die Isotopenzusammensetzung von Helium und Neon sowie die Neon-Argon-Systematik belegen die Herkunft der untersuchten Gase aus der kontinentalen Erdkruste. Innerhalb des analytischen Fehlers weisen GS 16 und GS-F 21 in ihrem ³He/⁴He-Isotopenverhältnis keinerlei Variationen auf. Unterschiede in der Zusammensetzung der übrigen Edelgasisotope sind mit unterschiedlichen Anteilen einer atmosphärischen Komponente zu erklären.

3.3 Geochemische Modellierungen

mit Beiträgen von T. Kellner, A. Seibt und M. Wolfgramm

Die geochemischen Modellierungen wurden als Auftrag an Geothermie Neubrandenburg (GTN) vergeben. Die Ergebnisse sind im Folgenden dem Bericht von GTN entnommen.

Die Berechnung der Speziesverteilungen ist für die Auslegung eines Thermalwasserkreislaufes von großer Bedeutung, da bereits in der Planungsphase auf Probleme reagiert werden kann. Für die Berechnung von Mineralgleichgewichten in hochsalinaren Tiefenwässern vom Typ Ca-Na-Cl sollte ein Speziationsprogramm folgende Anforderungen erfüllen:

- Berechnung von Aktivitätskoeffizienten hochsalinärer Lösungen unter Berücksichtigung eines hohen Ca-Ionen-Anteils,
- Eignung bei hohen Temperaturen (bis 150 °C),
- Berücksichtigung der Druckabhängigkeit der Gleichgewichtskonstanten und
- Modellierung bestimmter Szenarien, wie z. B. Entgasung, Mischung von Wässern etc.

Für die Modellierung der Lösungsgleichgewichte der im Tiefenfluid der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 gelösten Ionen wurden drei Speziationsprogramme CHEMEQ, PHREEQC und SOLMINEQ.88 ausgewählt und die Ergebnisse kritisch bewertet.

Bei verdünnten Lösungen stimmen erwartungsgemäß die berechneten Sättigungsindizes (SI) für alle Programme in einem Fehlerbereich von +/- 0,2 Sättigungs-Indizes-Einheiten überein. Somit konnten die Programme zur Ermittlung der Veränderung der Lösungsgleichgewichte bei Temperaturänderung für das Tiefenwasser Groß Schönebeck (Probe GS-F 21) angewandt werden.

Die berechneten SI-Werte für Calcit, Baryt und Anhydrit für das Tiefenfluid von Groß Schönebeck über einen Temperaturbereich von 25 °C bis 150 °C unterscheiden sich mitunter sehr stark voneinander. Am besten stimmen die SI-Werte mittels SOLMINEQ.88 mit denen von CHEMEQ für Baryt und Anhydrit bei 70 °C und 150 °C überein, so dass die Lösungs- und Fällungstendenz von Mineralen in einem Thermalwasserkreislauf mit diesem geochemischen Modellierungsprogramm ermittelt wurden.

Die Berechnungen mit dem Programm SOLMINEQ.88 für den Fall der geothermischen Nutzung des Tiefenfluides haben deutlich gemacht, dass bei Entweichen von Kohlendioxid aus der flüssigen Phase mit Calcit ausfällungen aufgrund einer pH-Wert-Erhöhung zu rechnen ist. Deshalb sollte ein Betriebsdruck von mindestens 0,7 MPa über den gesamten Kreislauf eingehalten werden. Bei Abkühlung des Tiefenwassers auf 70 °C erfolgt dann keine Fällung von Calcit und Anhydrit. Aus thermodynamischer Sicht muss die Gefahr einer irreversiblen Baryt- und Kieselsäurebildung einkalkuliert werden, wobei beide Ausfällungsreaktionen möglicherweise kinetisch so gehemmt sind, dass über Tage keine Feststoffe anfallen. Dies sollte allerdings anhand von Versuchen kontrolliert werden, umso mehr, da im Tiefenfluid der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 Ca-Ionen gegenüber den Na-Ionen dominieren und somit aus

thermodynamischer Sicht mit einer höheren Fällungstendenz als ermittelt gerechnet werden muss.

Eine Inertgasbeaufschlagung sollte vorgesehen werden, um einen Sauerstoffeintrag zu minimieren. Auch wenn die Bildung von Manganoxiden gegenüber der Bildung von Eisenhydroxiden kinetisch stark gehemmt ist, muss bei Bildung von Eisenhydroxid eine zunehmende Oxidation von Mangan(II)-Ionen in Betracht gezogen werden.

3.4 Mineralausfällungen während des Produktionstests („scaling“)

mit Beiträgen von H.-G. Holl und M. Wolfgramm

Erste Hinweise für eine Mineralneubildung wurden während des Ausbaus der Pumpen nach dem moderaten Pumptest im Sommer 2002 gefunden. Der obere Bereich der Pumpe, die Ummantelung sowie die Kabel, waren mit einer grauen Schicht überzogen. Die Röntgen-Diffraktions-Analyse (RDA) dieses Materials ergab, dass es sich um gediegenes Blei, Laurionit ($\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$) und Steinsalz (NaCl) handelt. Geringe Anteile von Malachit ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) und Spuren von Baryt (BaSO_4) konnten auch nachgewiesen werden.

Durch Probennahme im Bohrlochtiefsten mit Sandpumpen (bailer) konnten Feststoffe (Gesteinsfragmente, Quarzkörnern, Stützmittel, Spülungsreste und metallische Partikel) gefördert werden, die eingehend untersucht wurden. Unter dem Mikroskop zeigten sich dendritische Kupferaggregate mit einer Länge von bis zu 2 mm. Bei höherer Auflösung wurden charakteristische Oberflächenstrukturen in den Kupferkristallen sichtbar, die einen Neubildungsprozess belegen (Bild 1.3.4.1). Die mineralogische Zusammensetzung der Proben ergab als hauptsächliche Anteile gediegenes Kupfer, gediegenes Blei und Baryt. Darüber hinaus wurden geringe Anteile an Kalzit (CaCO_3), dem Seltenen-Erden Element Fluorid (CeF_3) sowie Galenit (Bleiglanz, PbS) detektiert.

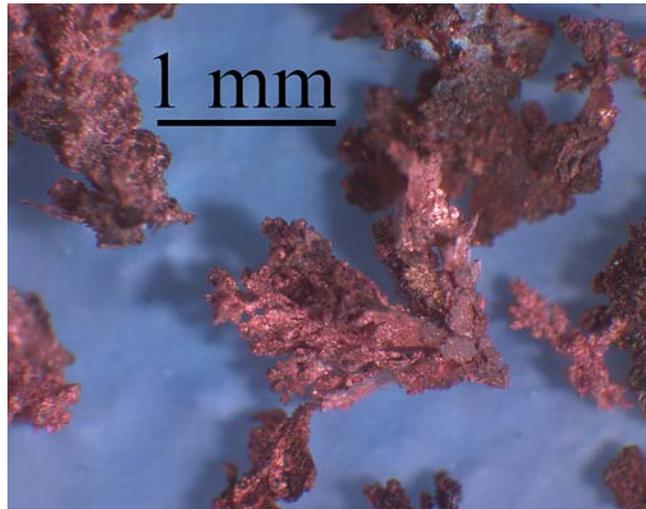


Bild 3.4.1: Dendritische Kupferaggregate aus der Bohrung Groß Schönebeck 3/90, Tiefe 4231 – 4247 m.

Da diese Ausfällungen zum ersten Mal in der Bohrung nach der Verwendung der elektrischen Pumpe aufgetreten sind, wird vermutet, dass die Ausfällung durch einen elektrochemischen oder strömungskinetischen Prozess induziert wurde, hervorgerufen durch das hydraulische Experiment. Das Verstehen der Prozesse und die Ursachen der Ausfällungen sind entscheidend für die Planung von zukünftigen Experimenten und die Vorgehensweise bei der nachhaltigen Nutzung mit vergleichbaren Fluiden.

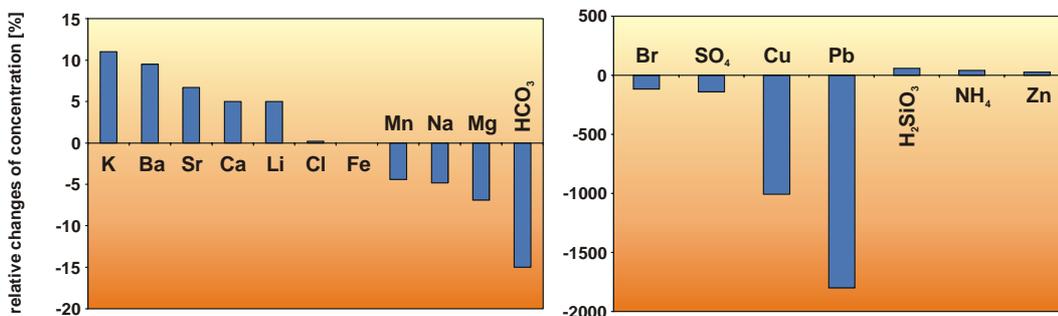


Bild 3.4.2: Relative Änderungen der Ionenkonzentration vor und nach dem Pump-test (03.03.2002 bzw. 14.10.2003). Probertiefe 4231 – 4247 m.

Bohrlochmessungen des Redoxpotenzials (RX) und des Elektrischen Potenzials (EP) sind für die Teufenbereiche von 260 m (Teufe des Wasserspiegels in der Bohrung) bis 2800 m, respektive bis 4280 m, durchgeführt worden (Bild 1.3.4.3). Eine Bohrlochsonde, die für die Kontinentale Tiefbohrung Oberpfalz (KTB) entwickelt wurde (Winter et al., 1991), wurde 42 Tage nach Beendigung des Pumptests eingesetzt. Das elektrische Potenzial ist im verrohrten Bohrloch stabil bei etwa –100 mV. Im Open Hole-Bereich (3840 m bis 4200 m) fällt das elektrische Potenzial steil bis auf –700 mV ab. Diese Potenzialdifferenz in Kombination mit dem Fließen des Forma-

tionswassers während des Pumptests ist möglicherweise der Grund für die Neubildung der gediegenen Metalle und Minerale aus dem Formationswasser. Das Redoxpotenzial fällt exponentiell mit der Teufe. Es stellt einen gleitenden Übergang vom oxidierenden in das reduzierende Milieu in den tieferen Bereichen der Bohrung dar. Von 260 m bis 900 m wird dieser Trend von einem Abfall des Redoxpotenzials unterbrochen, wo lokal reduzierende Bedingungen angetroffen wurden. Ursache dieser Anomalie ist möglicherweise die Entgasung der geförderten Fluide im Teufenbereich zwischen 400 m und 800 m. Das ausgeprägte reduzierende Milieu zwischen 260 m und 320 m kann ursächlich mit der Bleiausfällung an der Verrohrung auf Grund der elektrochemischen und/oder strömungskinetischen Prozesse zusammenhängen.

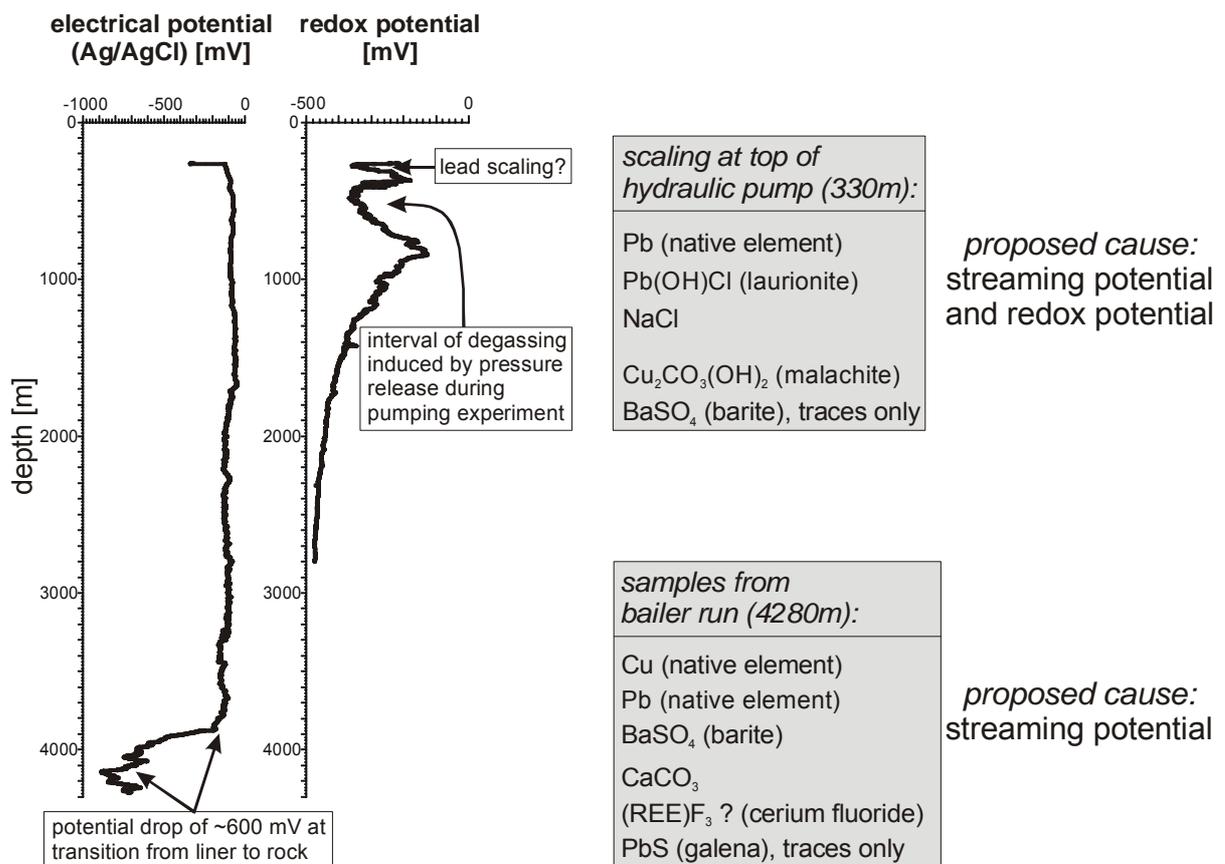


Bild 3.4.3: Elektrisches Potential und Redoxpotential in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90, Inhalte von Feststoffproben und vermutete Ursachen der Neubildung (Holl et al., 2003).

3.5 Bewertung der Eignung von Wässern für die geothermische Nutzung mit Beiträgen von T. Kellner, A. Seibt und M. Wolfgramm

Für die geothermische Stromerzeugung ist künftig die Nutzung von Thermalfluiden mit Temperaturen über 150 °C und - im Norddeutschen Becken - mit entsprechend hohen Mineralisationen geplant. Prinzipiell sind alle bisher betrachteten Fluide des

Norddeutschen Beckens, des Oberrheingrabens und des süddeutschen Malmkarstes geeignet. Es sind dann standortkonkret entsprechende verfahrenstechnische Lösungen zu entwickeln, um das jeweilige Fluid zu beherrschen.

Die bisher genutzten Thermalwässer des Norddeutschen Beckens mit Temperaturen bis 100 °C und Salzgehalten in Form von überwiegend NaCl bis 220 g/l und Gasgehalten bis zu 20 Vol. % sind technisch mit vertretbarem Aufwand beherrschbar.

Im Einzelnen besteht vor allem noch Untersuchungsbedarf bei der Verhinderung von Karbonatausfällungen. Hier sind standortkonkrete Untersuchungen zum Scaling-mechanismus erforderlich, die vor allem geochemische Bewertungen von Fluiden und gelösten Gasen beinhalten. Abhängig von den Ergebnissen muss entschieden werden, inwieweit Maßnahmen der Druckhaltung zum Einsatz kommen können, um CO₂-Entweichen zu vermeiden. Weitere Möglichkeiten zur Beherrschung von Karbonatscalings kann der Einsatz von Inhibitoren zur Verhinderung einer Kristallkeimbildung sein oder die Zugabe eines pH-senkenden Mittels, meist Mineralsäure.

Beim Fördern der 423 K heißen Sole kann es ab Drücken < 24 MPa zur Entgasung von N₂ und CH₄ kommen, entsprechend einer Teufe von < 2200 m. Um CO₂ in Lösung zu halten, ist bei 423K ein Druck von mindestens 0,5 - 0,75 MPa notwendig.

Ein weiterer, für die Thermalwässer noch in unzureichendem Maße untersuchter Problembereich ist die Ablagerung von Schwermetallen, insbesondere Blei. Dabei können in Verbindung mit hohen Bleigehalten elektrochemische Vorgänge eine Rolle spielen.

Für geringmineralisierte Fluide des Malmkarsts sind unter Umständen Ausfällungen von Kieselsäure (SiO₂) bei Abkühlung möglich, wobei hierfür mit geochemischen Prognosemodellierungen recht gute Vorhersagen getroffen werden können.

Zusammenfassend soll für die Fluide in der Bohrung in Groß Schönebeck bemerkt werden, dass insbesondere auf die Eisengehalte im Fluid geachtet werden muss. Die beobachtete Mobilisierung von Eisen könnte bei Veränderungen der physikalisch-chemischen Bedingungen (z. B. Sauerstoffzufuhr) zur Schädigung des Speichers führen.

3.6 Gesteins-Fluid-Wechselwirkungen

mit Beiträgen von T. Kellner, A. Seibt und M. Wolfgramm

Für geothermale Anwendungen sind besonders die Wechselwirkungen von Interesse, welche mit dem Zusammentreffen von unterschiedlichen Fluiden auf sehr unterschiedliche Materialien verbunden sind. So werden generell während des Abteufens der Bohrung und in anschließenden Testen unterschiedliche Fluide (Bohrspülung etc.) in die Bohrung verbracht. Neben den rein chemischen Prozessen sind hierbei, u. a. wegen der drastischen Temperatureffekte, auch physikalische Wirkungen zu beachten. Injektions- und Produktionsteste sind durch mechanische Beanspruchung der Gesteine in Abhängigkeit vom jeweiligen Fluid zu betrachten. Dabei spielt u.a. auch die Viskosität der Fluide eine große Rolle.

Prozesse, die im Zusammenhang mit diesen Reinjektionen abgekühlter Wässer stehen, sind ein Hauptbestandteil geothermischer Forschung (u. a. Ungemach, 2003; Boisdet et al., 1989). Neben Lösungs- und Fällungsreaktionen von Mineralen, spielen

besonders die Tonminerale bzw. auch die Feinstpartikel im Porenraum siliziklastischer Sedimente eine bedeutende Rolle für Änderungen hydraulischer Eigenschaften.

Mit Durchströmungsversuchen am GFZ (Kap. 2.3) konnte gezeigt werden, dass eine Mobilisierung und Quellung von Tonmineralen durch den Einsatz von salzfreiem, angesäuertem Brunnenwasser ausgeschlossen werden kann. Die Mobilisierung und der Transport von Feinstpartikeln ist aber abhängig vom Injektionsdruck, z. B. können bei kurzfristigen Porendruckveränderungen Partikel mechanisch mobilisiert und über kleine Entfernungen transportiert werden. Diese Mobilisierung ist aber nur von den hydraulischen Parametern, nicht von der Chemie der Fluide, bestimmt. Durch den Einsatz von angesäuertem Wasser können Lösungserscheinungen an Karbonatmineralen sowie eine Mobilisierung von Schwermetallen beobachtet werden. Dies kann indirekt zu einer Mobilisierung von mit den Karbonaten verwachsenen Partikeln führen. Im Produktionsbetrieb ist mit erhöhten Schwermetall- und CO₂-Gehalten zu rechnen. Eine Schädigung des Speichers durch diese Lösungsvorgänge lässt sich aber ausschließen. Dies ergibt sich aus dem geringen Anteil der Karbonatzemente am Gesamtgestein sowie deren unregelmäßigen Verteilung.

3.7 Konditionierung des Fracfluids

mit Beiträgen von T. Kellner, A. Seibt und M. Wolfgramm

Um die Rotliegendgesteine der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 hydraulisch zu stimulieren, sollten im Winter 2002/2003 etwa 17.000 m³ aufbereitetes Grundwasser in den unverrohrten Abschnitt der Bohrung verpresst werden. Dabei gelangt das injizierte Fluid in den Teufenbereich von 3800 – 4300 m, wo Rotliegend-Sedimente und permo-karbone Vulkanite (basaltische, Mg-reiche Andesite) anstehen. Die Fluidtemperatur liegt bei ca. 150 °C, die Drücke bei etwa 43 MPa, und die Salinität beträgt 265 g/l (siehe Tab. 3.2.1). Bei der Aufbereitung des Injektionsfluids müssen einige geochemische Aspekte berücksichtigt werden, um Schädigungen des Zielhorizontes bzw. der Bohrlochverrohrung zu vermeiden. Das sind vor allem:

- Chemische/mechanische Destabilisierung von Tonmineralen im Speicher, vor allem Tonmineralquellung,
- Lösung bzw. Ausfällung von Mineralen in Folge der veränderten p/Eh/T/Konzentrations-Bedingungen (Eisenhydroxide, Karbonate, Sulfate);
- Schädigung der Bohrlochwandung durch veränderte p/T/Konzentrations-Bedingungen;
- Mikrobiologisch induzierte Beeinflussungen des Thermalwasserchemismus.

Nachfolgend werden die genannten Aspekte für eine mögliche Schädigung diskutiert. Auf der Basis von Laborversuchen und Literatúrauswertungen ist ein Konzept zur Konditionierung des Injektionsfluids für die massiven Wasserfracs in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 erarbeitet worden.

Die Injektionsflüssigkeit für die im Januar 2003 geplanten Stimulationen wurde dem vorhandenen Wasserbrunnen in Groß Schönebeck entnommen. Tabelle 3.7.1 zeigt die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale in den chemisch-physikalischen Eigenschaften des Formationswassers und des Brunnenwassers.

Tabelle 3.7.1: Physikalisch-chemische Eigenschaften der Wässer an der Bohrung Groß Schönebeck 3/90.

	Tiefenwasser Groß Schönebeck GS-L 41	Brunnenwasser Groß Schönebeck BW
Probenbezeichnung		
pH-Wert	5,87	7,45
El. Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	198.300	460
Eisen [mg/L]	191	0,53
Mangan [mg/L]	245	0,27
TDS [g/L]	256	0,4

Untersuchungen zur Aufbereitung von Injektionsfluiden wurden bisher vorwiegend im Rahmen der Erdöl-/Erdgasförderung für die Stimulierung der Kohlenwasserstofflagerstätten durchgeführt, allerdings mit anderen Zielsetzungen. Im Gegensatz zur Kohlenwasserstoffgewinnung muss bei der geothermischen Nutzung die Förderung und die Injektion von hochmineralisiertem Fluid in poröse Sandsteinschichten über einen relativ langen Betriebszeitraum gewährleistet sein. Aus diesem Grund sind die Erfahrungen aus der Erdöl- und Erdgasförderung nur teilweise übertragbar und es müssen relativ hohe Anforderungen an die für den Wasserfrac vorgesehenen Injektionsfluide gestellt werden.

Der Einsatz von HTU-Gel bei den abgepackerten Fracs im Rotliegend-Sandstein brachte nicht den erwarteten Erfolg. Durch eine Laborstudie an der TU Clausthal, Institut für Erdöl- und Erdgastechnik, wurde eine über mehrere Tage anhaltende Stabilität des mit HTU-Gel angesetzten Fracfluids unter der Bohrlochsohlentemperatur festgestellt. Damit war die Rückförderung aus dem Bohrloch deutlich behindert. Aus diesen Gründen wurde bei dem Open hole-Frac auf den Einsatz von Gel verzichtet.

Auf der Grundlage von Literaturempfehlungen und Laboruntersuchungen können die Rahmendaten für die Konditionierung des Injektionsfluids wie folgt festgelegt werden:

- Salzzugabe ist nicht erforderlich (nur wenige Tonminerale in der Formation),
- keine Verwendung von O_2 -Inhibitoren für frisches Brunnenwasser,
- Verwendung eines O_2 -Inhibitors für Leitungswasser und zwischengelagertes Wasser (Dieethylhydroxylamin),
- Ansäuern mit HCl auf pH 2,5 – 3 zur Verhinderung von Eisenausfällung,
- Verwendung eines handelsüblichen Korrosions-Inhibitors (Lithosolvent),
- keine Verwendung eines Biozids.

4 Stimulationsexperimente und operative Arbeiten

4.1 1. Wasserfrac im offenen Bohrloch von 3883 bis 4294 m

mit Beiträgen von B. Legarth, T. Tischner, A. Reinicke, G. Zimmermann und F. Rummel

Nach den Stimulationsversuchen mit abgepackerten Teufenstrecken zur Rissweitung innerhalb der Sandsteine wurden im Zeitraum von Januar bis März 2003 die Experimente auf den gesamten offenen Abschnitt der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 erweitert (3874 – 4291 m). Ziel ist es, zusätzlich zu den Sandsteinen die darunter liegenden Konglomerat- und Vulkanitschichten anzuschließen und in die künftige Thermalwasserförderung einzubeziehen. Nach den Erfahrungen beim Sandsteinfrac wird jetzt auf Stützmittel wie Gel und Proppants verzichtet.

Eine Vortestserie dient zur Ermittlung der initialen hydraulischen Eigenschaften sowie zur Identifikation der Ausgangspunkte von Rissbildungen. Während der Stufeninjektion werden maximale Raten von 4-5 l/s realisiert, so dass bereits eine Stimulation möglich wird. Nach erfolgreichem Verlauf ist ein Haupttest mit Injektionsraten von bis zu 80 l/s vorgesehen. Die Produktivität soll in der anschließenden Rückförderungsphase bestimmt werden (Bild 4.1.1). In dieser Phase wurde mit der Fa. MeSy, Bochum kooperiert, die u. a. einen Teil der technischen Ausrüstung stellte.

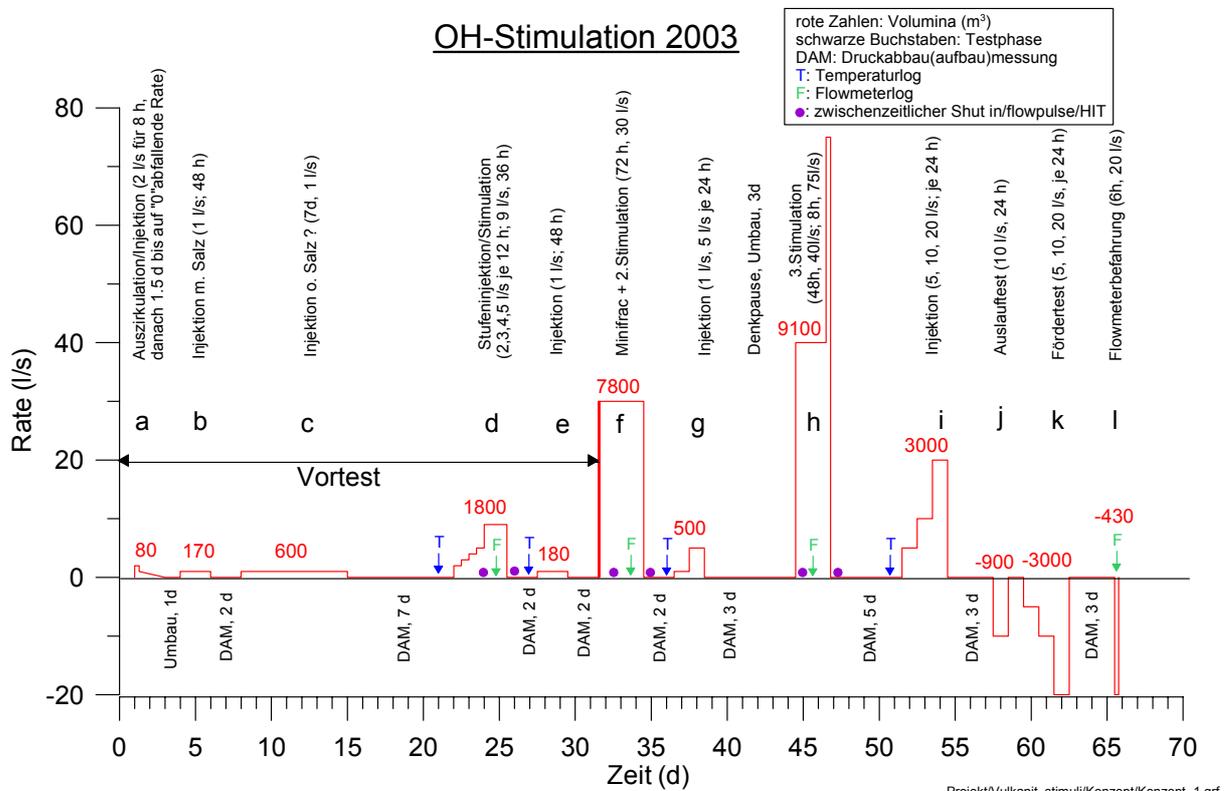


Bild 4.1.1: Geplanter Ablaufplan der 1. Wasserfrac-Stimulation (Februar 2003) im offenen Bohrlochabschnitt der Bohrung Groß Schönebeck (3874 – 4291 m), erstellt in Zusammenarbeit mit T. Tischner (BGR).

Die Injektion von Fluid, das mit Salz angereichert ist (Vortest b in Bild 4.1.1), führte zu keiner signifikanten Veränderungen, z. B. Druckanstiege. Somit sind die Laborexperimente (Kap. 2.3) verifiziert. Auf die Salzzugabe konnte daher in den folgenden Experimenten verzichtet werden.

Zeitgleich zur Stimulation werden Geophone zur seismischen Überwachung des Risswachstums bzw. zur Rissortung eingesetzt (siehe Kapitel 6.1) sowie elektromagnetische Registrierungen durchgeführt, um Veränderungen der elektrischen Leitfähigkeit zu erkennen (siehe Kapitel 6.2).

Die Arbeiten begannen am 13.01.2003. Die Koordinierung der hydraulischen Arbeiten wurde gemeinsam von GFZ und BGR (Dr. Tischner) durchgeführt. Die technischen Arbeiten für den Haupttest (Test f-h in Bild 4.1.1) wurden an die Firma Drilltec, Ettlingen, vergeben. Es wurden am Bohrplatz drei Brunnen von ca. 80 m Tiefe zur Wasserversorgung abgeteuft und eine Konditionierungsanlage errichtet. In speziellen Behältern mit einer Kapazität von 1500 m³ wurde das Wasser zwischengespeichert, um hohe Fließraten bis 80 l/s realisieren zu können. Das Wasser wurde chemisch aufbereitet, damit die Verträglichkeit mit dem Gestein und den Tiefenwässern gewährleistet ist. Mit Salzsäure wurde der pH-Wert 3 eingestellt und es erfolgte die Zugabe eines Sauerstoff- und Korrosionsinhibitors. Die Installation wurde mit sechs Hochdruckpumpen, einem Hochdruckstrang sowie einem Ventilkreuz über der Bohrung komplettiert.

Bis zum Abschluss der Experimente am 03.03.2003 wurden insgesamt 4284 m³ Wasser sukzessive unter hohem Druck in den Untergrund gepumpt (Bild 4.1.2). Mit dem Vortest konnte ein initiales Injektionsraten-Druck-Verhältnis ermittelt werden. Beim Haupttest ab Ende Februar 2003 wurde sukzessive die Injektionsrate zunächst bis 24 l/s erhöht. Innerhalb dieser Steigerung stellte sich eine deutliche Wirkung ein. Die Daten zeigen, dass sich bereits ab einer Injektionsrate von 8 l/s mit ansteigender Injektionsrate der Druckanstieg verringert. Entsprechend erhöht sich die Injektivität, das heißt, es wurde mehr Flüssigkeit je Druckeinheit verpresst (Bild 4.1.3). Daraus kann gefolgert werden, dass ein zusätzliches Reservoir durch die Stimulation angeschlossen wurde, was in der Summe in einer erhöhten Injektivität resultiert.

Im Verlauf der Experimente fielen zwei Brunnen infolge technischen Versagens der Tiefpumpen aus. Dadurch musste die Injektionsrate während der Reparaturzeit (27.02. – 01.03.2003) zurückgefahren werden. Nach einem Auslaufest (01.03.2003) konnte die ursprünglich erzielte Fließrate von 25 l/s nicht wieder erreicht werden, da der Druck sehr schnell das vorgegebene Limit der Verrohrung (25 MPa) erreichte. Durch kurze Wechsel von Injektion und Entlastung der Bohrung wurde versucht, diese Blockade zu beseitigen. Diese Versuche blieben erfolglos, vielmehr reduzierte sich die bis zum Drucklimit verpressbare Wassermenge auf wenige Kubikmeter, die etwa dem Kompressionsvolumen der Rohrstrecke des Bohrlochs entsprechen. Die künstliche Endteufe wurde mit 3901,5 m nur 17 Meter unterhalb des Rohrschuhs in den Tonstein-Sandstein-Wechsellagen bestimmt.

Haupttest Groß Schönebeck 2003

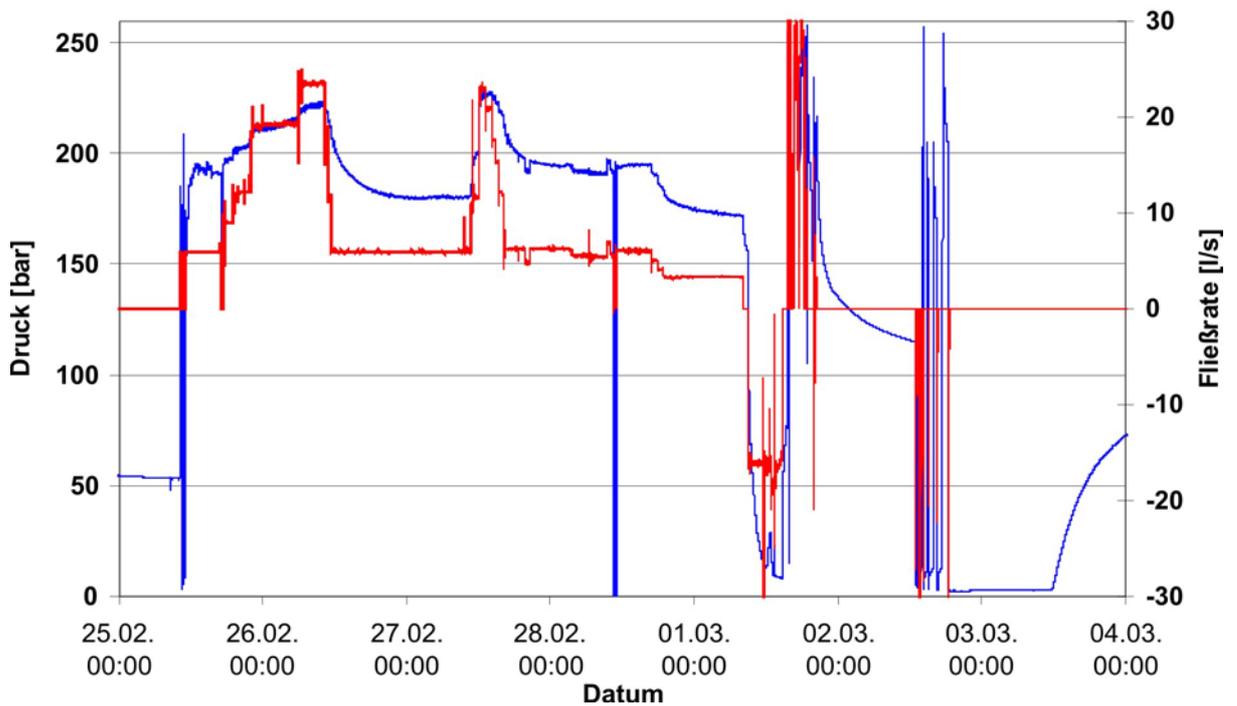


Bild 4.1.2: Zeitlicher Ablauf der letzten Phase des Open hole-Wasserfracs in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90. Dargestellt sind Bohrlochkopfdruck (blau) und Fließrate (rot). Die rapiden Druckanstiege ab 01.03.2003 haben ihre Ursache in der Blockierung des Bohrlochs.

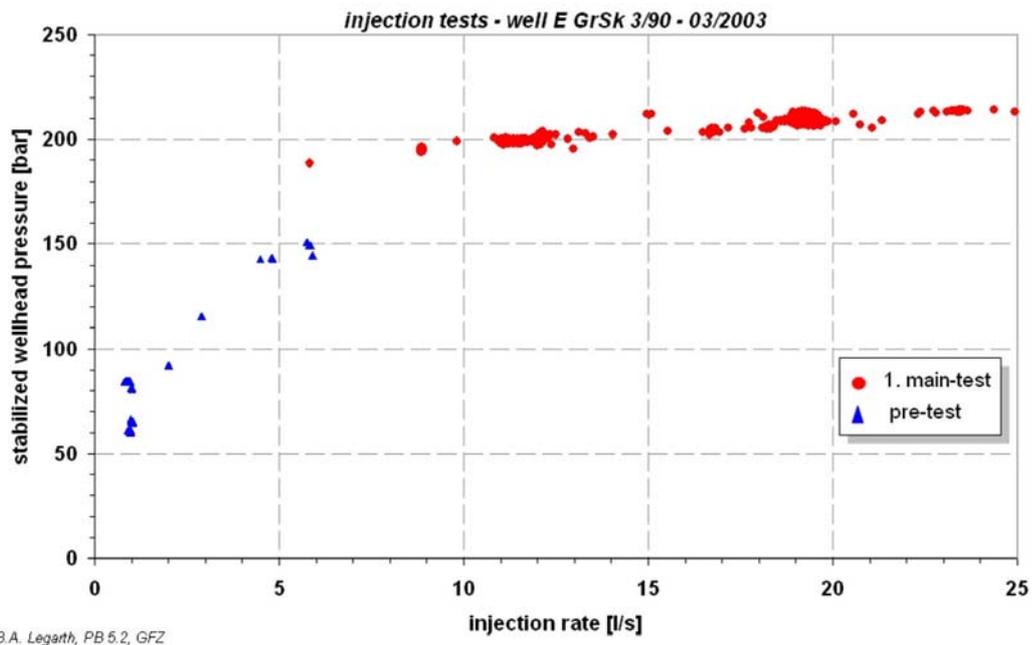


Bild 4.1.3: Druck-Injektionsraten-Diagramm der Stimulationen von Januar bis März 2003 in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 (offener Bohrlochabschnitt 3874 bis 4291 m). Erkennbar ist die flachere Steigung ab etwa 8 l/s.

Auswertung der Pumpexperimente mit der *Multirate-Superposition-Plot-Technique*

Mit der bereits beschriebenen Multirate-Superposition-Plot-Technique (MSPT, siehe Kap. 3.1) wurden auch die Stimulationstests vom Februar 2003 ausgewertet.

Zur Stimulation der Vulkanite sind in Februar und März 2003 die so genannten *Waterfracs* durchgeführt worden. Da beim *Fracen* zusätzlich zur Porenstruktur neue Fließwege entlang von Klüften erzeugt bzw. bestehende Rissysteme wieder geöffnet werden, ist die Annahme radialer Anströmung nur bedingt zulässig für diese Tests. Trotz dieser Einschränkung erscheint ein sich öffnender bzw. schließender Riss als deutliche Änderung der Transmissibilität und des Skins.

Tabelle 4.1.1: Parameter zur Auswertung der in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 durchgeführten Pumptests.

	Variable	Größe
μ	Viskosität	$4 \cdot 10^{-4} \text{ Pa s}$
c	Isothermale Kompressibilität	$5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$
ϕ	Mittlere Porosität der Reservoirgesteine	0.05
r_w	Bohrlochradius	0.075 m
h	Reservoirmächtigkeit	100 m

Aus der Testserie wird „Test d“ (siehe Bild 4.1.1) ausgewählt, da dieser sowohl moderate Injektionsraten von bis zu 6 l/s als auch ausreichend lange Injektionszeiten aufweist. Die für die Bestimmung von Transmissibilität und Skin notwendigen Größen μ , c , ϕ , r_w und h sind in Tab. 4.1.1 angegeben.

Aus der Testserie wird „Test d“ (siehe Bild 4.1.1) ausgewählt, da dieser sowohl moderate Injektionsraten von bis zu 6 l/s als auch ausreichend lange Injektionszeiten aufweist. Die für die Bestimmung von Transmissibilität und Skin notwendigen Größen μ , c , ϕ , r_w und h sind in Tab. 4.1.1 angegeben.

Einzelne Fließratenabschnitte mit hinreichender Injektionsdauer wurden aus Test D für eine Auswertung mit der MSPT ausgewählt, um die Druckabhängigkeit der Transmissibilität und des Skins abzuschätzen (Bild 4.1.4). Für jeden Fließratenabschnitt wurde der mittlere Druck bestimmt, in den Porendruck (p_p) umgerechnet und der effektive Druck (p_{eff}) als Differenz aus Auflastdruck und Porendruck daraus ermittelt (*Gesetz von Terzaghi*; Terzaghi, 1923). Die Transmissibilität ist in „mDm“ angegeben, 1 mDm entspricht 10^{-15} m^3 .

Die Transmissibilität zeigt mit wachsendem Porendruck (d. h. mit fallendem effektivem Druck) zuerst eine langsame Zunahme, die in einen rapiden Anstieg bei hohem

Porendruck übergeht. Der Skin hingegen verhält sich gegenläufig. Zuerst verändert sich der Skin rapide von positiven zu negativen Werten, um dann in einen nahezu konstanten Wert überzugehen.

Das Verhalten beider Parameter ist durch den gleichen Effekt erklärbar. Mit wachsendem Porendruck öffnen sich zuerst Risse im bohrlochnahen Bereich, so dass die Reservoiranbindung besser wird und der Skin sich verkleinert. Die Reservoirpermeabilität hingegen ändert sich kaum. Bei hohen Drücken hingegen ist eine deutliche Vergrößerung der Reservoirpermeabilität durch das Öffnen zusätzlicher Fließwege zu verzeichnen. Der Skin bleibt konstant, da das Reservoir bereits gut an die Bohrung angebunden ist.

Für den Skin wird aus den moderaten Langzeit-Pumptests (Kap. 3.1) ein deutlich kleinerer Wert (um -6) als aus dem Stufentest (um -1) bestimmt. In jedem Fall spiegelt sich im negativen Skin eine gute Anbindung des Reservoirs an die Bohrung wider, hervorgerufen durch Rissstrukturen. Allerdings sind die beiden Test so unterschiedlich konzipiert, dass ein direkter Vergleich der Ergebnisse nicht möglich ist.

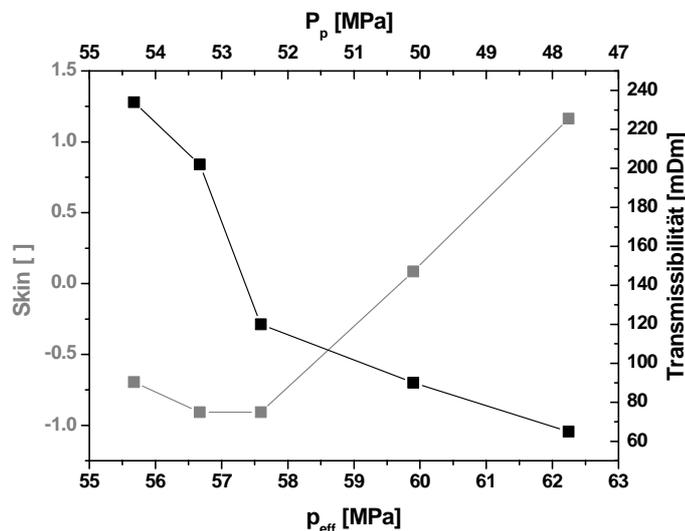


Bild 4.1.4: Abhängigkeit der Transmissibilität und des Skins vom effektiven Druck.

Mit der *MSPT* besteht die Möglichkeit, die Druckabhängigkeit der Transmissibilität und Veränderungen des Skins zu bestimmen. Voraussetzung für eine zuverlässige Bestimmung dieser Größen sind Stufentests mit hinreichend langen Injektionsphasen. Für zukünftige Projekte lässt sich aus der deutlichen Druckabhängigkeit des Reservoirs Groß Schönebeck 3/90 ableiten, dass diese Abhängigkeit einerseits mit hoher Genauigkeit ermittelt werden und andererseits in zukünftige Berechnungen und Modellierungen einfließen sollte.

4.2 Bohrlochstabilität

Mit dem ersten Wasserfrac im offenen Bohrlochabschnitt von 3874 bis 4291 m konnte eine Steigerung der Produktivität mindestens um einen Faktor 3 bis 4 gegenüber der Ausgangssituation nach der Bohrungsaufwältigung erreicht werden. Dieser Erfolg war jedoch nicht anhaltend, da die hydraulischen Wechselbelastungen der Ton- und Sandsteine zu Nachfall aus der Bohrlochwand und schließlich zum Verstopfen des Bohrlochs in einer Tiefe von 3901,5 m führten. Die Experimente wurden unterbrochen und ein Konzept zur Aufwältigung, Räumung und Sicherung der Bohrung erstellt. Die Weiterführung der massiven Stimulationen und die geplante Nachnutzung sollten nur in einer gesicherten Bohrung durchgeführt werden.

4.3 Operativer Ablauf der Sicherungsarbeiten

mit Beiträgen von B. Legarth, A. Saadat, P. Seibt und W. Brandt

Zur Beseitigung der Verstopfungen und Bohrlochinstabilitäten (Nachfall und Ausbrüche aus der Bohrlochwand), die als Folge der Test- und Stimulationsarbeiten im März 2003 aufgetreten sind, wurde im November 2003 die Bohrung Groß Schönebeck 3/90 erneut aufgewältigt. Ein Liner wurde als Sicherungsmaßnahme in den offenen Bohrlochbereich installiert. Nach einer Ausschreibung wurde die Firma Erdgas Erdöl Workover, Salzwedel, als Generalauftragnehmer mit den Arbeiten beauftragt. Schlumberger, Vechta, wurden die hydraulischen Arbeiten und Bohrlochmessungen übertragen.

Bei der Aufwältigung kam es zu einer kurzzeitigen Festwerdehavarie. Der Festpunkt wurde in der Tiefe des 7" Liner-Hangers bestimmt (2350 m). Mit Be- und Entlastungsmanövern des Hebwerks konnte der Strang befreit werden. Anschließend wurde die Bohrung zunächst bis 4293,5 m aufgewältigt.

Die bereits installierten Rohrtouren im Bohrlochbereich zwischen 1600 und 1800 m (Rötsalzbereich) und 2200 und 2400 m (7" Linerkopf) wurden mit einer Multifinger-Kalibermessung kontrolliert. Die Inspektion zeigte intakte Rohre (siehe Kap. 5.2). Nun konnte die Bohrung bis 4309,1 m vertieft werden.

Daran anschließend wurde ein Bohrlochmessprogramm im offenen Bohrlochabschnitt von 3874 bis 4309 m gefahren. Dieses diente der Lokalisierung und Quantifizierung von Klüften sowie der Lithologiebestimmung. Es wurden insgesamt drei Einfahrten vorgenommen: ALAT-CAL-GR, FMI-HNGS und RST.

Während der Fahrt des Formation-Micro-Imagers (FMI) trat eine Havarie auf. Die Messsonde wurde in 4107 m fest. Bei den Zugversuchen riss eines der vier Sensorpads ab und verblieb im Bohrloch. Deshalb fehlen die Daten ab dieser Teufe bis zum Rohrschuh (3874 m). Die darauf folgende Reservoir-Saturation-Tool-Messung (RST) konnte problemlos gefahren werden.

Nach Abschluss des Open hole-Bohrlochmessprogramms begann der Einbau eines 5" Liners. Der Liner wurde als kombinierte Rohrtour ausgelegt. Die unteren 175 m wurden vorperforiert, um in diesem Bereich den hydraulischen Kontakt zur Formation beizubehalten. Zwischen Vollrohr und perforiertem Rohrabschnitt wurde ein Über-

gangsstück mit Außenmanschette (CUP-Packer) montiert, um den Ringraumquerschnitt an dieser Stelle zu verringern (Teufe 4134 m). Damit soll Nachfall aus dem oberen Bohrlochbereich verhindert werden. Ursprünglich war vorgesehen, den Liner oberhalb des gelochten Abschnitts von 4135 m bis zum 7" Linerfuß in 3874 m zu zementieren. Aufgrund von technischen Risiken, insbesondere der möglichen Speicherschädigung, wurde darauf verzichtet. Der hydraulisch zugängliche Bohrlochabschnitt reicht von 4135 bis in 4309 m Tiefe. (siehe Anhang 1). Das Bohrlochvolumen beträgt nach dem Ausbau etwa 124 m³.



Bild 4.3.1: Gelochter Liner, eingesetzt im Teufenbereich 4135 - 4305 m.

Die Sicherung der Bohrung durch Einbau des 5 Zoll Liners erfolgte ohne Zwischenfälle. Daraufhin konnte das im Januar 2003 begonnene Stimulationsprogramm mit der Stufeninjektion von aufbereitetem Oberflächenwasser fortgesetzt werden.

Für die 9 5/8" Rohrtour besteht eine obere Druckgrenze von 20 MPa. Während der Stimulationsarbeiten wurde daher ein 5" x 3 1/2" Schutzstrang eingebaut und der Ringraum mit einem Schutzdruck von max. 20 MPa beaufschlagt. Damit können nun Verpressdrücke bis 50 MPa angewendet werden.

Tabelle 4.3.1: Zeitlicher Ablauf der Aufwältigungs-, Sicherungs- und Stimulationsarbeiten in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 im Herbst 2003.**Aufwältigung und Sicherung der Bohrung Groß Schönebeck 3/90
Zeitlicher Überblick der durchgeführten Arbeiten**

	16.10. – 20.10.03
Antransport und Aufbau der Anlage	
Entlasten der Bohrung	20.10.03
Demontage Sondenkreuz	20.10.03
Aufbau Bohrlochsicherung	20.10.03
Einbau Gestänge 5“ x 3 ½“	21.10.03
Aufwältigen Bohrloch bis Endteufe	22.10. – 02.11.03
Festwerdehavarie während Aufwältigung	23.10. – 25.10.03
Verrohrungsinspektion	28.10.03
Vertiefen der Bohrung	02.11.03
Totpumpen der Bohrung mit Salzwasser	03.11.03
Bohrlochmessprogramm	03.11. - 05.11.03
Einbau 5“ Liner	05.11. - 06.11.03
Kaliberfahrt mit Rohrkaliber 7“ vor Einbau des Schutzstrangs	07.11. - 10.11.03
Einbau Schutzstrang mit Behandlungspacker 7“	10.11.03
Montage Sondenkopf zum Auslauffest	11.11.03
Testbeginn	12.11.03
Stufentest	26.11.03
Messdrahthavarie	29.11.03
Kontrollfahrten nach Kabelabriss mit Wireline-Technik	29.11. – 30.11.03
Auslauffest Fa. Schlumberger	30.11. – 01.12.03
Druckaufbaumessung und Auslauffest	01.12. – 04.12.03
Spülbearbeitung und Totpumpen	04.12. – 05.12.03
Fangarbeiten mit Wireline-Technik	06.12. – 08.12.03
Fangarbeiten mit Workoveranlage und Gestänge	09.12. – 19.12.03
Weiterführung Rückförderung	19.12. – 21.12.03
Swab-Arbeiten mit Wireline-Technik	20.12.03
Abbau und Abtransport der Anlage	22.12.03 – 9.01.04

4.4 2. Wasserfrac im gesicherten Bohrloch

mit Beiträgen von B. Legarth und G. Zimmermann

Für die Injektionsexperimente wurde zur Überwachung des Bohrlochsohlendruckes eine Druck- und Temperaturmesssonde in 4130 m Tiefe installiert. Es handelte sich dabei um eine Online-Messung, bei der die Sonde an einem Messkabel montiert und im Bohrlochkopf abgehängt wurde.

Gegenüber der Stimulation im Februar 2003 wurde die Aufbereitung des Injektionswassers modifiziert. Anstelle von Salzsäure wurde Essigsäure zum Einstellen des pH-Wertes verwendet. Gegenüber dem ersten Wasserfrac wurde der pH-Wert auf 5 angehoben (vorher 3). Damit werden die Eisenionen im Wasser in Komplexe überführt, die in Lösung bleiben, während gleichzeitig der Angriff auf den Stahl der Verrohrung reduziert wird. Auf Sauerstoff- und Korrosionsinhibitor wurde verzichtet. Wie beim Februartest wurde kein Salz zugegeben.

Zunächst wurde ein **Stufentest** bis zu einer maximalen Rate von 30 l/s durchgeführt, der anschließend in einen Test des **Gleichgewichtszustandes** überging (Bilder 4.4.1 und 4.4.3). Danach wurde die Bohrung kurzzeitig eingeschlossen. Auf diese Weise konnten hydraulische und mechanische Parameter des Gebirges bestimmt werden, die zur Echtzeit-Modellierung der folgenden **Hauptstimulationsphase** dienen. Diese begann noch am selben Tag und wurde zunächst auf eine Rate von 30 l/s eingestellt. Nach der Injektion von über 7100 m³ aufbereitetem Süßwasser wurde die Rate planmäßig auf 80 l/s gesteigert.

Der Stufentest

Im Vorfeld der eigentlichen massiven Stimulation wurde ein Stufeninjektionstest durchgeführt. Dieser hatte folgende Ziele:

- Bestimmung der Matrixinjektivität,
- Bestimmung der gebirgsmechanischen Parameter:
Rissaufbrechdruck, Rissfortleitungsdruck und Riss-schließdruck.

Der Stufentest wurde mit einem anschließenden Equilibriumtest kombiniert, der eine genauere Bestimmung des Riss-schließdruckes und der hydraulischen Eigenschaften des Risses ermöglicht. Die folgenden Abbildungen stellen den Behandlungsverlauf und die Auswertung dar.

Bild 4.4.1 zeigt den Druckverlauf während der kontinuierlichen Steigerung der Injektionsrate auf 30 l/s. Aus diesem Druckaufbauverhalten lässt sich der Übergang zwischen hydraulischem und mechanischem Gebirgsverhalten sowie der Rissfortleitungsdruck durch das Auftragen des Druckes über der Fließrate bestimmen.

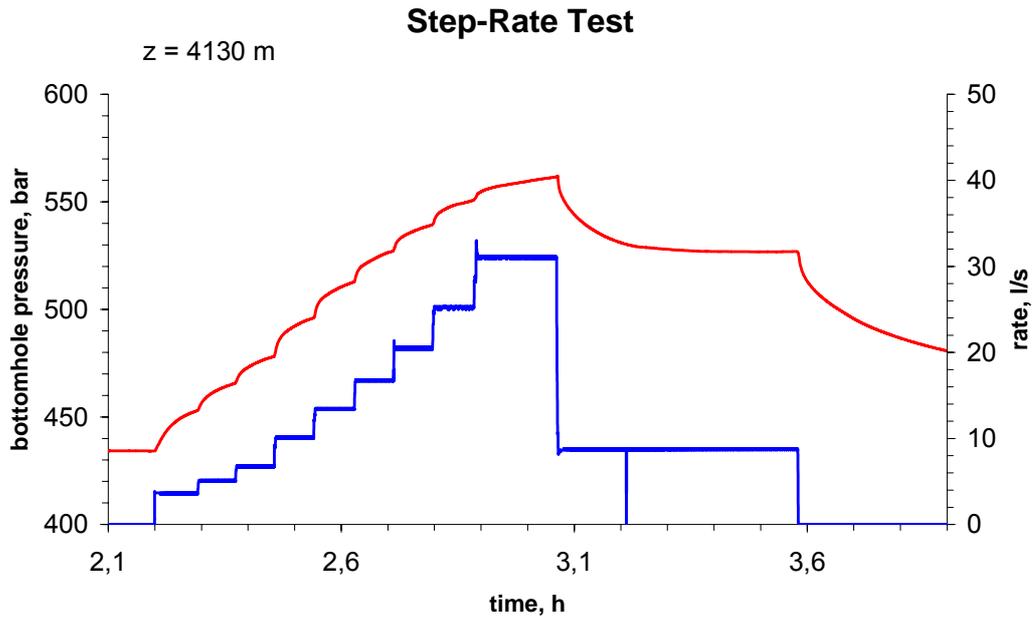


Bild 4.4.1: Zeitlicher Verlauf von Druck (Messung in 4130 m Tiefe, rote Kurve) und Fließrate (blaue Kurve) während des Stufentests in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 am 26.11.2003. Testbeginn um 10:56 Uhr.

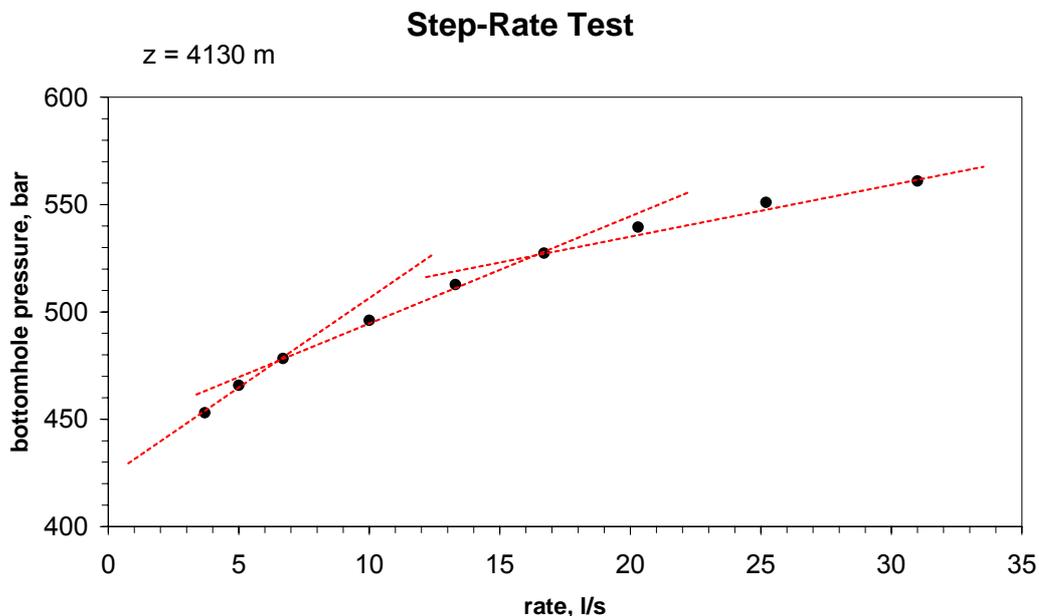


Bild 4.4.2: Druck (Messung in 4130 m Tiefe) aufgetragen gegen Fließrate während des Stufentests in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 am 26.11.2003.

Es zeigt sich, dass das Gebirge bis zu einer Injektionsrate von ca. 7 l/s hydraulisch reagiert (erste Steigung in Bild 4.4.2). Das korrespondierende Druckniveau wird als Grenze zwischen hydraulischem und mechanischem Gebirgsverhalten interpretiert. Bei einer Erhöhung der Injektionsrate, und damit des Behandlungsdruckes, kommt es zu einem Abflachen der Steigung. Die Injektivität steigt sprunghaft an. Die Zunahme der Injektivität ist mit einer Rissöffnung zu erklären. Bei einer weiteren Erhöhung der Injektionsraten kommt es zu einer erneuten Abflachung der Steigung. Es tritt ein weiterer sprunghafter Anstieg der Injektivität auf. Eine Rückwärtsextrapolation der dritten Geraden auf die y-Achse wird als Richtwert für die Obergrenze des Riss-schließdruckes angesehen (ca. 50 MPa). Der Schnittpunkt der zweiten und dritten Geraden gilt als Richtwert für den Rissfortleitungsdruck.

Der mehrfache Steigungswechsel ist mit der Mächtigkeit und der Heterogenität des behandelten Intervalls zu erklären. Es herrschen in dieser Zone erhebliche Unterschiede in den Permeabilitätseigenschaften und Spannungsbedingungen der einzelnen Zonen. Diese These wird durch das nachweisliche Vorhandensein natürlicher Klüfte, sowie die erfolgte Re-Stimulation vorher geschaffener Rissysteme unterstützt.

Bestimmung des Gleichgewichtszustandes und des Riss-schließdruckes

Nachfolgend ist der Equilibrium-Test dargestellt. Der Equilibrium-Test ist ein Injektionstest ähnlich einer konventionellen Druckabfallanalyse nach der Injektion. Anstatt jedoch den Druckabfall während des Einschlusses des Bohrlochs (shut-in) alleine hinsichtlich des Riss-schließdruckes auszuwerten, wird hierbei das Fluid bei einer geringen Rate weiter in das Gebirge und den vorher durch den Stufen- oder Break-down-Test geschaffenen Riss injiziert.

Der Behandlungsdruck fällt am Anfang wie bei einem gewöhnlichen shut-in Test ab, da die geringe Equilibrium-Rate q , hier 7 l/s, wesentlich kleiner als die vorher wirksame Rate Q , hier 30 l/s, ist. Idealerweise sollte q kleiner als die Leakoff Rate q_L zu dem Zeitpunkt sein, wenn q auf Q abfällt. Aus diesem Grund verringert sich der Druck im Riss. Dies hat eine Verringerung des Rissvolumens zur Folge, da mehr Fluid aus dem Riss abfließt als injiziert wird. Zu einem Zeitpunkt, an dem das Rissvolumen bereits deutlich reduziert ist (vorwiegend durch die Abnahme der Rissweite verursacht), beginnt sich auch die Risslänge zu verringern. Gleichzeitig verringert sich auch die Leakoff Rate so weit, bis q_L und q identisch sind. Zu diesem Zeitpunkt stoppt die Abnahme des Rissvolumens und der Behandlungsdruck erreicht einen stabilen Wert (Equilibrium). Da bei fortlaufender Injektion q_L jedoch weiter abfällt, fängt der Behandlungsdruck nach einer kurzen Zeit wieder an langsam zu steigen. Der minimale Druck, der vor dem erneuten Druckanstieg erreicht wird, wird als Equilibrium-Druck bezeichnet. Der Test sollte idealerweise solange andauern, bis dieser leichte Anstieg des Druckes beobachtet wird. Anschließend kann die Bohrung eingeschlossen werden. Das Konzept des Equilibriumtests stammt von Weng et al. (2002) und ist in Bild 4.4.3 dargestellt.

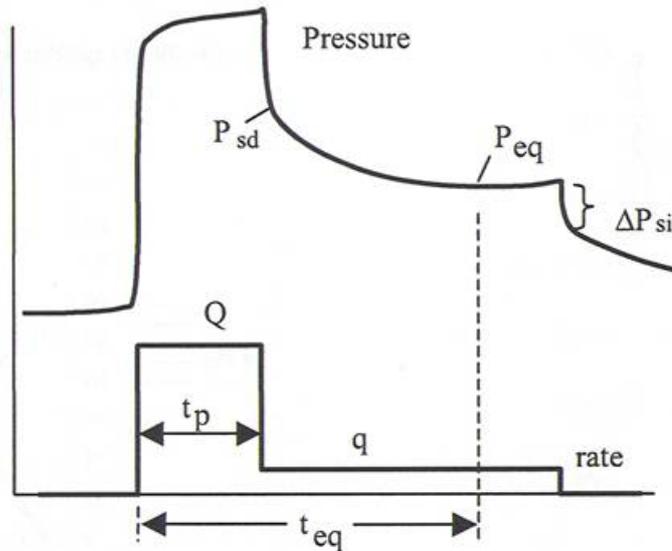


Bild 4.4.3: Zeitlicher Ablauf eines Equilibriumtests nach Weng et al. (2002). Aufgetragen sind Druck- und Fließratenverlauf mit der Zeit. Zu Beginn erfolgt eine Injektionsphase bei hoher Rate Q zur Rissinitiation und -fortleitung. Nach einer Zeit t_p wird die Injektionsrate schlagartig auf das Niveau q verringert, der Behandlungsdruck fällt initial auf das Niveau von P_{sd} und nach einer Zeit t_{eq} stellt sich der Gleichdruck P_{eq} ein. Sobald ein geringer Anstieg des Druckes registriert wird, wird die Bohrung eingeschlossen und der folgende Druckabfall aufgezeichnet. Beim finalen Einschluss der Bohrung erfolgt auf Grund geringer residualer Rissöffnungsweiten ein geringer Druckabfall um den Betrag von ΔP_{si} .

Der wesentliche Unterschied des beschriebenen Tests zu einer konventionellen shut-in Auswertung ist, dass während der gesamten Injektionsphase der Behandlungsdruck oberhalb des Riss-schließdrucks verbleibt. Die Rissweiten sind am Ende des Tests bereits sehr gering. Der initiale Druckabfall beim finalen shut-in steht für den Rest an Reibung und Tortuosität, der vom Gleichdruck subtrahiert werden muss. Der resultierende Druck unterscheidet sich vom eigentlichen Riss-schließdruck dann nur noch um den verbleibenden Nettorissdruck (Druck im zentralen Bereich des Risses während seiner Fortleitung/Offenhaltung). Dieser ist jedoch auf Grund des vorher erfolgten sukzessiven Druckabbaus bereits auf ein minimales Niveau abgesenkt worden. Auf diese Weise kann der Riss-schließdruck wesentlich genauer bestimmt werden als es mit konventionellen Methoden - auf Grund des hohen residualen Nettorissdruckes nach dem shut-in - möglich wäre.

Das Niveau von q sollte sich dabei an dem Niveau orientieren, welches vorher während des Stufentests als Übergang zwischen hydraulischem und mechanischem Gebirgsverhalten diagnostiziert wurde (q sollte leicht oberhalb des Matrixabflusses liegen). Wird q zu hoch oder zu niedrig eingestellt, wird kein Gleichdruck erreicht, da der Riss entweder zu schnell oder gar nicht schließt.

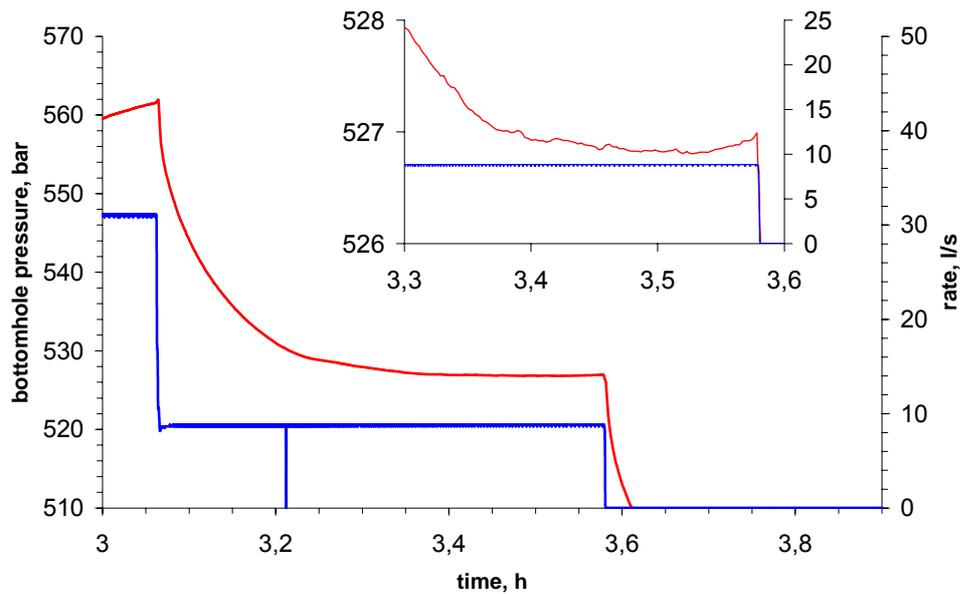


Bild 4.4.4: Zeitlicher Verlauf von Druck (Messung in 4130 m Tiefe, rote Kurve) und Fließrate (blaue Kurve) während des Experiments zur Ermittlung des hydraulischen Gleichgewichtszustandes, Bohrung Groß Schönebeck am 26.11.2003.

Bild 4.4.4 zeigt einen optimalen Verlauf des Equilibrium-Tests. Der Equilibrium-Druck stellte sich auf ein Niveau von exakt 52,68 MPa ein. Aus dem anschließenden Druckabfall wurde der Risschließdruck p_c mit 49,8 MPa bestimmt (Bild 4.4.5). Hieraus ergibt sich ein Gradient von $dp_c/dz = 12,06$ MPa/km. Dieser stimmt gut mit den Werten aus dem vorangegangenen Stufentest überein. Es zeigt sich, dass nur geringe Reibungsdruckverluste (Tortuosität) im bohrlochnahen Bereich wirksam waren. Es ergibt sich ein Wert von ca. 0,45 MPa. Für den Nettorissdruck auf Equilibrium-Niveau ergibt sich ein Wert von ca. 2,8 MPa.

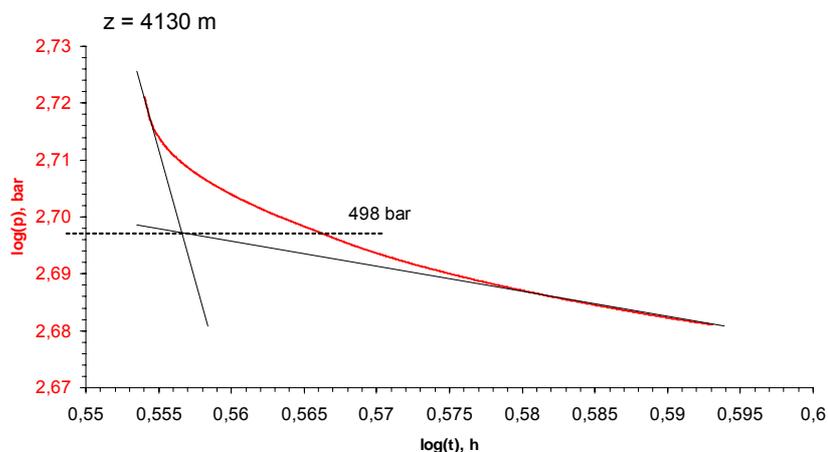


Bild 4.4.5: Bestimmung des Risschließdrucks aus der Druckabfallkurve (Messung in 4130 m Tiefe) nach Ende des Gleichgewichtstests.. Doppeltlogarithmische Auftragung von Druck und Zeit.

Eine deutlichere Signatur des Risschließdrucks ist beim Auftragen des zeitlichen Verlaufs der ersten Ableitung des Druckes nach der Tiefe zu erkennen (Bild 4.4.6). Es ergibt sich auch hierbei ein Wert für p_c von ca. 498 bar in 4130 m Teufe.

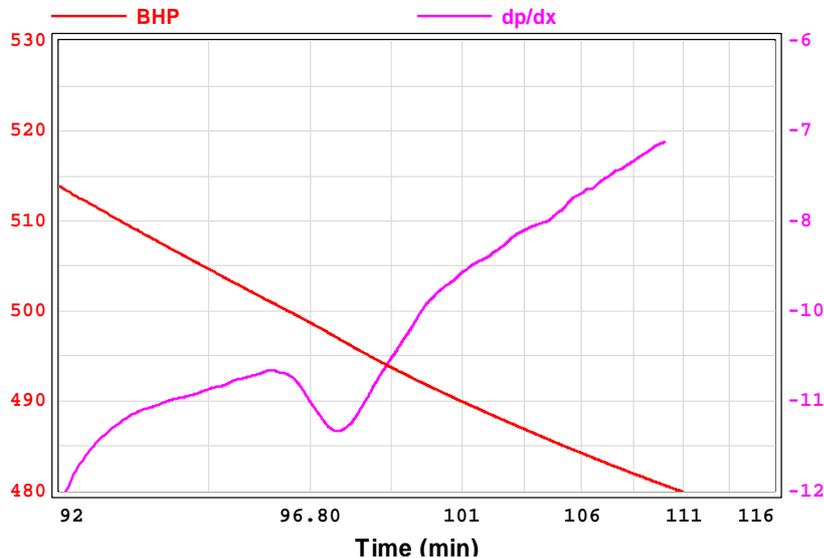


Bild 4.4.6: Zeitlicher Verlauf des Druckes (BHP) und seiner ersten Ableitung nach der Tiefe.

Die vorgestellten Verfahren stellen Standardprozeduren für die hydraulisch-mechanische Charakterisierung des Gebirges dar. Je genauer der Übergang zwischen hydraulischem und mechanischem Gebirgsverhalten bestimmt werden kann, desto exakter kann eine nachfolgende Behandlung ausgelegt werden. Ohne die Daten ist eine plausible Modellierung der dynamischen Rissausbreitung im Gebirge nicht möglich.

Hauptstimulation

Die Bilder 4.4.7 und 4.4.8 zeigen den Ablauf der Stimulationsbehandlungen im November/Dezember 2003. Zunächst wurde die Injektionsrate auf 30 l/s (entsprechen 1,8 m³/min) eingestellt. Nach 24 Stunden wurde diese variiert: 40 l/s über 6 h, 20 l/s über 6 h, 30 l über 25 h und 25 l/s über 10 h. Beim Hochfahren auf eine Injektionsrate von 80 l/s riss der Messdraht der untertägigen Drucksonde ab. Die Injektionsrate musste am Drucklimit von 50 MPa geführt auf 60 l/s reduziert werden. Innerhalb etwa 1 Stunde wurde der Injektionstest durch schrittweise Reduktion der Fließrate beendet. Insgesamt wurden 7223 m³ Fluid (Haupttest) bzw. 7291 m³ Fluid (Haupttest inklusive Stufentest) verpresst. Noch bevor Fangversuche eingeleitet wurden, konnte ein Produktionstest durchgeführt werden. Damit konnten Daten zur Produktivitätsentwicklung gewonnen werden.

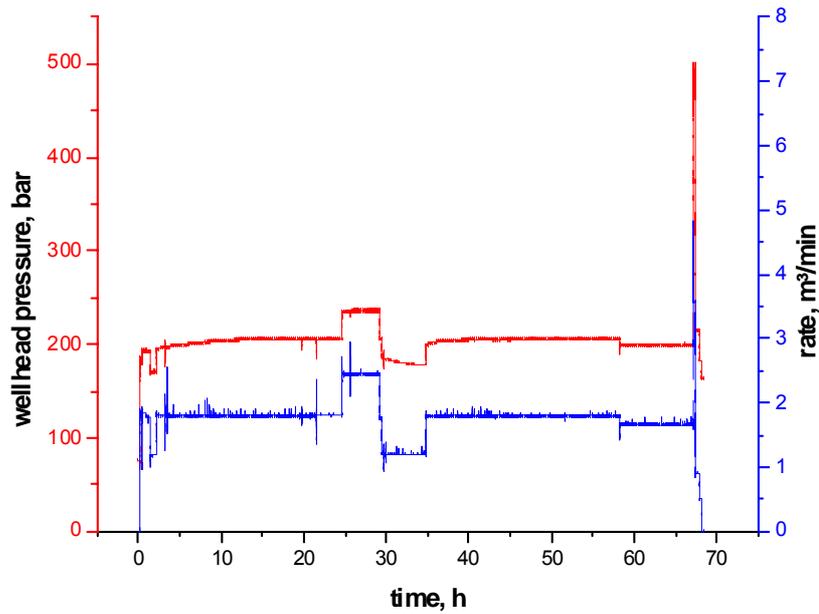


Bild 4.4.7: Zeitlicher Verlauf der Hauptstimulation. Bohrlochkopfdruck (rote Kurve) und Injektionsrate (blaue Kurve). Start: 26.11.2003. Nach etwa 67 Stunden riss der Messdraht der untertägigen Drucksonde, während die Injektionsrate von 30 l/s auf 80 l/s gesteigert wurde. Zu diesem Zeitpunkt waren etwa 7100 m³ Fluid verpresst.

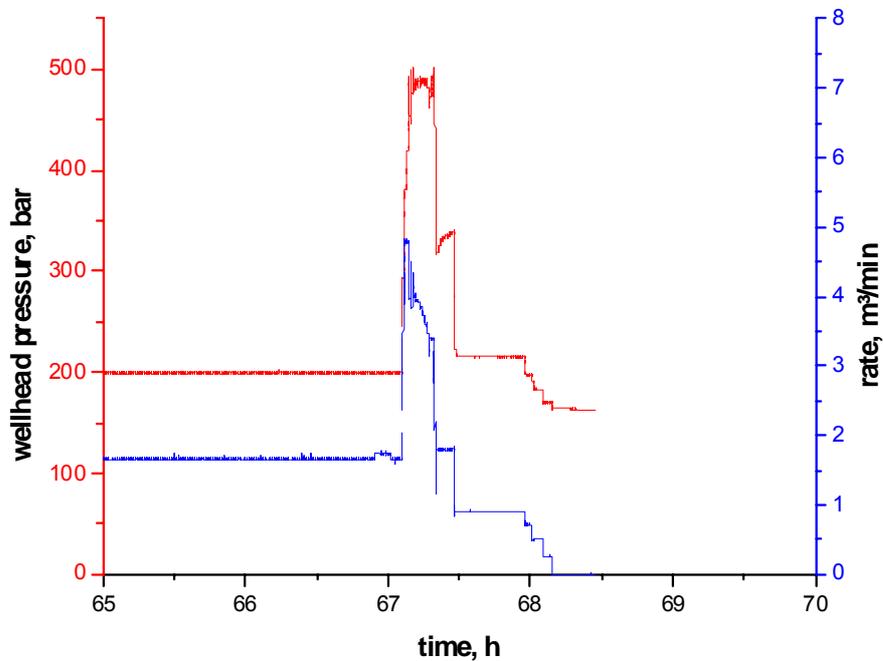


Bild 4.4.8: Zeitlicher Verlauf der Hauptstimulation. Ausschnitt während der Messdrahthavarie. Bohrlochkopfdruck (rote Kurve) und Injektionsrate (blaue Kurve).

4.5 Modellierung der Rissbildung während der Stimulation (Hauptphase)

mit Beiträgen von B. Legarth

Zur 3D-Modellierung wurde ein kommerzielles Riss-simulationsprogramm (FIELDPRO FRACPRO™, Fa. RES) verwendet. Die Rissdimensionen, -geometrie, -anzahl und Rissinitiierungsteufen sind stark abhängig von den jeweiligen mechanisch-physikalischen Eigenschaften der Gebirgsbereiche, in denen sich der Riss ausbreitet. Ebenso relevant sind die variablen Behandlungsparameter: Fließrate, Fluid- und Stützmittelmengen, Fluidrheologie und Stützmittelkonzentration. Bild 4.5.1 stellt daher ein idealisiertes Rissabbild dar.

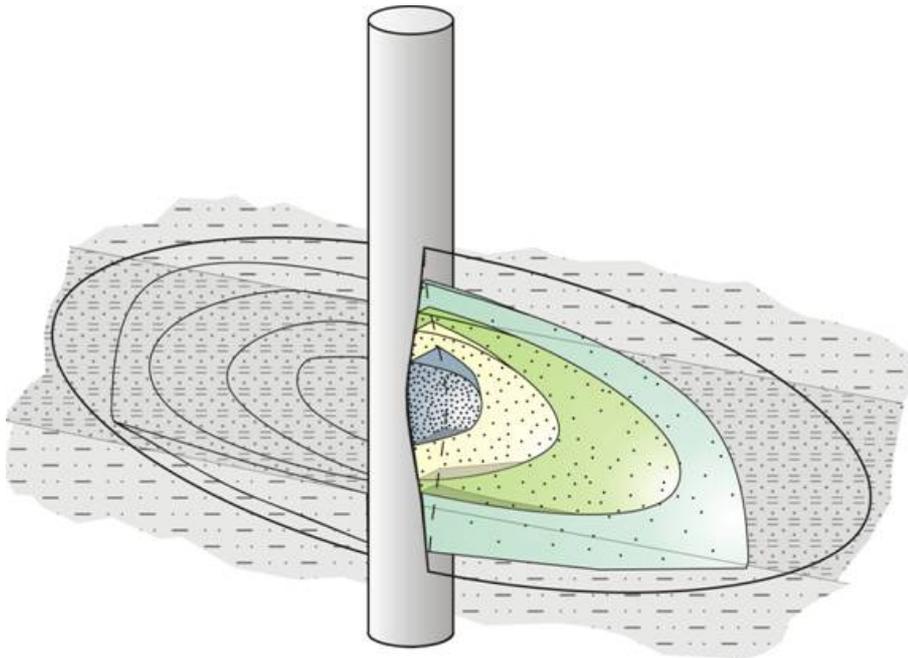
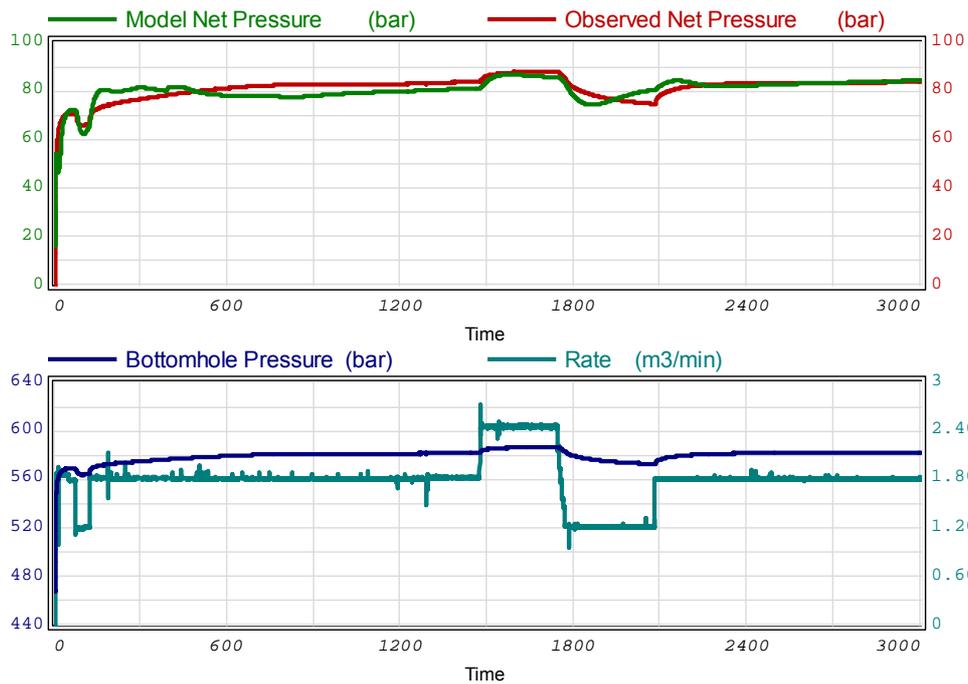


Bild 4.5.1: Dreidimensionales Rissmodell (aus Legarth, 2003; nach Crockett et al., 1986).

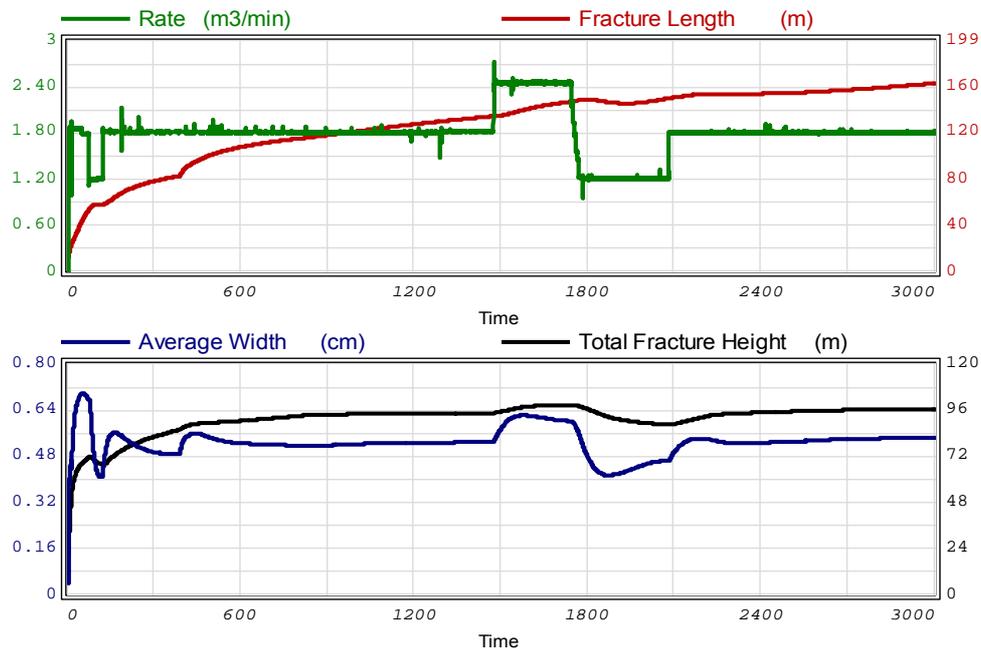
Für die Modellierung wurden allein die Bohrlochsohlendruckdaten der Hauptphase der Stimulationsbehandlung verwendet. Die Aufzeichnungen endeten durch die Kabelhavarie bei Erreichen einer Injektionsrate von 80 l/s und dem dadurch bedingten Verlust der Messsonde.

Aus den aufgezeichneten Druckdaten und Fließraten wurde mit Hilfe des 3D-Riss-simulators ein Rissausbreitungsmodell gerechnet. Hierzu wurden ebenfalls detaillierte Daten der hydraulischen und mechanischen Parameter des Gebirges berücksichtigt.

Bild 4.5.2 zeigt einen Vergleich zwischen den gemessenen und modellierten Druckkurven (Pressure Match) in den beiden oberen Graphiken. Eine gute Anpassung, wie sie hier zu sehen ist, stellt eine plausible Lösung des Modells für die Rissausbreitung und die daraus resultierenden Rissdimensionen (Fracture Dimensions) dar, die in den beiden unteren Graphiken gezeigt werden.



September 29, 2004



September 29, 2004

Bild 4.5.2: 2. massiver Wasserfrac. Zeitlicher Verlauf von Mess- und Modelldaten für ein Fracmodell. Zeitachse in Minuten, Startzeitpunkt der Graphik: 26.11.2003, 12:54 Uhr. Graphik 1 (oben): Bohrlochkopfdruck (gemessen und modelliert). Graphik 2: Bohrlochsohlendruck und Fließrate (gemessen). Graphik 3: gemessene Fließrate und modellierte Fraclänge. Graphik 4 (unten): Mittlere Frachöhe, Mittlere Fracweite.

Es lässt sich erkennen, dass mit den Stimulationsbehandlungen Risse mit einer vertikalen Höhe von ca. 100 m, einer durchschnittlichen Öffnungsweite von ca. 5 mm und einer lateralen Ausdehnung von ca. 160 m (einseitig) erzeugt wurden. Die genannten Dimensionen beziehen sich auf das Ende der Stimulationsbehandlung, als die max. Rissausdehnung erreicht wurde. Während des nachfolgenden Produktionstestes kam es zu einer erneuten Risschließung.

Bild 4.5.3 zeigt das aus den oben gezeigten Druckkurven abgeleitete vertikale Profil des entstandenen Risses. Die mittlere Spalte zeigt den Rissweitenquerschnitt, wie er sich aus der Sicht des Bohrlochs darstellt. Es handelt sich dabei gleichzeitig um die maximale dynamische Rissweite, die sich während der Injektion eingestellt hat.

Bei der Modellierung wurde ebenfalls eine vertikale Bewegung des Risszentrums berücksichtigt. Das Risszentrum steht hierbei für den Mittelpunkt der Risshöhenachse. Die Verschiebung des Mittelpunktes ist abhängig von den Spannungs- und Permeabilitätsbedingungen, die der Riss bei seinem dreidimensionalen Wachstum im Gebirge antrifft. Es zeigt sich, dass der Riss im Liegenden initiiert wurde und bei fortlaufender Behandlungsdauer sich tendenziell nach oben ausgebreitet hat (Bild 4.5.4).

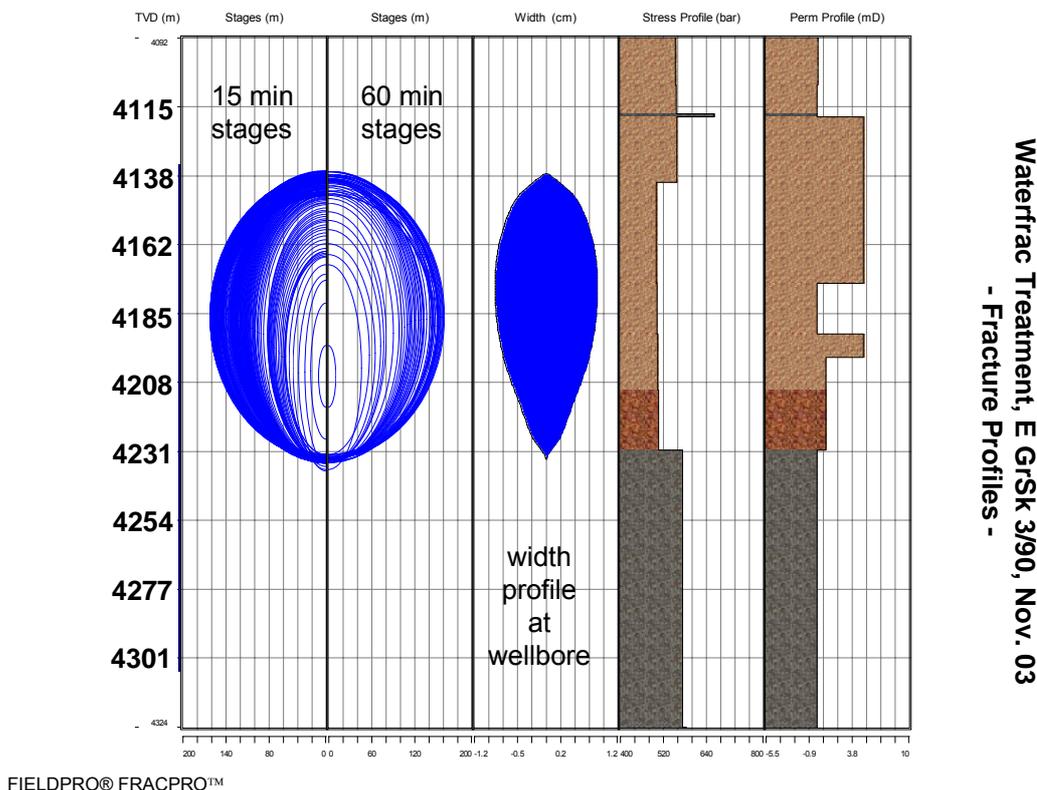
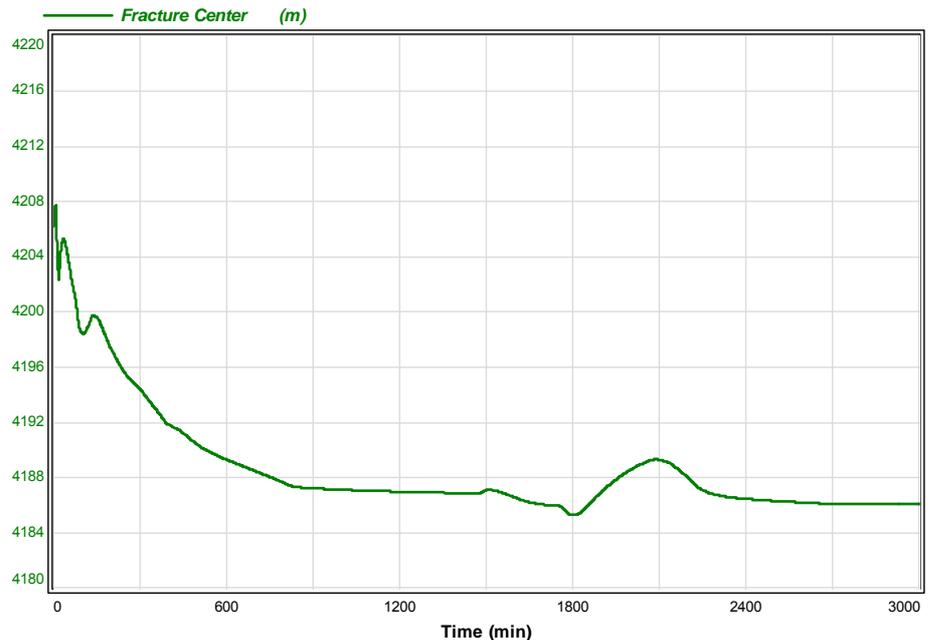


Bild 4.5.3: Modell der Frac-Ausdehnung in zwei Stadien, nach 15 Minuten (links) und nach 60 Minuten (rechts). In der Mitte ist der Rissweitenquerschnitt gezeigt. Die beiden rechten Spalten zeigen die gerechneten mechanischen Spannungen sowie Permeabilitäten.

**Waterfrac Treatment, E GrSk 3/90, Nov. 03
- Modelled Fracture Center Shifting -**



March 08, 2004

FIELDPRO® FRACPRO™

Bild 4.5.4: Tiefenverlauf des Frac-Zentrums aus den modellierten Daten. Ordinate: Tiefe [m]; Abszisse: Zeit [min]. Das Fraczentrum läuft während der Operation nach oben.

Es zeigt sich eine Korrelation zur Injektionsrate in dem Sinne, dass bei dem durchgeführten Ratenwechsel von 30 l/s → 40 l/s (ca. 1500 bis 1750 min.) → 20 l/s (ca. 1800 bis 2100 min.) → 30 l/s es zu einer Mittelpunktsverlagerung gekommen ist. Bei Erhöhung der Rate steigt der Mittelpunkt, da gleichzeitig der Behandlungsdruck ansteigt und somit der Riss Spannungsbarrieren überwinden kann. Die Ausbreitung ins Liegende wird dadurch gebremst, dass allein auf Grund des Spannungsgradienten ein Risswachstum in das Hangende begünstigt wird. Dies gilt, solange keine extremen Spannungskontraste (z. B. hervorgerufen durch zwischengelagerte massive Tonsteinlagen) zwischen zwei angrenzenden Schichten bestehen. Bei Verringerung der Rate fällt das Risszentrum wieder stärker ab und richtet sich tendenziell an den geringsten Spannungsbeträgen im Profil aus (Bild 4.5.3). Eine Rolle spielt dabei auch das Permeabilitätsprofil. Im Falle geringer Raten werden gering permeable Bereiche für eine Rissausbreitung bevorzugt, da hier das Fortleitungsdruckniveau besser gehalten werden kann. In hochpermeablen Bereichen kann der Druck über Diffusionsprozesse entweichen.

4.6 Technische Schwierigkeiten

Während des Projektzeitraums waren wiederholt technische Schwierigkeiten zu bewältigen, die durch unvorhersehbare Ereignisse eintraten.

Durch den Ausfall der Brunnenpumpen bei der Stimulation im Februar 2003 musste die Injektionsrate während der Reparaturzeit reduziert werden, wahrscheinlich mit der Folge, dass Bohrlochrandausbrüche aktiviert wurden. Danach konnte die bereits erzielte Injektionsrate nicht wieder erreicht werden. Die hydraulischen Wechselbelastungen und die sehr unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften von Ton- und Sandsteinen führten zu Nachfall aus der Bohrlochwand und schließlich zur Blockade des Bohrlochs.

Bei der Aufwältigung der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 im November 2003 mit Salzspülung wurde der Strang in 2350 m Tiefe innerhalb der Verrohrung fest. Die Ursache war vermutlich eine Sedimentation von Bohrklein am Kopf des 7" Liners. Mit Be- und Entlastungsmanövern des Hebwerks konnte der Strang befreit werden. Zur Verbesserung des Austragsverhaltens wurde danach die Viskosität der Spülung erhöht.

Bei der Stimulation im November 2003 riss der Messdraht der untertägigen Drucksonde am Bohrlochkopf ab. Dies geschah, während die Injektionsrate von 30 l/s auf 80 l/s gesteigert wurde. Es folgten Fangversuche auf die verlorene Sonde mit Kabel mittels Wireline-Technik. Das gerissene Messkabel konnte jedoch trotz des Einsatzes von Innen- und Außenspeeren nicht komplett geborgen werden und verursachte eine Blockierung des Bohrloches in der Höhe des CUP-Packers (ca. 4134 m). Daraufhin wurden Fräsarbeiten mit der Workoveranlage und Bohrgestänge durchgeführt. Auf diese Weise konnte das Bohrloch bis zu einer Teufe von 4268,7 m freigeräumt werden. Darunter befinden sich Reste des Kabels sowie die Messsonde.

Die Ursache des Abrisses war zunächst nicht klar, da die testierte Reißfestigkeit des Kabels rechnerisch nicht überschritten wurde. Es zeigte sich jedoch an den geborgenen Resten, dass das Kabel vollständig aufgedrillt wurde. Die Reißfestigkeit wird generell bei zweiseitig eingespannten Kabelstücken bestimmt. Im Bohrloch ist jedoch das untere Ende lose und wird dem Fluidstrom ausgesetzt, der wahrscheinlich zum Aufdrillen geführt haben könnte. In diesem Fall könnte bereits das Versagen einer einzelnen Ader zu einer Überlastung der nächsten führen mit der Konsequenz einer Kettenreaktion zum Bruch des ganzen Kabels.

Nach Beendigung der Havariearbeiten erfolgte der Abbau und Abtransport sämtlicher Ausrüstungen vom Bohrplatz. Die Bohrung ist nunmehr mit einem E-Kreuz versehen und es erfolgt eine Überwachung des Kopfdruckes.

5 Produktionstest nach dem 2. massiven Wasserfrac

5.1 Durchführung der Produktionstests

mit Beiträgen von G. Zimmermann

Nach den massiven Stimulationsarbeiten im Februar/März 2003 wurde in einem anschließenden Produktions-Test (flow-back test) untersucht, ob die Injektivitätssteigerung auch mit einer Produktivitätssteigerung verbunden ist. Während des fünfstündigen Tests wurden 250 m³ Wasser aus der Tiefe gefördert. Daraus ergibt sich eine mittlere Förderrate von 50 m³/h. Der Produktivitätsindex ist während der gesamten Förderzeit oberhalb von 4 m³*h⁻¹*MPa⁻¹. Durch die Blockierung der Bohrung im Bereich der Siltsteine ist dieser Wert als ein Minimalwert der Produktivität der Bohrung anzusehen. Schon damit liegt der Produktivitätsindex im Vergleich zu den im Sommer 2002 durchgeführten Pumptesten bereits um ein Vielfaches höher (damaliger Wert nach 37 Tagen moderater Förderung 0,6 m³*h⁻¹*MPa⁻¹).

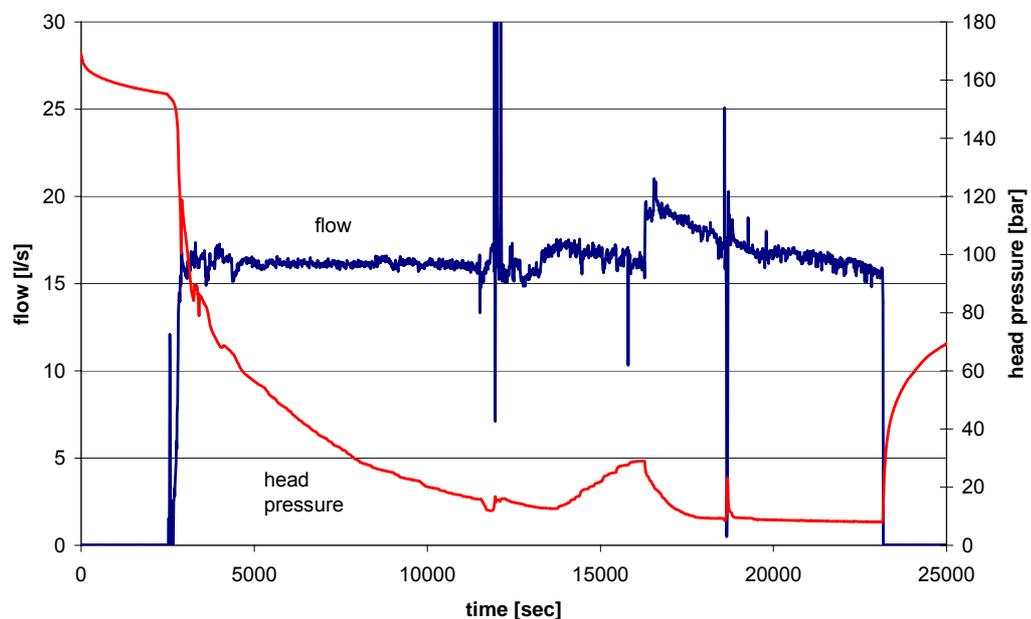


Bild 5.1.1: Druck (Messung am Bohrlochkopf, rote Kurve) und Fließrate (blaue Kurve) beim Auslauftest (01.03.03). Der Produktivitätsindex beträgt 4 m³*h⁻¹*MPa⁻¹.

Nach den massiven Stimulationsexperimenten im November 2003 wurde zur Abschätzung der Produktivität der Bohrung ein Produktionstest (flow-back test) durchgeführt (01.12.2003). Während dieses kontrollierten Produktionsexperiments wurden über ca. 24 Stunden insgesamt etwa 836 m³ Formationswasser gefördert. Der Test wurde in mehreren Stufen durchgeführt: In den ersten 8 Stunden wurde eine konstante Förderrate von 5 l/s (18 m³/h) eingestellt, anschließend für weitere 8 Stunden auf konstante 10 l/s (36 m³/h) erhöht. Abschließend wurde die Fließrate auf 15 l/s (48 m³/h) erhöht, dieser Wert konnte jedoch nicht konstant gehalten werden und fiel bis zum Ende des Tests auf ca. 10 l/s.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein beachtlicher Produktivitätsindex von über $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ vorhanden ist (bestimmt beim Riss-schließdruck, darin sind noch die Reibungsdruckverluste aufgrund des im Bohrloch befindlichen Messkabels enthalten), der mit dem Einsatz von Stützmitteln auch dauerhaft gewährleistet werden könnte. Unter Berücksichtigung der Reibungsdruckverluste, die aus dem abschließenden Stufentest abgeschätzt wurden, ergibt sich ein Produktivitätsindex von ca. $14 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ oberhalb des Riss-schließdrucks. Nach einer bestimmten Förderdauer kommt es zum Aufsetzen der Rissflächen verbunden mit einem sukzessiven Schließen des Risses bei simultaner Abnahme der hydraulischen Durchlässigkeit. Der zugehörige Zeitpunkt dieser Ereignisse konnte anhand des Abfallverhaltens der Druckkurve verifiziert werden.

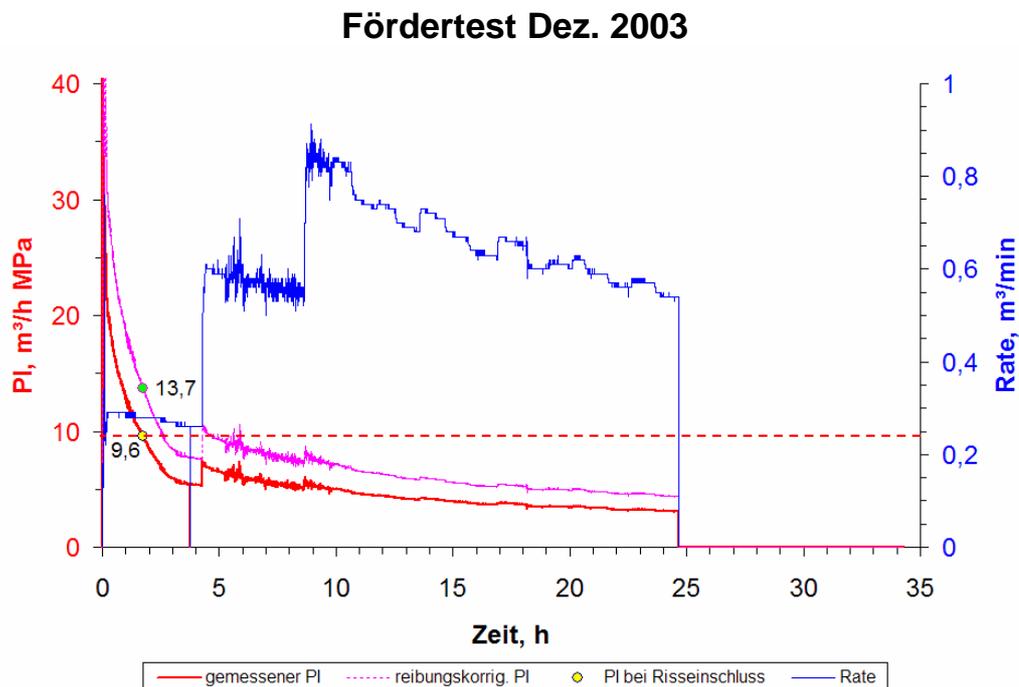


Bild 5.1.2: Zeitliche Entwicklung von Produktivitätsindex (PI) und Fließrate beim Produktionstest nach der Stimulation im gesicherten Bohrloch (Groß Schönebeck 3/90), 01. Dezember 2003.

Bei der Auswertung der Fließregime des Produktionstests zeigt sich, dass sich der Riss wie bereits erwähnt geschlossen hat, jedoch eine geringe Restdurchlässigkeit beibehält. Mit Hilfe spezieller grafischer Auswertemethoden können aus den Fließregimen die residualen hydraulischen Eigenschaften des Risses berechnet werden, nach Cinco and Samaniego (1981).

Die Berechnungen während der Fließphase zeigen, dass der Riss eine hydraulisch wirksame Restlänge unmittelbar vor dem Zusammengehen (Rissflächenkontakt) von ca. 14 m aufwies (Bild 5.1.3). Aus der weiteren Analyse (während der shut-in Phase) ergeben sich Werte für die hydraulische Durchlässigkeit des Risses in einer Größenordnung von ca. 100 mDm (Bild 5.1.4).

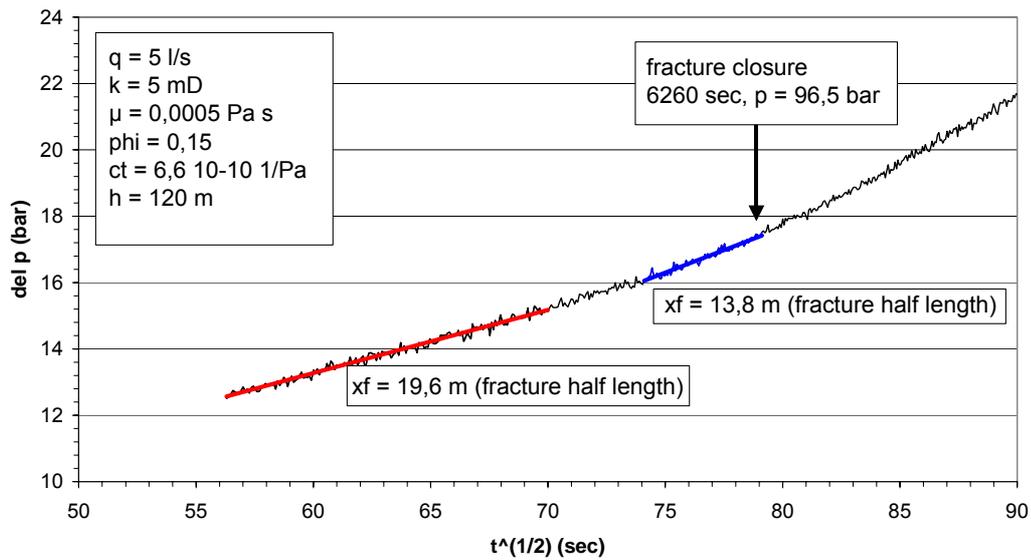


Bild 5.1.3: Hydraulisch bestimmte Risshalblängen (x_f) während des Produktionstests (flow back Test). Dargestellt ist der Differenzdruck als Funktion von der Wurzel der Zeit unter der Modellannahme von linearem Formationsfließen (nach Cinco and Samaniego, 1981). Rot: Berechnete Risshalblänge zu Beginn des linearen Fließens, blau: Berechnete Risshalblänge kurz vor Erreichen des Risssschließdrucks.

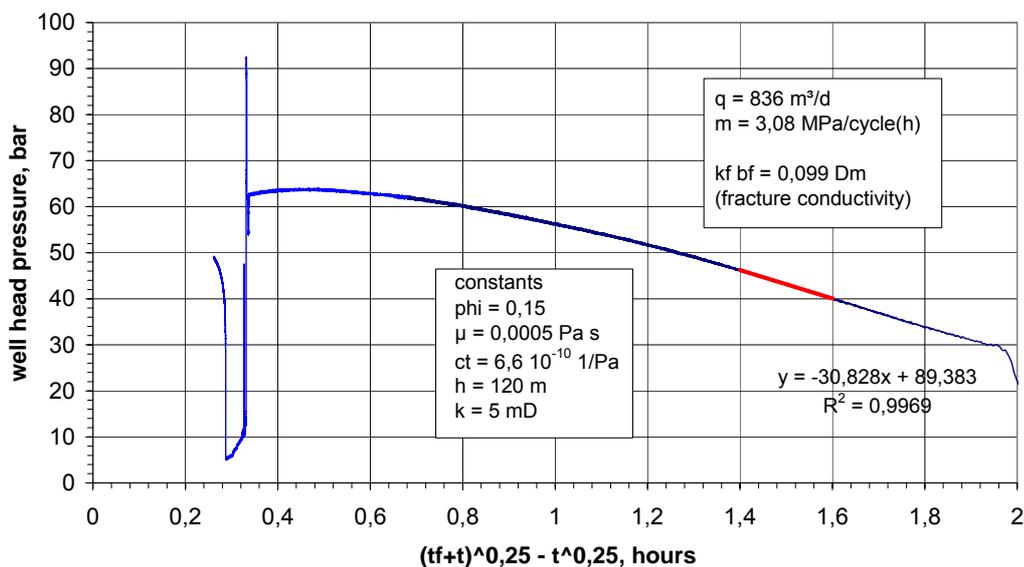


Bild 5.1.4: Bohrlochkopfdruck während des Produktionstests aufgetragen über die vierte Wurzel der Summe aus Fließzeit (t_f) und der shut-in Zeit (t). Die Steigung der Kurve im rot gekennzeichneten Abschnitt ist eine Funktion der Rissleitfähigkeit.

Das kontrollierte Produktionsexperiment zeigt, dass die Stimulation eine Steigerung der Produktivität auf mindestens $14 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ erreicht hat, hier bestimmt beim Riss-schließdruck. Mit Stützmitteln könnte diese Produktivität langfristig gesichert werden. Damit wurden die Arbeitsziele der Herbstexperimente erreicht.

5.2 Injektivitäts- und Produktivitätsentwicklung

mit Beiträgen von B. Legarth und G. Zimmermann

Injektivitätsentwicklung Wasserfrac-Experimente

In der Folge der zwei Wasserfrac-Experimente konnte der Injektivitätsindex (II) der Bohrung signifikant gesteigert werden. In Bild 5.2.1 kann diese Entwicklung nachvollzogen werden. Die systematische Erhöhung des Injektivitätsindex um den Faktor 1,3 ist auf die Verringerung der Reibungsdruckverluste durch die Beseitigung des Stopfens zurückzuführen. Die gemessene Druckdifferenz entspricht den Reibungsdruckverlusten über dem Stopfen. Zusätzlich wirkt sich der verbesserte Anschluss der Hauptzuflusszone aus.

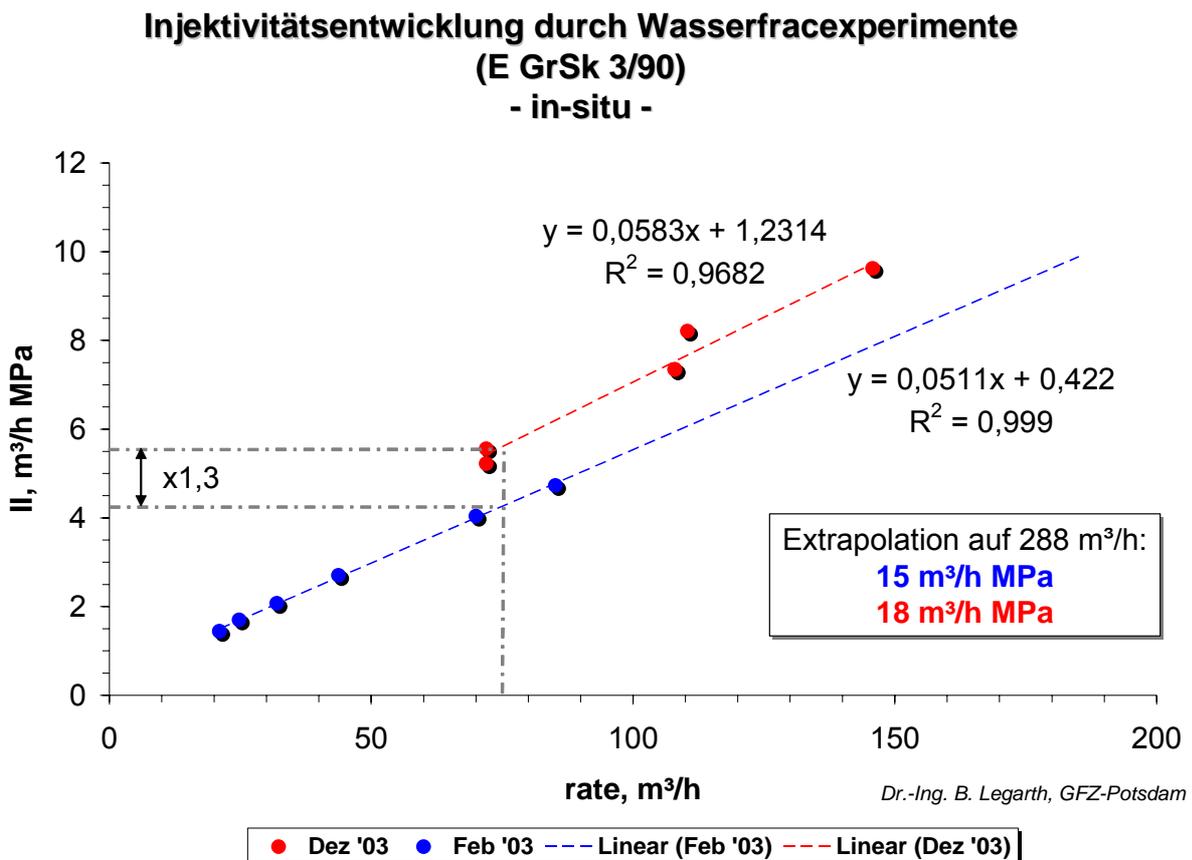


Bild 5.2.1: Entwicklung der Injektivität durch die beiden Wasserfrac-Stimulationen von Februar 2003 und November 2003 in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90. Die extrapolierten Werte beziehen sich auf die maximale Injektionsrate von 80 l/s ($= 288 \text{ m}^3/\text{h}$).

Produktivitätsentwicklung der Bohrung

In der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 wurden seit 2001 mehrere Stimulationsmaßnahmen durchgeführt, die sich auf verschiedene Behandlungshorizonte beziehen.

Bild 5.2.2 zeigt die Produktivitätsentwicklung im Verlauf der Behandlungen. Im Dezember 2003 wurde bei einem abschließenden Produktionstest ein Produktivitätsindex (PI) von ca. $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ gemessen. Dieser Wert wurde von der Gegenwart eines in der Bohrung oberhalb des Förderhorizontes befindlichen Kabelstopfens beeinflusst (erhöhte Reibungsdruckverluste). Aus den vorherigen Injektionsphasen konnte eine Reibung rückgerechnet werden. Die Subtraktion dieser Reibungswerte lässt auf einen minimal erzielten PI von ca. $14 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ schließen.

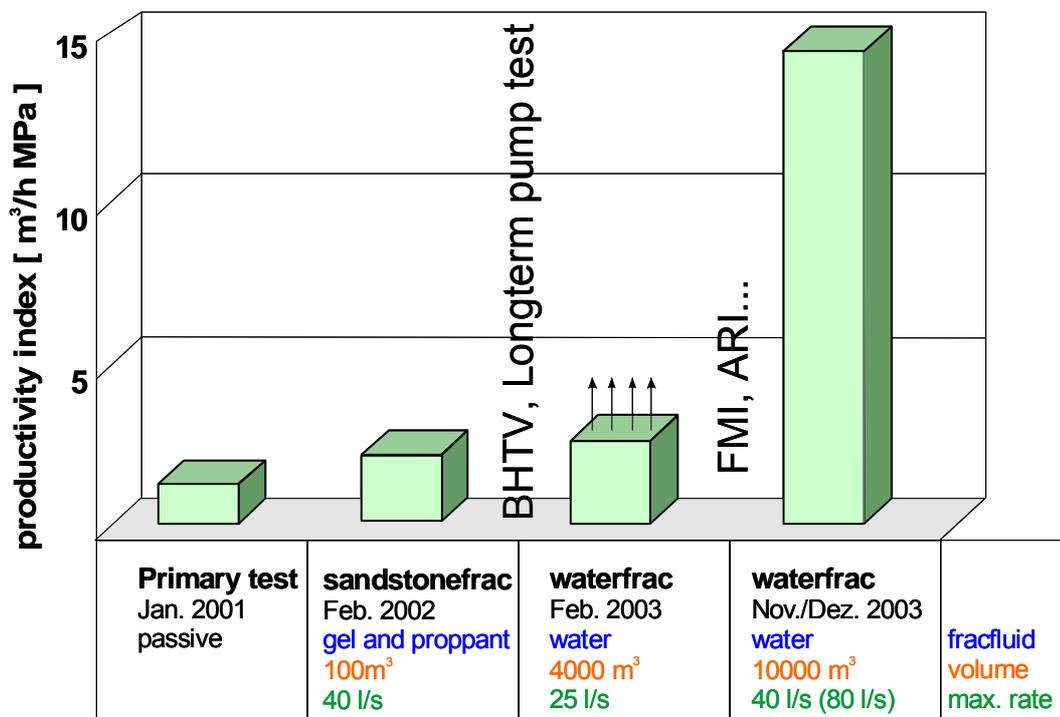


Bild 5.2.2: Entwicklung der Produktivität der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 mit den verschiedenen Behandlungen Sandsteinfrac (siehe Bericht zu BMU ZIP 0327063C), 1. Wasserfrac (Kap. 4.1) und 2. Wasserfrac (Kap. 4.4).

Während des Produktionstests konnte beobachtet werden, dass sich die im Gebirge hydraulisch erzeugten Risse wieder schließen. Es fand keine hinreichende Selbstabstützung der Risse statt. Diese Rissschließereignisse beginnen unterhalb eines PI von 14. Bei einer zusätzlichen, künstlichen Offenhaltung der Risse (z. B. mit Stützmitteln) sollte eine Stabilisierung des PI auf dem genannten Niveau möglich sein.

Der Vergleich der Bilder 4.1.3 und 4.4.2 zeigt, dass es bei einer erneuten Injektion von Fluiden in die Bohrung bei einem ähnlichen Druck- und Fließratenniveau zu einer wiederholten Rissöffnung kommt. Die dann zur Verfügung stehenden Risse werden

sehr ähnliche Eigenschaften in Bezug auf ihre hydraulische Leitfähigkeit aufweisen, so dass der resultierende Injektivitätsindex mindestens dem gemessenen Produktivitätsindex entspricht.

Aus dem Produktivitätsindex kann bei gegebenem Fördervolumenstrom eine Pumpenantriebsleistung abgeschätzt werden (Legarth, 2003). Bei den derzeitigen Daten der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 ($PI\ 14\ m^3 \cdot h^{-1} \cdot MPa^{-1}$ und angestrebte Förderrate $75\ m^3/h$) wäre eine Pumpenleistung von etwa 320 kW erforderlich.

5.3 Veränderungen der Fluidchemie während der hydraulischen Experimente *mit Beiträgen von A. Seibt*

Während der verschiedenen Injektions- und Produktionstests der Jahre 2001 bis 2002 wurden kontinuierlich Fluidproben gewonnen und analysiert. Insgesamt wurden 25 Tiefenproben genommen. Dabei konnten kurzfristig deutliche Schwankungen des Ionengehalts beobachtet werden, die sich gegen Ende der Tests stets den Ausgangswerten annäherten. Insgesamt werden in Folge aller Tests die Ausgangsbedingungen wieder hergestellt. Damit sollte vor den massiven Wasserfrac-Behandlungen der größte Teil der injizierten Fluide entsprechend rückgewonnen worden sein.

Der Gasgehalt im Fluid nahm nach den 2001/2002 im Bohrloch durchgeführten Maßnahmen um etwa 10 % zu. Hierbei erhöhte sich der CO_2 -Anteil von 1,7 Vol. % auf 4,7 Vol. %. Ansonsten sind keine signifikanten Unterschiede in der Zusammensetzung der Gasphase vor und nach den Stimulationstests zu beobachten.

Bei dem Auslauffest am 01.12.2003, nach dem 2. massiven Wasserfrac, erfolgten die Messungen übertage. Gleichzeitig wurden in situ die Temperatur sowie an der Erdoberfläche die elektrische Leitfähigkeit, pH- und Eh-Wert, gemessen. Bis zum Ende des Auslauffests stellten sich konstante Werte bezüglich pH-Wert (6,2), Leitfähigkeit (68 mS/cm) und ein Redoxpotenzial (Eh ca. $-270\ mV$ gegen Standardwasserstoffelektrode) ein. Die Salinität des geförderten Fluids lässt darauf schließen, dass dieses zu etwa einem Drittel aus Formationsfluid und zu zwei Drittel aus injiziertem Brunnenwasser zusammengesetzt ist.

Betrachtet man die im Mischfluid des Auslauffests vom 01.12.2003 gelösten Gase, so sind sowohl der Gehalt und die Zusammensetzung nahezu identisch mit denen im Formationsfluid gelösten. Möglicherweise wurden hier durch die massive Stimulation andere und/oder weitere gasführende Horizonte angeschlossen.

5.4 Lernpunkte und weiterer Forschungsbedarf

Die technischen Maßnahmen und Experimente in der ehemaligen Erdgassuchbohrung Groß Schönebeck 3/90 haben das Ziel heiße Tiefenwässer mit hohen Fließraten zu fördern, damit eine geothermische Stromerzeugung realisiert werden kann. Zum Abschluß dieses Projekts können folgende Lernpunkte festgestellt werden.

- Mit Wasserfracs in Rotliegend-Sedimenten kann ein deutlicher Stimulationserfolg erzielt werden.
- Das Injektionswasser sollte zur Verhinderung von Eisenausfällungen auf pH 5 angesäuert werden. Dazu hat sich Essigsäure bewährt, die weniger korrosiv auf die Verrohrung wirkt.
- Ein zu niedriger pH-Wert führt zu Korrosion in Pumpen (Erfahrung 1. Wasserfrac).
- Zur Verhinderung von Eisenverbindungen wurde der pH-Wert des Injektionsfluids auf 3 (1. Wasserfrac) bzw. 5 (2. Wasserfrac) eingestellt. Der höhere pH-Wert beim 2. Wasserfrac hatte keine negativen Auswirkungen.
- Auf eine Zugabe von Salz in das Injektionsfluid kann verzichtet werden.
- Die Einstellung der Chemie des Injektionsfluids sollte unter technischen (Korrosion) und geochemischen (Speicherschonung) Aspekten getroffen werden.
- Der Einsatz von Proppants kann als Option für ein dauerhaftes Offenhalten der erzeugten Fracs angesehen werden. Eine Verifizierung konnte innerhalb dieses Projektes nicht erfolgen.
- Ein in der Erdöl-Exploitation beim Fracen häufig verwendetes HTU-Gel hat sich nicht bewährt. Es ist sogar als kontraproduktiv anzusehen, da die Sandsteine teilweise versiegelt werden können. Unter den Tiefenbedingungen bleibt das HTU-Gel unerwartet lange stabil, wie aus den immer wieder zutage geförderten Resten erkennbar ist.
- Ein massiver Wasserfrac im Open hole über verschiedene sedimentäre Gesteinsschichten ist bezüglich der Bohrlochstabilität als kritisch zu betrachten. Die positiven Erfahrungen aus dem Kristallingestein (Soultz-sous-Forêts) lassen sich nicht übertragen.
- Hydraulische Operationen sollten möglichst moderate Druckverläufe aufweisen, besonders beim Herunterfahren. Dadurch können dynamische Belastungen vermieden werden, wie sie durch Auf- und Abbau des Poreninnendrucks entstehen können. Hier könnten zukünftige Modellrechnungen helfen, die Grenzbedingungen abzuschätzen.
- Der Einbau eines gelochten Liners konnte problemlos durchgeführt werden, obwohl die Stabilität des offenen Bohrlochs nach der 1. massiven Wasserfracbehandlung als kritisch einzustufen war. Der Liner stabilisierte das Bohrloch während der gesamten Experimentierphase zuverlässig.

6 Geophysikalische Untersuchungen

Im In situ Geothermielabor Groß Schönebeck wurden eine Reihe von geophysikalischen Untersuchungen durchgeführt, um mehr Informationen über die Untergrundstruktur zu erhalten, besonders über die Zielhorizonte unterhalb des Zechsteins mittels der Magnetotellurik (Kap. 6.2). Eine zweite Aufgabe bestand darin, mit geophysikalischen Messungen vor, während und nach den hydraulischen Stimulationen Erkenntnisse über die Fließwege zu gewinnen. Hierzu wurden seismische (Kap. 6.1) und elektromagnetische Registrierungen (Kap. 6.2) sowie Messungen mit einem Vertikal-Elektroden-System (Kap. 6.3) durchgeführt.

6.1 Seismische Messungen während der Stimulation

mit Beiträgen von A. Schulze, M. Weber und F. Zetsche

Während der beiden massiven Injektionsexperimente im Frühjahr und Herbst 2003 wurde durch die Sektion *Seismische Tiefensondierung* des GFZ ein seismisches Array um die Bohrung aufgebaut. Ziel war, durch die hydraulischen Tests induzierte seismische Aktivitäten zu detektieren und zu lokalisieren. Damit könnte gegebenenfalls die Ausbreitung des hydraulisch induzierten Risses verfolgt werden.

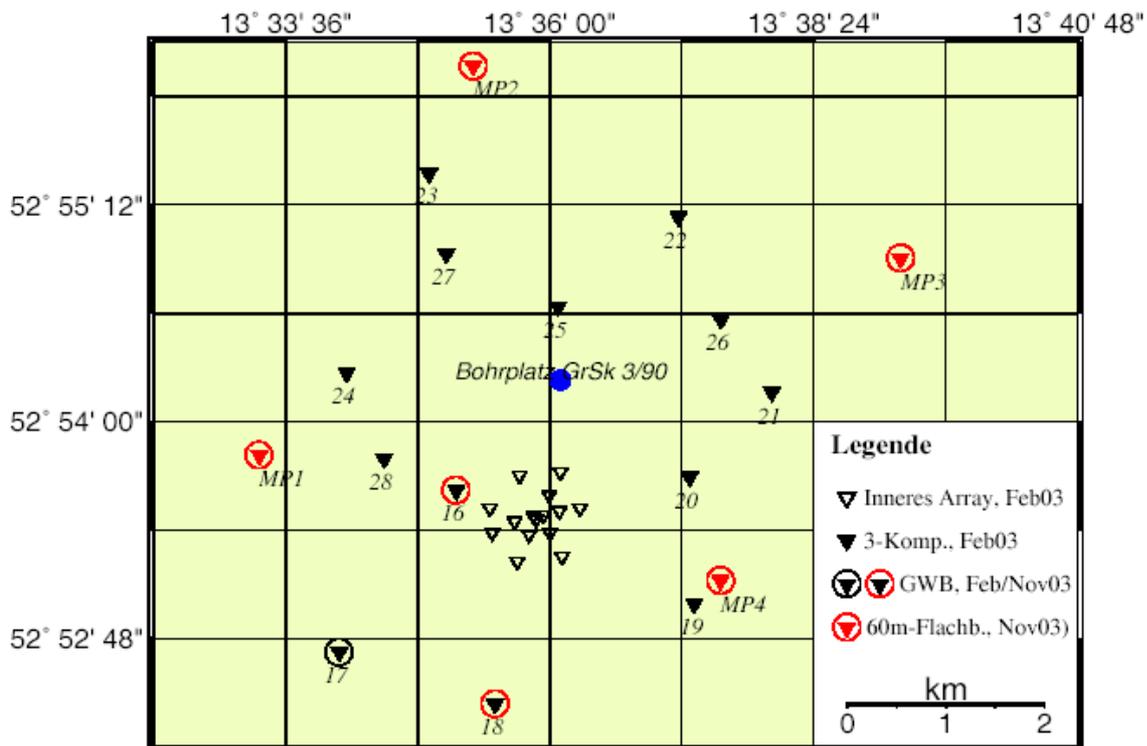


Bild 6.1.1: Seismische Registrierstationen an der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 während der hydraulischen Stimulationen Februar und November 2003. Die Stationen 1 bis 14 bilden das innere Array. Die Stationen 16, 17 und 18 sind Geophone in Grundwasserbohrungen (GWB, 80 – 100 m tief). Die Stationen MP 1 bis MP 4 wurden in 60 m tiefen Bohrungen installiert (Betrieb nur im November 2003).

Bei vergleichbaren Experimenten in kristallinen Gesteinen (Kontinentale Tiefbohrung Oberpfalz, Geothermiebohrungen Soultz-sous-Forêts, Geothermiebohrung Bad U-

rach) zeigte sich in der Injektionstiefe eine starke Mikroseismizität während der hydraulischen Tests. Da für die Speichergesteine des Rotliegenden keine adäquaten Ergebnisse vorlagen, wurde bei dem ersten Experiment im Frühjahr 2003 die Arraykonfiguration in zwei Zielvorgaben optimiert. Ein kleines Array südlich der Bohrung dient zur Detektion eventueller Ereignisse und ein größeres Netz zur Lokalisierung (Bild 6.1.1).

Im zweiten Experiment (Herbst 2003) wurde versucht, das Signal-Störverhältnis zu verbessern, indem die Dreikomponentengeophone in 60 m tiefe Flachbohrungen installiert wurden. Hierzu wurden vier neue Bohrungen abgeteuft.

Stimulationsexperiment im Februar 2003

Dieses Experiment umfasste mehrere Injektionsphasen, wobei die stärkste Injektion mit 30 l/s seismisch überwacht wurde. Dafür standen 25 Dreikomponentengeophone und drei Z-Komponentengeophone zur Aufzeichnung in Grundwasserbohrungen zur Verfügung. Die Resonanzfrequenz der Instrumente liegt bei 4.5 Hz. Die Datenaufzeichnung erfolgte durch 22 Dreikanal Earth Data Logger PR6-24 (EDL) sowie 3 Sechskanal EDL. Um das Hintergrundrauschen in diesem Gebiet zu bestimmen, wurde im November 2002 ein Vorexperiment durchgeführt. Diese Messungen ergaben Frequenzen von 5 - 15 Hz das entspricht Wellenlängen des seismischen Rauschens bis zu 150 m. Damit konnte die Geometrie des inneren Arrays auf ein optimales Signal-Rauschverhältnis ausgelegt werden. Es wurde eine Stationsverteilung mit der besten Antwortfunktion realisiert (Inneres Array in Bild 6.1.1). In zwei Grundwasserbohrungen konnten in 80 bzw. 100 m Tiefe je ein Z-Komponentengeophon installiert werden. Damit konnten die Signal-Rausch-Verhältnisse im Vergleich zum Oberflächenarray getestet werden.

Die Stationen waren vom 18.02. - 06.03.2003 in Betrieb, davon 7 Tage vor der massiven Injektion, 5 Tage während des Hauptexperimentes und 5 Tage im Anschluss daran. Die seismischen Daten wurden mit einer Samplingrate von 1000 Hz registriert. Insgesamt wurden 45 GByte Zeitreihendaten aufgezeichnet.

Die Lokalisierung der gefundenen Events erfolgte mit dem Programm HYPO71PC von Lee und Valdes (Lee und Valdes, 1989). Dafür wurden von Events mit guten P- und S-Welleneinsätzen die Zeiten gepickt und mit verschiedenen Startmodellen (Herdtiefe 0, 2 und 4 km) invertiert. Diese Ereignisse wurden nur im inneren Array detektiert und konnten daher keiner definierten Tiefe zugeordnet werden. Modellierungen des Hypozentrums führen zu einer sehr oberflächennahen Herdtiefe unter 1 km. Wahrscheinlich handelt es sich um oberflächennahe, durch Baumfällarbeiten verursachte Erschütterungen. Ereignisse, die eindeutig dem Injektionshorizont zuzuordnen wären konnten nicht detektiert werden.

Stimulationsexperiment im November und Dezember 2003

Bei diesem Experiment wurden vier Dreikomponentengeophone in 60 m tiefe Bohrungen fest eingebracht. Zum Vergleich der Wellenform wurden an drei Stationen zusätzlich an der Oberfläche Seismometer installiert. Zwei Grundwasserbohrungen wurden ebenfalls genutzt und in 80 bzw. 100 m Tiefe z-Komponenten-Geophone installiert. Die Stationen waren vom 20.11. - 15.12.2003 installiert.

Bei beiden hydraulischen Stimulationen im Februar und November 2003 wurden keine seismischen Ereignisse registriert, die dem Injektionshorizont zugeordnet werden konnten. Gründe für diesen negativen Befund können sein:

- Die Injektionsrate war zu gering, um Bruchvorgänge auszulösen.
- Das Injektionsfluid breitet sich entlang bestehender Klüfte aus.
- Die Gesteine des Injektionshorizonts (Sandsteine, Konglomerate) reagieren bei der Stimulation mit gleitendem Aufweiten und nicht mit sprödem Bruch, so dass kein seismisches Signal erzeugt wird.
- Die Wellenausbreitung wird durch die darüber liegenden Sedimentschichten stark gedämpft, so dass kein seismisches Signal mehr detektierbar ist.

6.2 Magnetotellurische Messungen

mit Beiträgen von P. Bedrosian, A. Cyganiak, O. Ritter und U. Weckmann

Mit magnetotellurischen Sondierungen kann die Struktur des elektrischen Widerstandes im Untergrund erkundet werden. Bei diesem Messverfahren werden Variationen des erdmagnetischen und erdelektrischen Feldes als Zeitreihen registriert und im Frequenzbereich ausgewertet (siehe auch Anhang 3).

Etwa 30 km westlich von Groß Schönebeck verläuft ein magnetotellurisches Profil von Usedom bis Fläming mit 18 Messstationen, das im Auftrag der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover (BGR) in den Jahren 1993 bzw. 1995 gemessen (Bild A 3.1 im Anhang 3) und im Rahmen dieses Projekts re-prozessiert wurde. Die Auswertung dieser Daten erfolgte bisher im Hinblick auf die Charakterisierung von tiefen geologisch-tektonischen Strukturen des Nordostdeutschen Beckens. (Hoffmann et al., 1998; Hoffmann et al., 2001). Mit der Neubearbeitung der Daten bestand die Erwartung, weitere Informationen über die Widerstandsstruktur der oberen 5 km in der Region zu erhalten.

Im Süden und Norden des Profils nimmt der Widerstand mit der Tiefe allmählich zu, übersteigt in etwa 10 km Tiefe den Wert von 100 Ωm und beträgt in 20 km Tiefe einige hundert Ωm . Im mittleren Teil des Profils, zwischen den Stationen A90 und A120 deutet sich eine großräumige Leitfähigkeitsanomalie an, deren Widerstände höchstens 20 Ωm in 25 km Tiefe erreichen (Bild 6.2.1).

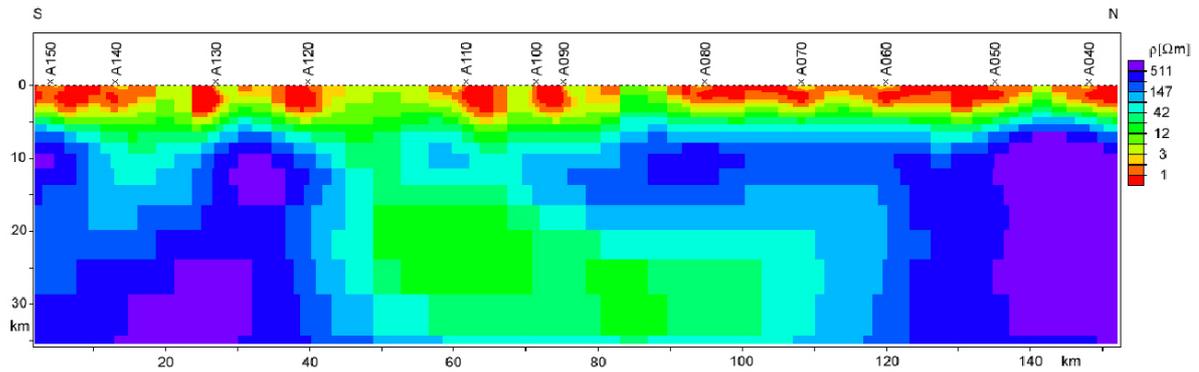


Bild 6.2.1: Regionales 2D Modell im Mittelteil des Profils zwischen den Stationen A40 und A150 (siehe Anhang 3).

In der Forschungsbohrung Groß Schönebeck 3/90 wurden unter dem mächtigen Zechstein mit hohen elektrischen Widerständen in ca. 4000 m Tiefe Schichten mit hoch-salinaren Fluiden und niedrigen Widerständen um $0.1 \Omega\text{m}$ angetroffen. Die Daten der Magnetotellurik weisen für diesen Bereich einen großräumigen (bulk) Widerstand um $10 \Omega\text{m}$ aus. Die Porosität der Sandsteine in der Bohrung Groß Schönebeck beträgt im Mittel 10 %. Mit der Leitfähigkeits-Porositäts-Beziehung nach Archie erhält man aus einem Fluidwiderstand von $0.1 \Omega\text{m}$ und einer Gesteinsporosität von 10 % einen bulk-Widerstand von $10 \Omega\text{m}$. Damit können die Ergebnisse der Magnetotellurik mit den Daten der Bohrung nachvollzogen werden.

Elektromagnetisches Monitoring an der Bohrung Groß Schönebeck während der hydraulischen Stimulation Februar 2003

Während der hydraulischen Stimulation in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 im Februar 2003 wurden Stationen zur Registrierung von elektromagnetischen Feldern zur Beobachtung von Veränderungen der elektrischen Widerstandsstruktur errichtet. Die Durchführung erfolgte durch die Arbeitsgruppe „Elektromagnetische Tiefensondierung“ in der Sektion Erdmagnetfeld des GFZ unter der Leitung von Dr. O. Ritter und der Mitarbeit von Fr. Dr. U. Weckmann und Dr. P. Bedrosian. Nachfolgend werden Aufbau, Messungen und Ergebnisse beschrieben. Die Angaben beruhen auf der Publikation von Bedrosian et al. (2003).

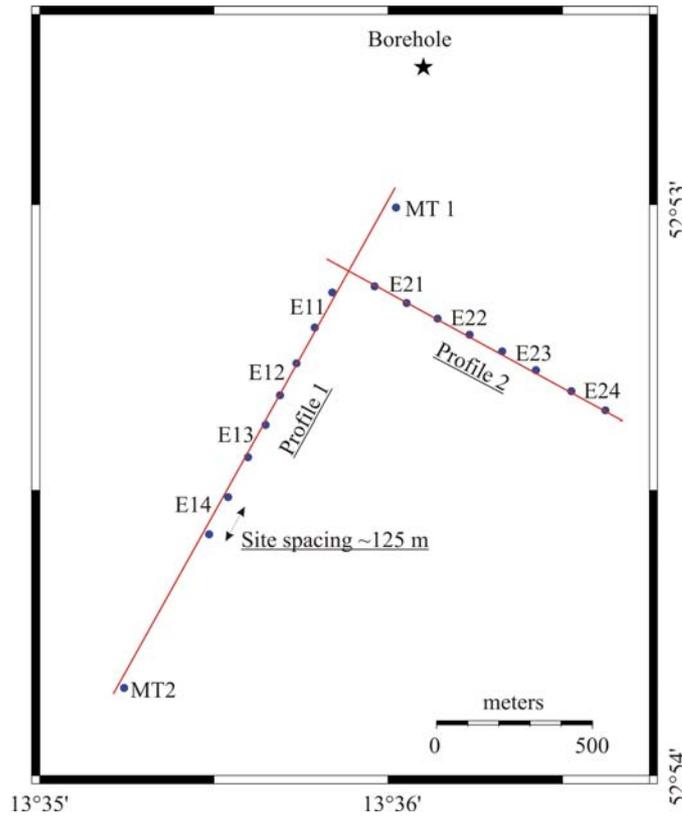


Bild 6.2.2: Lokales EM Array für das Monitoring in der Bohrung Groß Schönebeck.

Das Array besteht aus 16 E-Feld-Stationen und zwei fünfkanaligen magnetotellurischen Stationen, die südlich der Bohrung in L-Form aufgebaut wurden. (Bild 6.2.2). Es werden jeweils die Komponenten E_x und E_y bei den E-Feld-Stationen sowie E_x , E_y , B_x , B_y und B_z bei den magnetotellurischen Stationen registriert. Für die weitere Verarbeitung ist eine geeignete Bandpassfilterung unerlässlich.

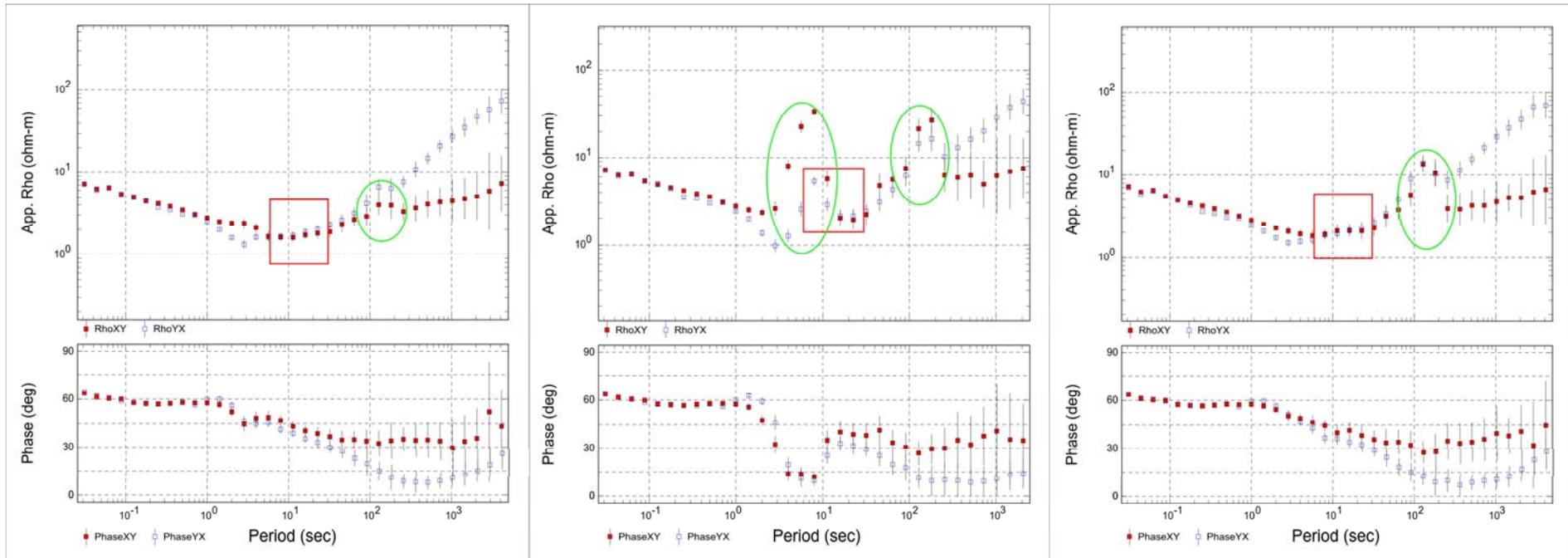


Bild 6.2.3: Sondierungskurven von drei ausgewählten Registrierzeitfenstern, vor (links), während (Mitte) und nach (rechts) den Stimulationsarbeiten. Rot eingrahmt ist der Periodenbereich, in dem eine Variation infolge der Stimulation zu erwarten wäre. Grüne Kreise kennzeichnen stark gestörte Messwerte.

In Bild 6.2.3 sind die Sondierungskurven für drei Zeitabschnitte vor der Stimulation und zwei nach der Stimulation wiedergegeben. Diesen Kurven liegen jeweils Registrierzeiten von zwei bis vier Tagen zugrunde. Die Sondierungskurven zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die des MT Profils westlich von Groß Schönebeck. Unter der Annahme eines mittleren elektrischen Widerstandes von 1 bis 5 Ωm in den oberen 4 Tiefenkilometern kann ein Periodenbereich von 6 bis 30 s definiert werden, in dem Widerstandsänderungen in 4 km Tiefe zu signifikanten Änderungen in der Sondierungskurve führen könnten. Dieser Abschnitt ist rot eingerahmt. Gleichzeitig sind mit grünen Ellipsen die Bereiche mit auffälligem Störpegel gekennzeichnet.

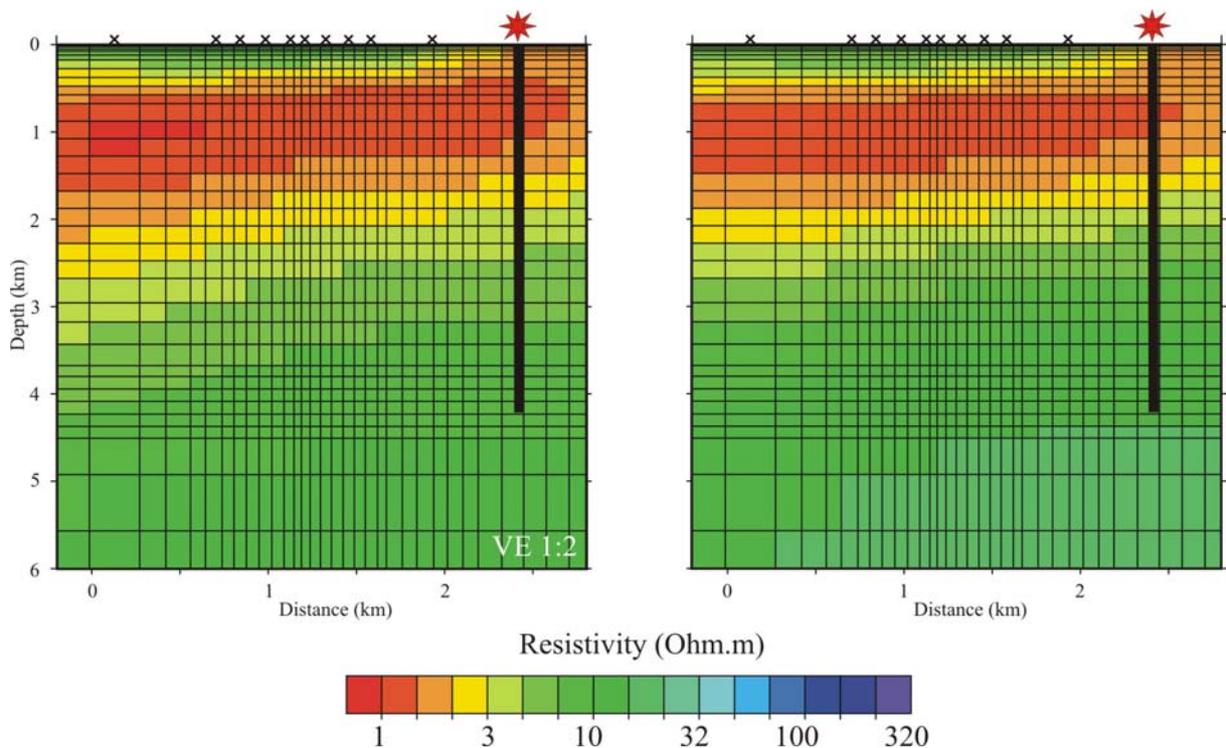


Bild 6.2.4: Widerstands-Tiefen-Modell für Groß Schönebeck (Profil 1), vor (links) und eine Woche nach (rechts) der Stimulation. Lage und Tiefenerstreckung der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 sind mit Stern und Balken eingezeichnet.

Das Widerstands-Tiefen-Modell zeigt eine dreifache Schichtung, oberflächennah um 3 Ωm , gefolgt von einer Zone sehr niedrigen Widerstandes unter 1 Ωm ab einer Tiefe von 100 m und einer darunter liegenden hochohmigen Schicht um 20 Ωm ab etwa 2 km Tiefe (Bild 6.2.4). Infolge des extrem guten elektrischen Leiters oberhalb ist diese nicht weiter auflösbar. Dennoch konnte mit dem dichten Messarray in den oberen vier Tiefenkilometern eine verbesserte Auflösung gegenüber dem MT Profil östlich von Groß Schönebeck erreicht werden. Die beiden Modelle vor und nach der Stimulation unterscheiden sich nur geringfügig. Etwaige Änderungen der elektrischen Widerstandsstruktur sind eine Woche nach der Stimulation nicht festzustellen.

Zusammenfassung der Ergebnisse

- Die während störarmer Zeiten berechneten Modelle der Widerstandsverteilung sind reproduzierbar. Damit ist ein Monitoring des elektrischen Widerstandes prinzipiell möglich.
- Eine Woche nach der Stimulation ist keine Leitfähigkeitsveränderung erkennbar. Das verpresste Süßwasser könnte durch Vermischung mit Formationsfluid aufgesalzen worden sein, so dass der Leitfähigkeitskontrast für die Messungen zu klein wird, um an der Erdoberfläche noch detektierbar zu sein.
- Ein großer Widerstandskontrast und/oder ein weites künstlich erzeugtes Rissystem sind erforderlich um eine messbare Antwort an der Erdoberfläche zu erzeugen.
- Die sehr gut leitenden Schichten in 1 – 2 km Tiefe an der Bohrung Groß Schönebeck schirmen tiefer liegende Veränderungen in hohem Maße ab.
- Eine Weiterentwicklung von Rechenalgorithmen zur Reduktion von Störsignalen in den Daten wäre für künftige Stimulationsbeobachtungen vorteilhaft, da durch den Maschineneinsatz mit einem hohen elektromagnetischen Störpegel gerechnet werden muss.
- Zur sicheren Detektion von Veränderungen durch die Stimulation in 4 km Tiefe ist ein erheblich größeres Volumen an Injektionsfluiden zu verpressen als hier verwendet wurde.
- Der Leitfähigkeitskontrast zwischen Formations- und Injektionsfluid sollte 1,5 bis 2 Dekaden umfassen, damit ein Messeffekt erkennbar wird.

6.3 Geoelektrische Oberflächen-Bohrloch Messungen

mit Beiträgen von E. Danckwardt, F. Jacobs und R. Kniess

Vor und nach den Stimulationsarbeiten in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 sollten durch Messungen des elektrischen Widerstandes im Bohrloch sowie zwischen Oberfläche und Bohrloch die Veränderungen durch die hydraulischen Experimente beobachtet werden.

Am Institut für Geophysik und Geologie der Universität Leipzig wurde ein Vertikal Elektroden System (VES) entwickelt, mit dem sowohl Messungen des elektrischen Widerstandes im Bohrloch (in hole) wie auch Messungen zwischen Erdoberfläche und Bohrloch (surface to hole) durchgeführt werden können. Mit einer Sondenkette im Bohrloch (in hole Messungen) kann die Verteilung des elektrischen Widerstandes in der Bohrlochumgebung in einem Radius von einigen Zehnermetern untersucht werden. Diese Information erweitert damit die nur im Meterbereich sensitiven konventionellen Bohrlochtools wie z. B. Dual Laterolog und Dual Induction Log.

Mit den Oberflächen-zu-Bohrloch-Messungen ist es möglich, richtungsabhängige Widerstandsänderungen (z. B. durch Bildung von Fracs und/oder Fluidbewegungen) zu ermitteln. Daraus könnten Aussagen über einen günstigen Ziel-punkt der notwendigen zweiten Bohrung abgeleitet werden. Bei einem entsprechend höheren Messaufwand (Einspeisung auf mehreren konzentrischen Kreisen um die Bohrung) ist auch eine tomographische 3D-Inversion möglich.

Dieses System wurde erfolgreich im Rahmen des Pumptests an der Kontinentalen Tiefbohrung Oberpfalz (DFG-Projekt Ja 590/19-2, "Goelectrical investigation in the surround area of continental boreholes to estimate actual states and processes by combined surface / vertical electrode systems") eingesetzt.

Die gleichstromgeoelektrischen Arbeiten wurden im Rahmen des Projekts als Auftrag an die Universität Leipzig vergeben. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus dem Bericht des Instituts für Geophysik und Geologie der Universität Leipzig wiedergegeben.

Sondenkettenmessungen im Bohrloch

Mit dem im Institut für Geophysik und Geologie der Universität Leipzig entwickelten Vertikal-Elektroden-System (VES) wurden mehrere Bohrloch-Logs gefahren. Die Hauptbestandteile des VES sind ein 100 m langes "Bridle-Kabel" mit 5 in einem Abstand von 25 m angebrachten Elektroden. Mit dem VES wurde über mehrere Tage hinweg in verschiedenen Konfigurationen gemessen (Wenner, großer Dipol, kleiner Dipol), siehe Bild 6.3.1. Als Messsystem kam die Geoelektrikapparatur 'GEOTOM' zum Einsatz.

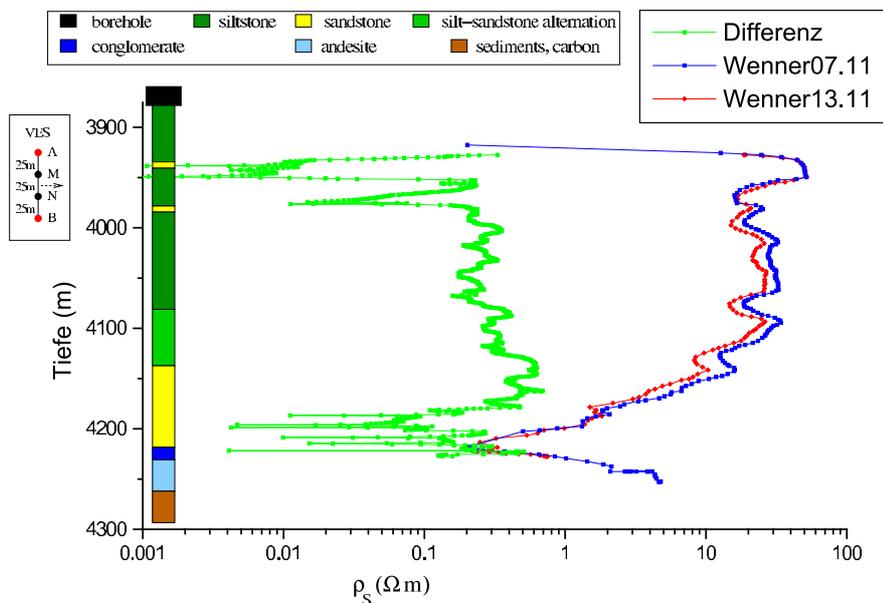


Bild 6.3.1: In Hole Messung in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 mit der Wenneranordnung (A-M-N-B). Dargestellt sind zwei Fahrten zu verschiedenen Zeiten (rote und blaue Kurve) sowie die Differenz der beiden (grün).

In Bild 6.3.1 sind zwei Wennermessungen, die innerhalb von 6 Tagen gefahren wurden, dargestellt. Die Tiefe wurde dabei auf die Mitte der Messanordnung korrigiert. Aus dem zusätzlichen Differenzplot können Bereiche großer und kleiner Änderungen zwischen den Messungen unterschieden werden. Die Differenz ist für eine aussagekräftigere Darstellung auf die Mittelwerte der beiden Messungen an der jeweiligen Tiefe normiert. Zu erkennen sind geringe Differenzen im Bereich der Sandsteinschichten und ein Widerstandsabfall in Höhe der Konglomeratschicht. Im oberen Teil bis etwa 3940 m Tiefe sind die Messwerte noch stark von der Verrohrung des Bohrloches beeinflusst.

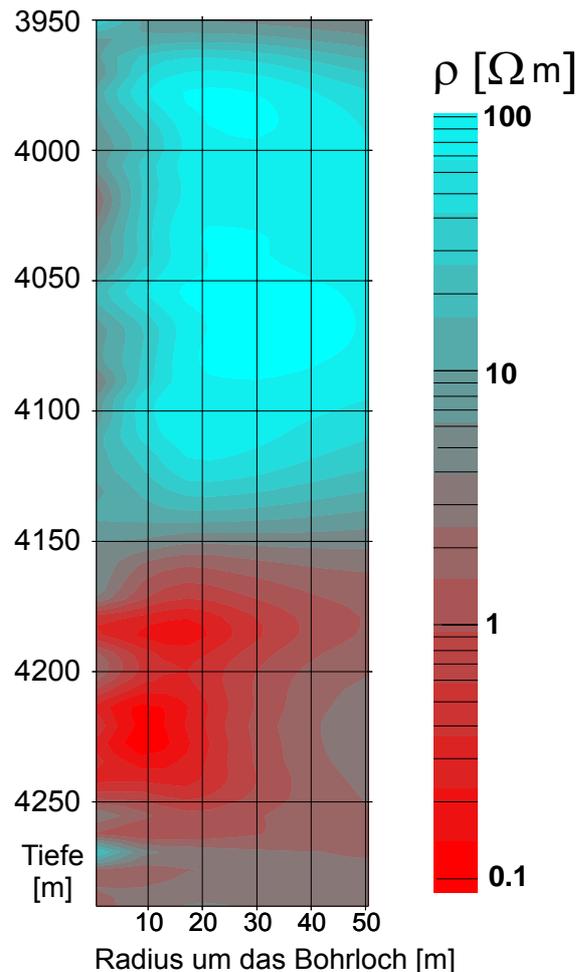


Bild 6.3.2: Inversion der Wenner- und Dipol-Daten der VES in der Bohrung Groß Schönebeck. Dargestellt ist die Verteilung des elektrischen Widerstandes in einem Schnitt entlang der Bohrlochachse in radialer Richtung. Hohe Widerstandswerte (blau), niedrige (rot). Auf der Ordinate ist der Radius um das Bohrloch und auf der Abszisse die Tiefe aufgetragen, beide in Metern.

Die In-Hole-Messungen in Wenner- und Dipolanordnung wurden mit einem für dieses Problem angepassten Inversionsalgorithmus ELTOMO-GS (Autor: E. Danckwardt) invertiert. Dabei werden Bohrdurchmesser und Bohrlochflüssigkeitswiderstand als konstant vorgegeben. Die Daten aus dem Laterolog Deep werden als a priori Information für die unmittelbare Bohrlochumgebung genutzt.

In Bild 6.3.2 ist ein vertikaler Schnitt entlang der Bohrlochachse mit der modellierten Widerstandsverteilung für das VES dargestellt. Man erkennt in den Tiefenabschnitten von 4180 bis 4240 m Zonen guter elektrischer Leitfähigkeit. Die Struktur reicht 20 bis 30 Meter tief ins Gebirge. Diese könnte als erhöhte Vernetzung der hydraulischen und elektrischen Wegsamkeiten interpretiert werden. Die VES Messungen liegen zeitlich nach den abgepackerten Sandsteinfracs und noch vor den massiven Wasserfracs.

Da in die Bohrung Groß Schönebeck 3/90 nach der Aufwältigung im November 2003 der Liner eingebaut wurde, war eine Wiederholungsmessung mit der VES parallel zur Schlumberger DLL Messung zur Beobachtung von Veränderungen durch die Wasserfracs nicht mehr möglich.

Oberflächen-zu-Bohrloch-Messungen

Bei den Oberflächen-zu-Bohrloch-Messungen dient die Sondenkette als Potentialmessaufnehmer, während die Stromeinspeisung an der Erdoberfläche erfolgt.

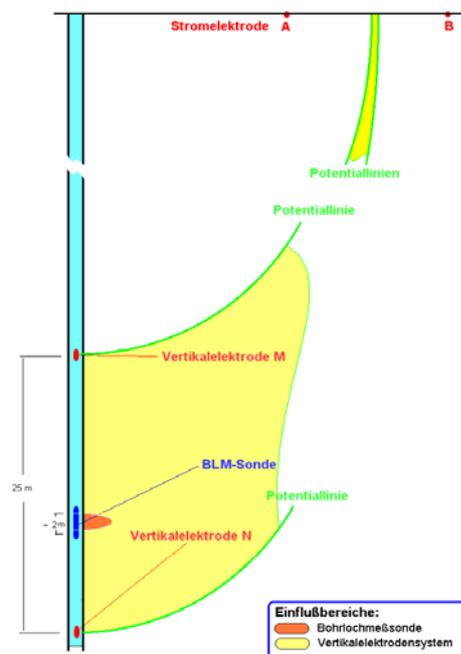


Bild 6.3.3: Messprinzip der Oberflächen-Bohrloch-Messungen.

Mit den Stromeinspeisungen in der Nähe der Bohrung unter verschiedenen Azimuten und gleichzeitiger Spannungsregistrierung mit dem VES in dem unverrohrten Bereich des Bohrloches sollte eine Richtungsabhängigkeit der Leitfähigkeiten ermittelt werden. Erfolge mit ähnlichem Aufbau wurden bereits an der Kontinentalen Tiefbohrung Oberpfalz (KTB) erreicht. In der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 zeigte sich nach nur wenigen Einspeisungen, dass an der

Sondenkette im offenen Bohrlochabschnitt von 3874 bis 4291 m kein Nutzsignal zu registrieren ist. Zunächst wurde mit Signalstapelungen versucht, das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Auch die Steigerung der Stromspeisung auf maximal mögliche 30 Ampere führte zu keinem auswertbaren Spannungssignal am VES. Offenbar findet der Stromfluss vor allem in den elektrisch gut leitenden Gesteinsschichten der oberen 2000 m statt, so dass in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 keine Spannungsvariation messbar ist.

6.4 Lernpunkte zu geophysikalischen Messungen und Forschungsbedarf

Die Aufgabe der geophysikalischen Messverfahren im Projekt ist, die hydraulischen Stimulationen von der Erdoberfläche aus in ihrem zeitlich-räumlichen Verlauf zu beobachten.

Reflexionsseismik

Mit einem seismischen Experiment wurden Daten über einen Referenzreflektor in 2,6 km Tiefe gewonnen. Darauf aufbauend erfolgte eine numerische Vorwärtsmodellierung für verschiedene Fälle der Stimulation in 3,8 km Tiefe. Eine erfolgreiche Detektion ist demnach an eine Mindestmenge von injiziertem Wasser geknüpft: 12500 m³, falls durch die Stimulation eine sub-horizontale, scheibenartige Struktur erzeugt wird bzw. die zehnfache Menge, falls das injizierte Wasser sich im Gestein verteilt. Mögliche Weiterentwicklungen sind:

- Stärkere seismische Quellen und eine große Anzahl an Empfangsstationen in Anlehnung an die standardisierte 3D Industrieseismik würden die Detektionsschwelle senken.
- Die Anwendung von Bohrloch-Bohrloch-Verfahren.

Bei beiden Punkten besteht Forschungsbedarf, insbesondere sind die Tiefe der zu beobachtenden Zone und große Bohrungsabstände die Herausforderungen.

Registrierung seismischer Ereignisse

Bei beiden hydraulischen Stimulationen im Februar und November 2003 konnten keine seismischen Ereignisse registriert werden, die dem Injektionshorizont zugeordnet werden könnten. Gründe für diesen negativen Befund können sein:

- Die Injektionsrate war zu gering, um Bruchvorgänge auszulösen.
- Das Injektionsfluid breitet sich entlang bestehender Klüfte aus.
- Die Gesteine des Injektionshorizonts (Sandsteine, Konglomerate) reagieren bei der Stimulation mit gleitendem Aufweiten und nicht mit sprödem Bruch, so dass kein seismisches Signal erzeugt wird.
- Die Wellenausbreitung wird durch die darüber liegenden Sedimentschichten stark gedämpft, so dass kein seismisches Signal mehr detektierbar ist.

Forschungsbedarf besteht bezüglich des Bruchverhaltens von gesättigten Sandsteinen, Konglomeraten und Vulkaniten. Eine daraus folgende Abschätzung, in welchem Umfang durch die Stimulation seismische Wellen erzeugt werden, könnte zum Verständnis des derzeitigen Ergebnisses beitragen.

Messungen des elektrischen Widerstandes mit elektromagnetischen Verfahren

Mit dem spezifischen elektrischen Widerstande steht ein Parameter zur Verfügung, der unmittelbar mit den hydraulischen Fluidwegen im Gebirge und dessen Vernetzung verknüpft sein kann. Voraussetzung ist ein entsprechender Kontrast des spezifischen elektrischen Widerstandes von Injektionsfluid und Gebirgsfluiden. Aus Modellrechnungen können Mindestanforderungen formuliert werden. Der Widerstandskontrast zwischen Formations- und Injektionsfluid sollte 1,5 bis 2 Dekaden und der Ausbreitungsradius des verpressten Fluids 1 km um das Bohrloch betragen.

Aus den mit großer Stationsdichte durchgeführten Messungen vor, während und nach der 1. Wasserfrac-Stimulation in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 ergeben sich folgende Lernpunkte:

- Die während störarmer Zeiten berechneten Modelle der Widerstandsverteilung sind reproduzierbar. Damit ist ein Monitoring des elektrischen Widerstandes prinzipiell möglich.
- Die Messungen während der Stimulation waren in dem für die Zieltiefe sensitiven Periodenbereich erheblich gestört.
- Aus den Messungen vor und nach der Stimulation ist keine Leitfähigkeitsveränderung erkennbar. Das verpresste Süßwasser könnte durch Vermischung mit Formationsfluid aufgesalzen worden sein, so dass der Leitfähigkeitskontrast für eine Erkennung zu gering ist.
- Die sehr gut leitenden Schichten in 1 - 2 km Tiefe an der Bohrung Groß Schönebeck schirmen tiefer liegende Veränderungen in hohem Maße ab.

Forschungsbedarf besteht in der Weiterentwicklung von Rechenalgorithmen zur Reduktion von Störsignalen in den elektromagnetischen Daten und in spezifischen Modellrechnungen zur Auswirkung von Klufnetzwerken auf den großräumigen elektrischen Widerstand (bulk-resistivity).

Gleichstromgeoelektrische Messungen

Das Vertikalelektrodensystem (VES) konnte in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 erfolgreich eingesetzt werden. Es wird in den während der Sandsteinfracs stimulierten Horizonten ein elektrischer Widerstand bis in 25 m Radius um das Bohrloch abgebildet, der in plausiblen Zusammenhang mit den hydraulischen Daten steht.

Bei den Oberflächen-zu-Bohrlochmessungen dagegen konnten trotz Einsatz von starken Stromquellen (30 Ampere) keine messbaren Signale empfangen werden. Als Ursache ist die Abschirmung der Ströme durch die Schichten niedrigen elektrischen Widerstandes in den oberen 2 km sehr wahrscheinlich, so dass Signale aus größerer unter der Detektionsschwelle bleiben.

Fazit

Zu allen drei hier besprochenen geophysikalischen Messverfahren existieren erfolgreiche stimulationsbegleitende Untersuchungen an Tiefbohrungen in kristallinen Gesteinen (z. B. KTB Oberpfalz, Urach, Soultz-sous-Forêts). Die hydraulisch induzierten Bruchvorgänge im Gebirge erzeugen hier seismische Signale, die auch wegen der geringen Dämpfung und Dispersion an der Erdoberfläche registriert wurden. Die Kontraste der elektrischen Leitfähigkeit sind verglichen zu der Situation in den Sedimenten von Groß Schönebeck groß und es existieren keine zwischenliegenden Schichten, die abschirmend wirken könnten. **Daraus ergibt sich ein genereller Forschungsbedarf für alle Methoden in der Optimierung des Signal-Rausch-Verhältnisses und der Entwicklung von Bohrloch-zu Bohrloch-Verfahren.**

7 Bohrlochmessungen

7.1 Übersicht der durchgeführten Messungen

mit Beiträgen von M. Pischner und T. Voss

Die Bohrung Groß Schönebeck 3/90 wurde im Dezember 2000 von 4240 auf 4294 m und im November 2003 weiter auf 4309 m vertieft. Dadurch wurden stratigraphisch ältere Schichten aufgeschlossen. Da es kein Kernmaterial für diesen Bereich der Bohrung gibt, musste eine Charakterisierung dieser Gesteine mit Hilfe eines Programms von Bohrlochmessungen durchgeführt werden. Gleichzeitig sollten diese Messungen Veränderungen der Gesteinsstrukturen sowie der petrophysikalischen Eigenschaften der Speicherhorizonte in Folge der unterschiedlichen hydraulischen Experimente im Open-hole Bereich der Bohrung detektieren. Eine Übersicht aller durchgeführten Bohrlochmessfahrten in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 findet sich im Anhang A2 (Tabellen A 2.1 und A 2.2).

Vor und nach den Sandsteinstimulationen im Januar 2002 wurden Druck, Temperatur und Kaliber in der Bohrung bestimmt. Im Oktober 2002 wurden Bohrlochmessungen mit den Messparametern 4-Arm-Kaliber (CAL-4), Druck (MP), Spülungsleitfähigkeit und –temperatur (MRES, MTEMP), Dual Induction Log Deep and Shallow (ILD, ILS), Microspherical Focussed Resistivity (MSFL), Sonic-Log (BCS) und Akustisches Bohrlochfernsehen (ABF) durchgeführt. Das ABF Gerät wurde von der Fa. GeoSys, Leipzig ausgeliehen. Mit den Sonden der Universität Frankfurt a.M. wurden das elektrische Potential (EP) und das Redoxpotential (RXP) gemessen (siehe auch Kap. 1.3.5). Für diese Messungen stand das Bohrlochmessfahrzeug der Operational Support Group des GFZ (OSG) mit Winde und einem 5000 m langen siebenadrigen Loggingkabel zur Verfügung. Die Kaliber- sowie Druck- und Temperaturmessungen wurden von Computalog Europe bzw. Schulze Druckmessungen, Salzwedel, durchgeführt.

Im November 2002 wurde mit dem Vertikal Elektroden System (VES) der Universität Leipzig die elektrische Leitfähigkeit im offenen Bohrlochabschnitt vermessen. Mit dieser Sondenkette können auch tiefer ins Gebirge reichende Leitfähigkeitsstrukturen erfasst werden (siehe Kapitel 4.3).

Während der Phase der erneuten Aufwältigung im November 2003 wurde eine Verrohrungsinspektion der 7“ und 9 5/8“ Rohre mit einem 16 Arm Kaliber durchgeführt. Nach Ende dieser Arbeiten erfolgten vor dem Linereinbau weitere Bohrlochmessungen im noch offenen Tiefenabschnitt von 3874 bis 4309 m. Diese dienen der Lokalisierung und Quantifizierung von Klüften und der Lithologiebestimmung. Die Ausführung erfolgte durch Schlumberger, Vechta.

Die erste Einfahrt erfolgte mit dem Azimuthal Resistivity Imager (ARI) in Kombination mit Kaliber (CAL) und Gamma Ray (GR). Aus der ARI Messung kann ein elektrischer Widerstand LLD und LLS abgeleitet werden, der Eindringtiefen vom Dezimeter- bis Meterbereich repräsentiert.

Die zweite Einfahrt erfolgte mit Formation Micro Imager (FMI) und Hostile Natural Gamma Spektren (HNGS). Das FMI ermöglicht ein Abbild der Strukturen an der Bohrlochwand auf Basis der elektrischen Leitfähigkeit. Das HNGS Tool lie-

fert Daten über die Gehalte an Kalium, Uran und Thorium im Gestein, die eine lithologische Differenzierung ermöglichen.

Bei dem Einsatz des FMI trat eine Havarie auf. Die Messsonde wurde in 4107 m fest. Bei den Zugversuchen riss eines der vier Sensorflaps ab und verblieb im Bohrloch. Dadurch fehlen die Daten oberhalb dieser Teufe bis zum Rohrschuh (3874 m). Die darauf folgende Einfahrt mit dem Reservoir Saturation Tool (RST) verlief problemlos.

7.2 Verrohrungsinspektion

mit Beiträgen von B. Legarth

Die Aufgabe der Verrohrungsinspektion war, eine Vergleichsmessung zur ersten Inspektionsmessung im Dezember 2000 durchzuführen, um eventuelle Veränderungen in den Rohrtouren nach den Stimulationsarbeiten im Frühjahr 2003 festzustellen. Weiterhin sollte mit dieser Messung eine qualitativ bessere Aussage zu geometrischen Verformungen der Rohrtouren ermöglicht werden. Die Inspektionsmessung im Dezember 2000 war als 60-Arm-Multiarmkalibermessung durchgeführt worden, bei der jeweils der minimale und maximale Radius aus den 60 Armen erfasst wurde. Mit der Messung im November 2003 wurde ein 16-Arm-Multiarmkaliber eingesetzt, bei dem alle 16 Spuren separat aufgezeichnet wurden. Hiermit sind Aussagen zur Geometrie der Rohrverformungen möglich.

Von besonderem Interesse waren die Rohrtourbereiche der 9 5/8“ D 12 GOST Rohre im Rötalszbereich von 1715 – 1745 m, die schon in der Messung von 2000 große Kaliberveränderungen zeigten. Auch wurden die 7“ x 11,51 N-80 Rohre im Linerkopfbereich zum Setzen des 7“ Behandlungspackers untersucht.

Ergebnisse

In der 9 5/8“ Rohrtour zeigt der direkte Vergleich der Messungen von 2000 und 2003 im maximalen und minimalen Durchmesser ähnliche Verläufe (Bild 7.2.1). Die Unterschiede sind durch die verschiedenen Messsysteme (60-Arm bzw. 16-Arm) begründet. In Tabelle 7.2.1 sind die Rohrabschnitte mit besonderen Ovalitäten dargestellt.

Tabelle 7.2.1: Rohrabschnitte mit besonderen Ovalitäten.

Lfd. Nr.	Teufenbereich	Maximale Abweichung zwischen D_{\min} und D_{\max} in mm bei Teufe
1.	1718,61 – 1720,44 m	22,65 mm bei 1719,61 m
2.	1727,53 – 1731,19 m	20,83 mm bei 1728,75 m
3.	1733,78 – 1736,37 m	20,83 mm bei 1735,38 m

Insgesamt zeigt die 9 5/8“ Rohrtour ein unruhiges Kaliber, was auf eine raue Oberflächenbeschaffenheit vor allem der GOST Rohre schließen lässt.

Durch den Nachweis, dass die Verformung der Rohrtour im Rötalsalzbereich (1715 - 1745 m) nicht weiter fortgeschritten ist, kann auf zusätzliche Stabilisierungsmaßnahmen in diesem Rohrabschnitt verzichtet werden. Während der Stimulationsarbeiten wird die 9 5/8" Rohrtour durch einen 5" Schutzstrang abgesperrt, um die erforderlichen hohen Drucke (50 MPa) zu realisieren.

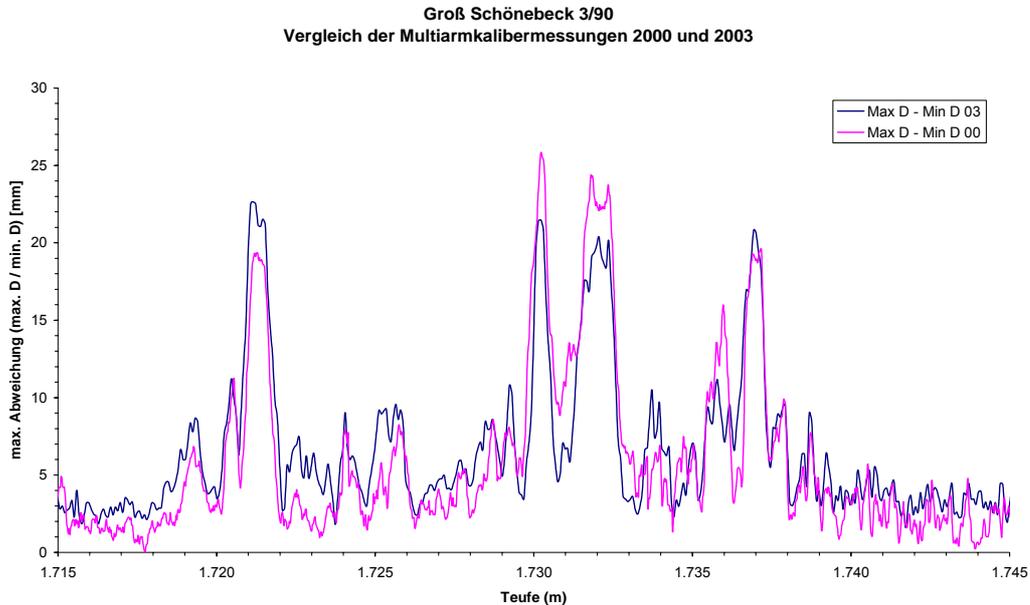


Bild 7.2.1: Multiarmkaliber in den 9 5/8" Rohren im Abschnitt von 1715 bis 1745 m. Dargestellt sind die Zonen mit den größten Ovalitäten. Abweichungen des minimalen vom maximalen Durchmesser für die Messung im Jahr 2000 (schwarze Kurve) und 2003 (violette Kurve).

Das Kaliber der 7" Rohrtour zeigt insgesamt einen ruhigen Verlauf (glatte saubere Oberfläche der Rohre). Es sind keine wesentlichen Ovalitäten zu erkennen. Eine Einschränkung der nachfolgenden Stimulationsarbeiten im Abschnitt der 7" Rohrtour ist auf Grund der deutlich höheren Restfestigkeit im Vergleich zu den 9 5/8" Rohren nicht erforderlich.

7.3 Kalibermessungen vor und nach der Stimulation (open hole) mit Beiträgen von H.-G. Holl

Beispielhaft für Bohrlochmessungen vor dem 1. Wasserfrac, der Wiederaufwältigung und danach können die Kalibermessungen betrachtet werden. In zwei Ausschnitten können die Veränderungen nachvollzogen werden, 3860 – 4000 m (Bild 7.3.1) und 4000 – 4200 m (Bild 7.3.2).

Es fällt auf, dass die Abschnitte mit Schluffsteinen (grüne Signaturen in Bild 7.3.1) starke Ausbrüche aufweisen, während die Abschnitte mit Sandstein (gelbe Signaturen) während der hydraulischen Operationen maßhaltig geblieben sind. Offenbar sind die Tonsteine durch die hydraulischen Operationen der Bohrung stark geschädigt worden.

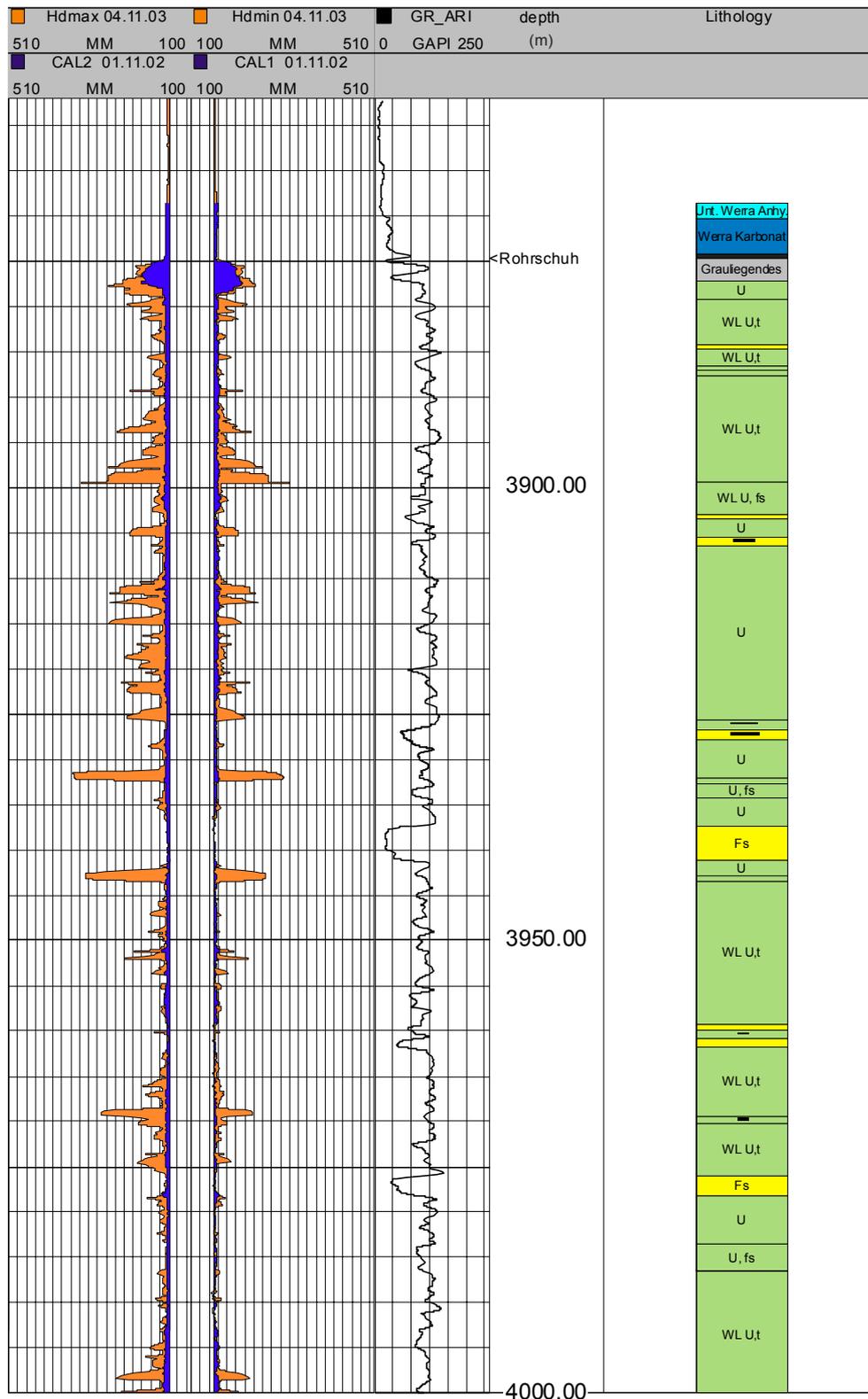


Bild 7.3.1: Vergleich der Kalibermessungen vor (blau) und nach (orange) dem 1. Wasserfrac (Februar 2003) in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90. Offener Bohrlochabschnitt unterhalb des Linerschuhs von 3874 m bis 4000 m. Bedeutung der Signaturen in der lithologischen Kolumne: Fs Feinkörniger Sand; Ms Mittelkörniger Sand; Gs Grobkörniger Sand; U Schluff; T Ton; WL Wechsellagerung.

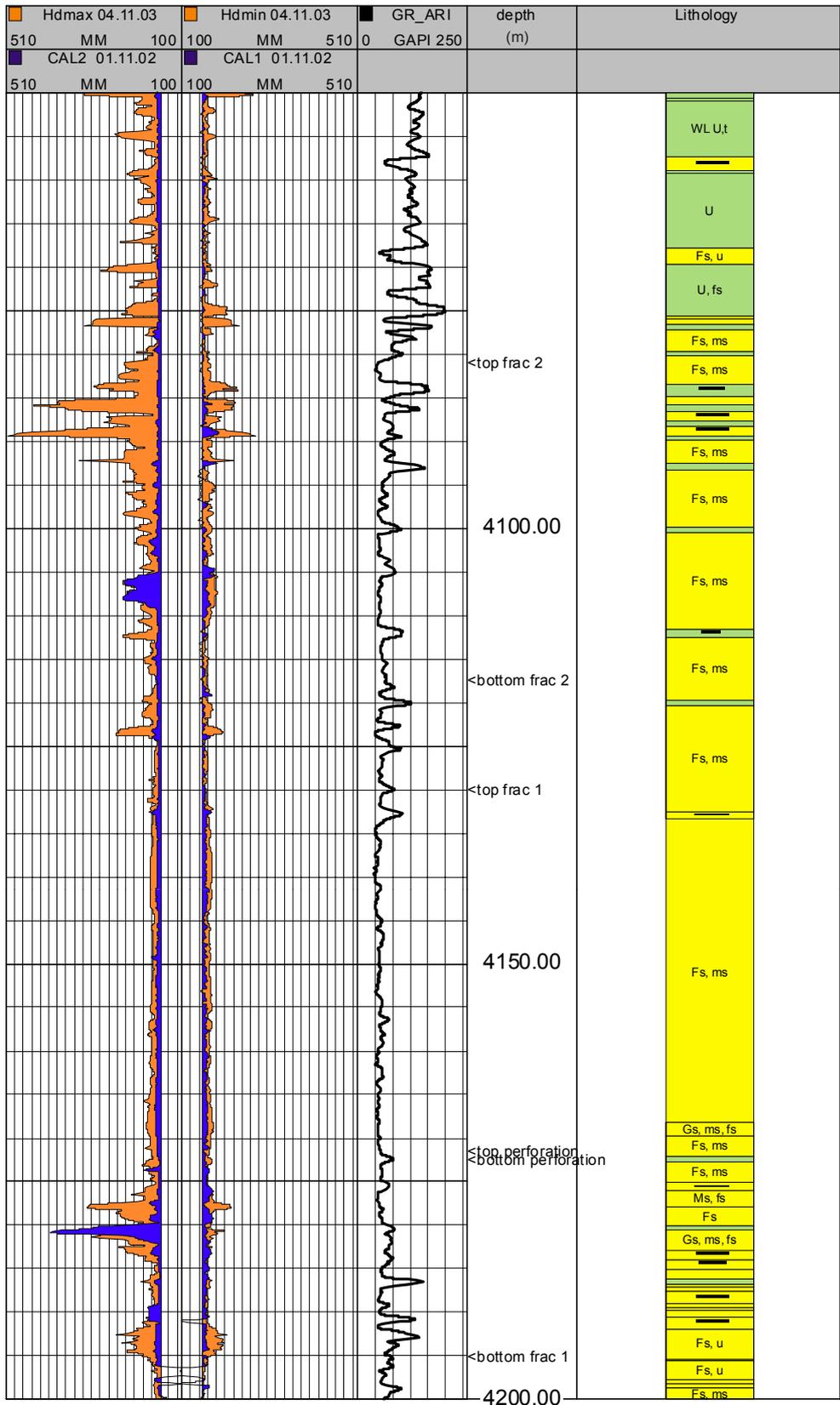


Bild 7.3.2: Vergleich der Kalibermessungen vor (blau) und nach (orange) dem 1. Wasserfrac (Februar 2003) in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90. Die stärksten Bohrlochrandausbrüche sind in den stimulierten Abschnitten festzustellen: 4082 bis 4117 m sowie 4130 bis 4195 m. Signaturen der lithologischen Kolumne siehe Bild 7.3.1.

In Bild 7.3.2. sind die Bohrlochabschnitte der abgepackerten Sandsteinfracs dargestellt, 4082 bis 4117 m sowie 4130 bis 4195 m. Darin kann man erkennen, dass die Schluffsteine bzw. die geringmächtigen Sand-Schluffstein-Wechselagerungen im oberen Fracabschnitt zu Ausbrüchen neigen und somit durch die hydraulischen Stimulationen geschädigt worden sind. Beim unteren Frac sind vorwiegend Bereiche in engräumigen Wechselagerungen von Ausbrüchen betroffen. Die homogenen Sandsteine dagegen zeigen überwiegend maßhaltiges Kaliber.

7.4 Lithologische Differenzierung

mit Beiträgen von H.-G. Holl

Mit Hilfe der Bohrlochmessfahrten HNGS und RST im November 2003 wurde ein detailliertes lithologisches Profil des offenen Bohrlochabschnitts der Bohrung Groß Schönebeck erstellt (Holl et al., 2004). Die HNGS Daten dienen einer lithologischen Klassifizierung des offenen Bohrlochabschnitts (Bild 7.4.1). Aus den Daten des RST können die Gehalte an Tonmineralen, Karbonaten, Anhydrit sowie der Gesamtgehalt von Quarz, Feldspat und Glimmer in den sedimentären Gesteine modelliert werden. Mit den Daten aus dem FMI konnte bestätigt werden, dass ab 4280 m bis zur Endteufe 4309 m Gesteine des Karbon anstehen. Die Lithologie ist in Bild 7.4.2 wiedergegeben. Die Lithosäule enthält eine Klassifizierung der Sedimentgesteine von tonig (links) über sandig (mitte) bis grobklastisch (conglomerate, rechts). Im Abschnitt von 4040 bis 4220 m konnte eine Feinaufnahme aus Bohrkernuntersuchungen erfolgen. Mit dem FMI konnte in den Sedimenten des Karbon eine NNE vergente Mulde in den klastischen Sedimenten des Karbon abgebildet werden (Bild 7.5.3). Die stratigraphische Stellung ist vermutlich Visé.

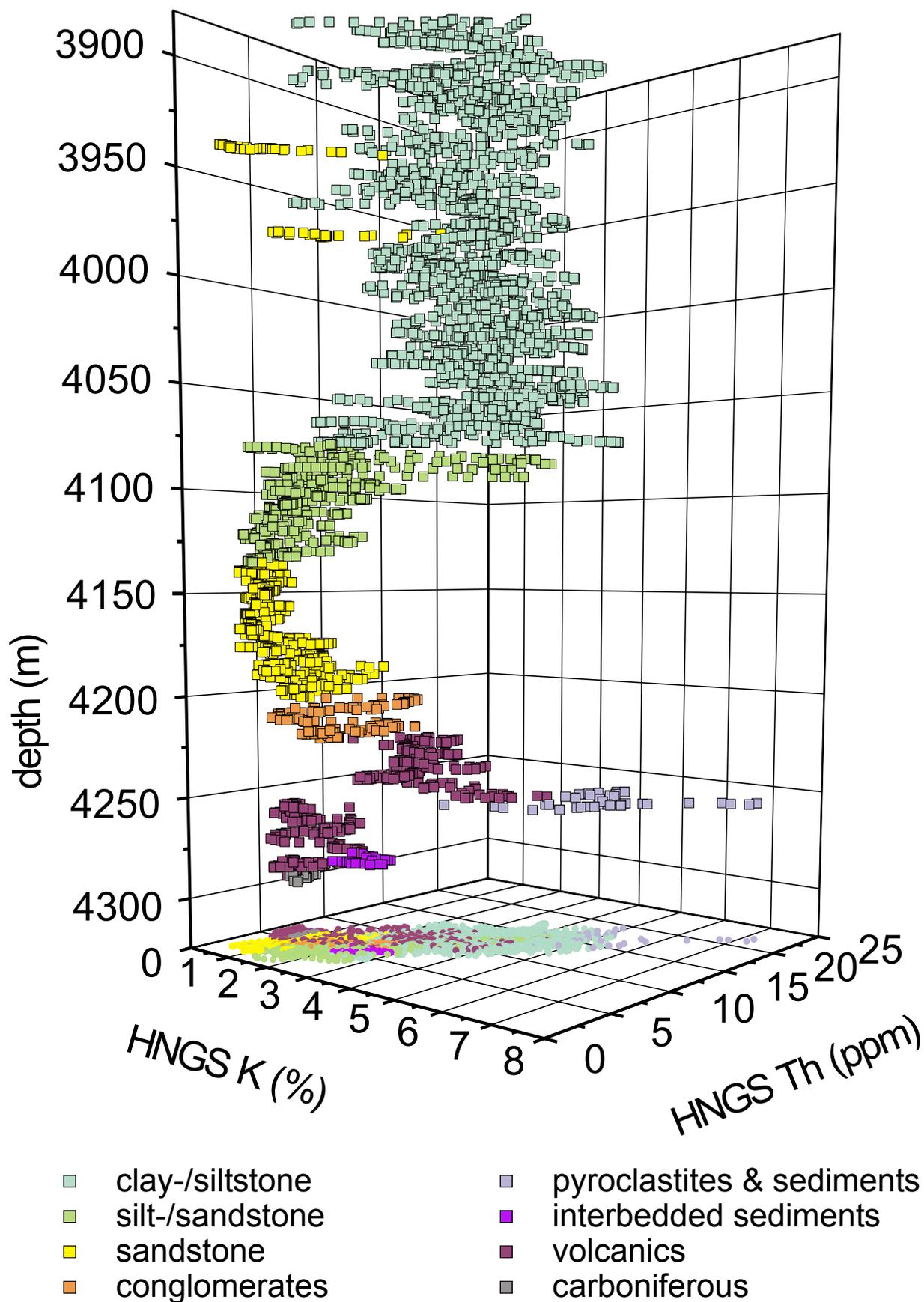


Bild 7.4.1: Spektrales Gamma Ray Log (HNGS), Bohrung Groß Schönebeck 3874 - 4300 m (Holl et al., 2004).

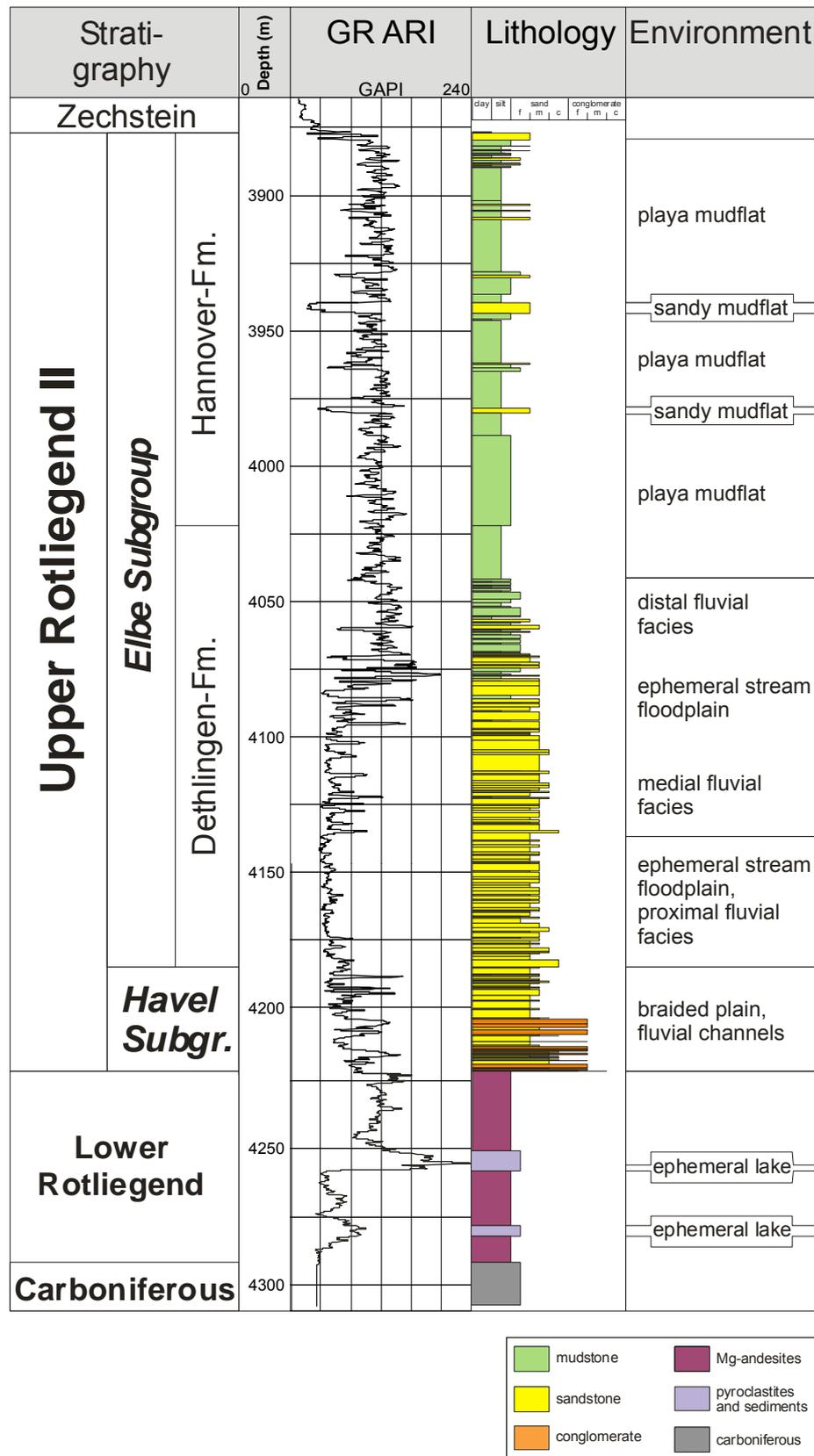


Bild 7.4.2: Lithologisches Profil der Bohrung Groß Schönebeck nach Vertiefung auf 4309 m im November 2003 (Holl et al., 2004). Dargestellt sind Stratigraphie, Tiefe, Gamma Ray, Lithologie und Bildungsmilieu im offenen Bohrlochabschnitt. Die Lithosäule enthält eine Klassifizierung der Sedimentgesteine von tonig (links) über sandig (Mitte) bis grobklastisch (conglomerate, rechts).

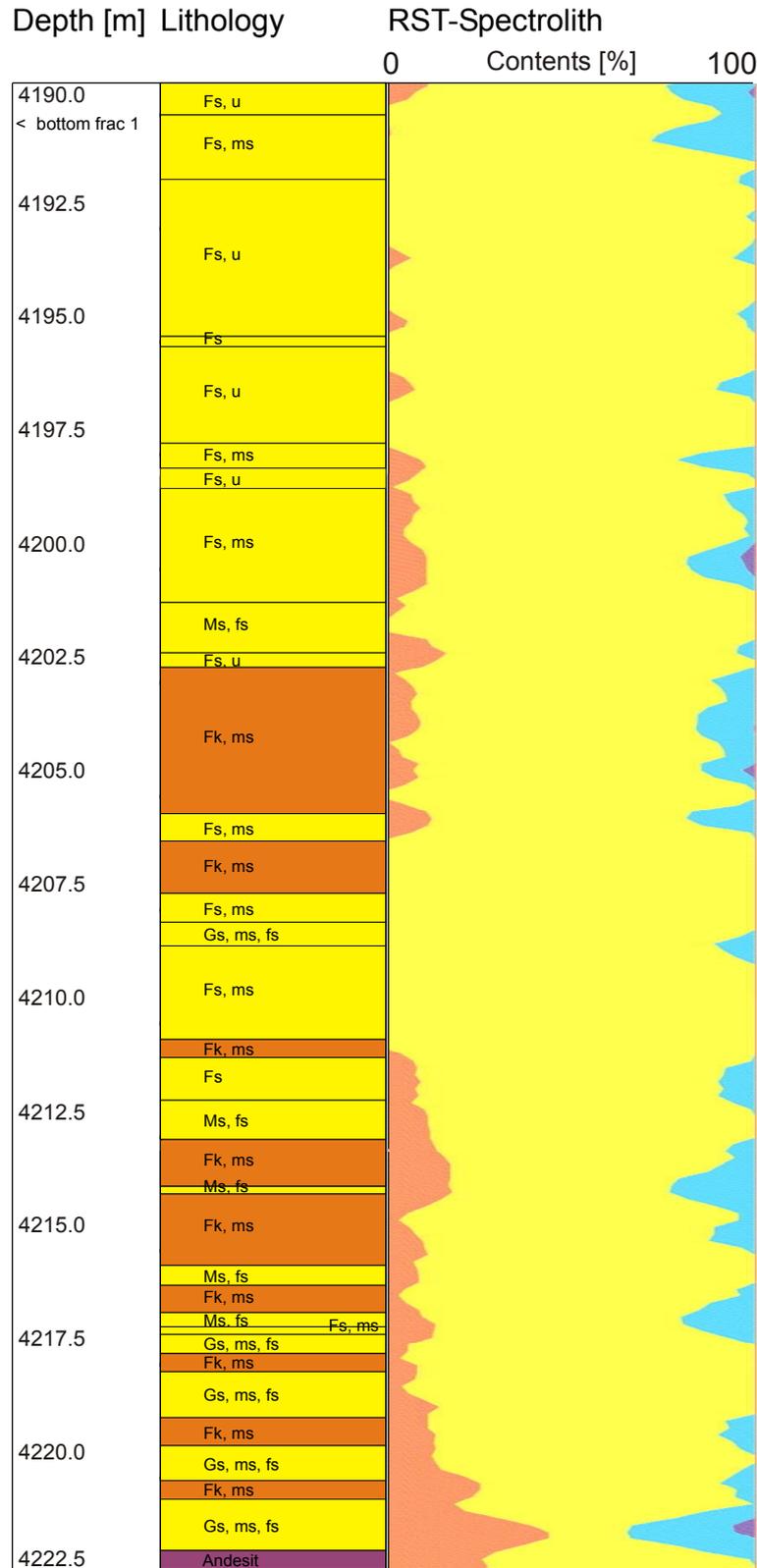


Bild 7.4.3: Reservoir Saturation Logging Tool (RST) in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90. Teufenabschnitt 4190 bis 4222 m (Übergang von Sandsteinen zu Konglomeraten). Dargestellt sind die Lithologie (mittlere Spalte, Farbcode wie in Bild 1.5.4.2) sowie die modellierten Mineralgehalte aus der Neutronenstreuung (rechte Spalte): Tone (rot); Summe von Quarz, Feldspat, Glimmer (gelb) und Karbonate (blau) und Anhydrit (lila).

7.5 Strukturabbildende Verfahren

mit Beiträgen von H.-G. Holl und M. Pischner

In der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 konnten die zwei strukturabbildenden Bohrlochmessverfahren ABF und FMI gefahren werden, allerdings bei verschiedenen Bohrlochsituationen: ABF nach den abgepackerten Sandsteinfrac und dem Produktionstest (Februar 2001, Oktober 2001 und Oktober 2002), FMI nach dem massiven Wasserfrac und Räumen der Bohrung (November 2003). Aus dem Vergleich beider Verfahren erkennt man zunächst einen deutlichen Vorteil in der Datenqualität des FMI, was durch die höhere Auflösung begründet ist (Bild 7.5.1). Die Aufbereitung der ABF Daten erforderte einen hohen Aufwand infolge gestörter Daten und azimuthaler Versätze in den Daten des Orientierungstools (Pischner et al., 2004). Die FMI Daten wurden fertig prozessiert von der Servicefirma (Schlumberger) übernommen.

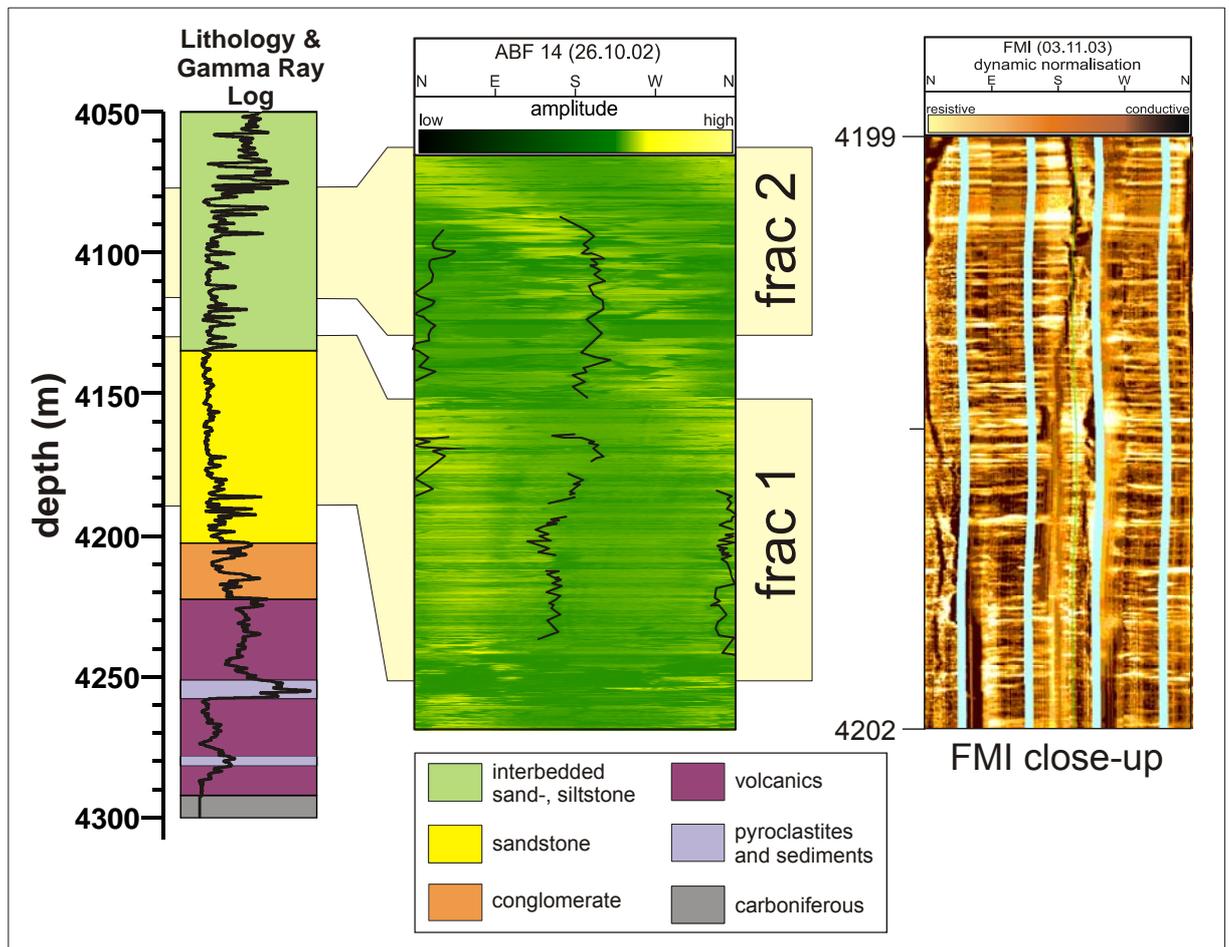


Bild 7.5.1: Lithologie und Gamma Ray sowie Strukturlogging ABF und FMI des offenen Bohrlochabschnitts im Vergleich (Holl et al., 2004). Die ABF- und FMI-Abbildungen zeigen die vertikal stehenden, durch Stimulation erzeugten Risse in der Bohrlochwand. Diese sind parallel zur maximalen horizontalen Hauptspannung (S_H) orientiert.

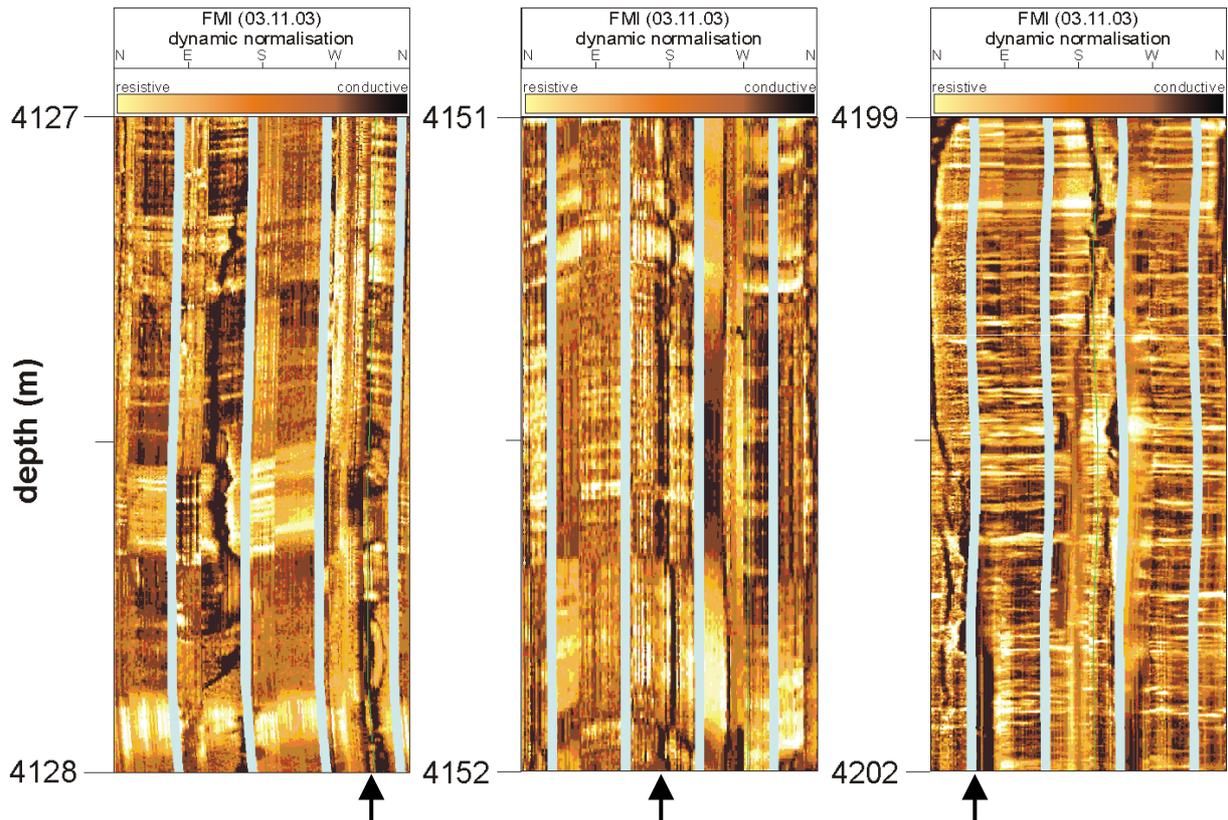


Bild 7.5.2: Ausschnitte aus dem FMI Log, Bohrung Groß Schönebeck. Der etwa NNE-SSW verlaufende vertikale Riss in der Bohrlochwand ist deutlich zu erkennen (siehe Pfeile).

Mit der FMI-Messung konnte ein vertikaler Riss von ca. 170 m Länge abgebildet werden, der spätestens im Experiment zu Jahresbeginn 2003 erzeugt wurde, davon etwa 30 m im Vulkanit. Unterhalb von 4260 m (Tuffite) finden sich keine induzierten Risse mehr. Aus hydraulischen Daten konnte eine vertikale Risslänge von etwa 100 m für den gesamten offenen Bohrlochabschnitt abgeschätzt werden (Kap. 4.5).

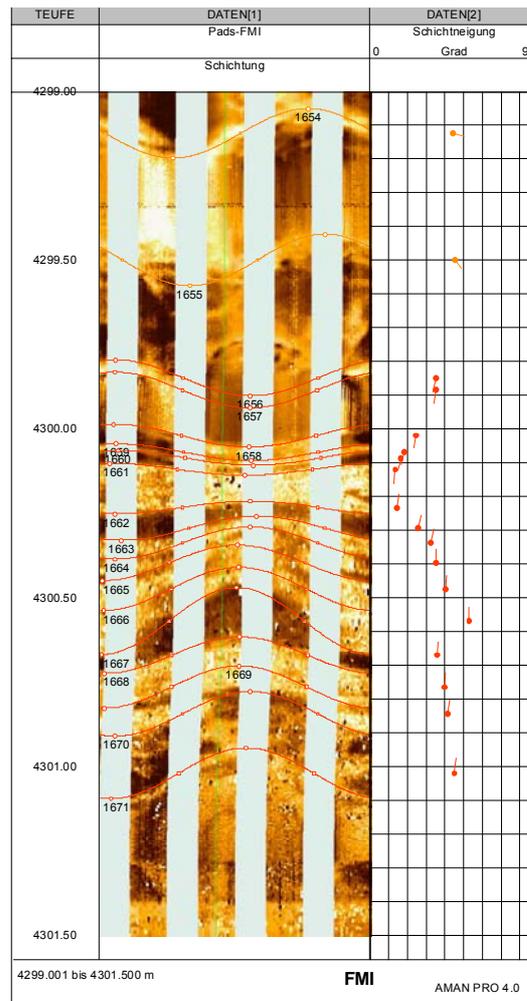


Bild 7.5.3: NNE vergente Mulde in klastischen Sedimenten (Turbidite) des Karbon in 4300 m Tiefe. Die oberhalb sichtbaren orangefarbenen Dip-Richtungen sind die senkrecht zur Faltenachse orientierten ac-Klüfte.

7.6 DTS Messungen

mit Beiträgen von K. Erbas und J. Henninges

Mit der faseroptischen DTS-Temperaturmesstechnik (Distributed Temperature Sensing) können Temperaturprofile quasi-kontinuierlich mit hoher zeitlicher Auflösung gemessen werden. Der Einsatz kann entweder mit Bohrlochmesskabeln (wireline) erfolgen (z. B. Hurtig et al., 1993; Förster et al., 1997, Büttner and Huenges, 2003) oder der faseroptische Sensor wird hinter der Verrohrung fest in der Bohrung installiert (Henninges et al., 2003). Als Messgeräte werden am GeoForschungsZentrum Potsdam seit 1992 Apparaturen der Firma SENSE (früher Yorck Sensors) verwendet. Für den Einsatz in Tiefbohrungen wurde in Kooperation mit NKT Cables Inc. ein spezielles Bohrlochmesskabel entwickelt, welches für eine Einsatztemperatur bis 200 °C spezifiziert ist. Dieses Kabel kam in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 zum Einsatz. Somit liegen erstmalig DTS-Messdaten eines Wireline-Systems in Tiefen bis 4250 m vor.

Mit dem DTS-Messkabel wurde in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 die Temperatur der kompletten Bohrlochstrecke vermessen. Ziel dabei war, den Prototyp des Kabels für die Charakterisierung der hydraulisch aktiven Zonen zu verwenden: es sollte möglichst der interne Aufbau des stimulierten Bereiches erfasst werden. Drei Monate nach dem 2. massiven Wasserfrac im November 2003 (siehe Kap. 4.4) wurden etwa 100 m³ kaltes Wasser in die Bohrung gepumpt und anschließend die Temperaturen mittels DTS-Technik und zusätzlichen Messfahrten einer p/T-Sonde zur Überprüfung und Kalibrierung des Prototyps durchgeführt.

Bild 7.6.1 zeigt das Ergebnis der ersten DTS-Messungen über einen Zeitraum von 10 Stunden beginnend etwa 12 Stunden nach der Kaltwasserinjektion zusammen mit dem Temperaturprofil einer Bohrlochsondenfahrt vom 28.04.2004.

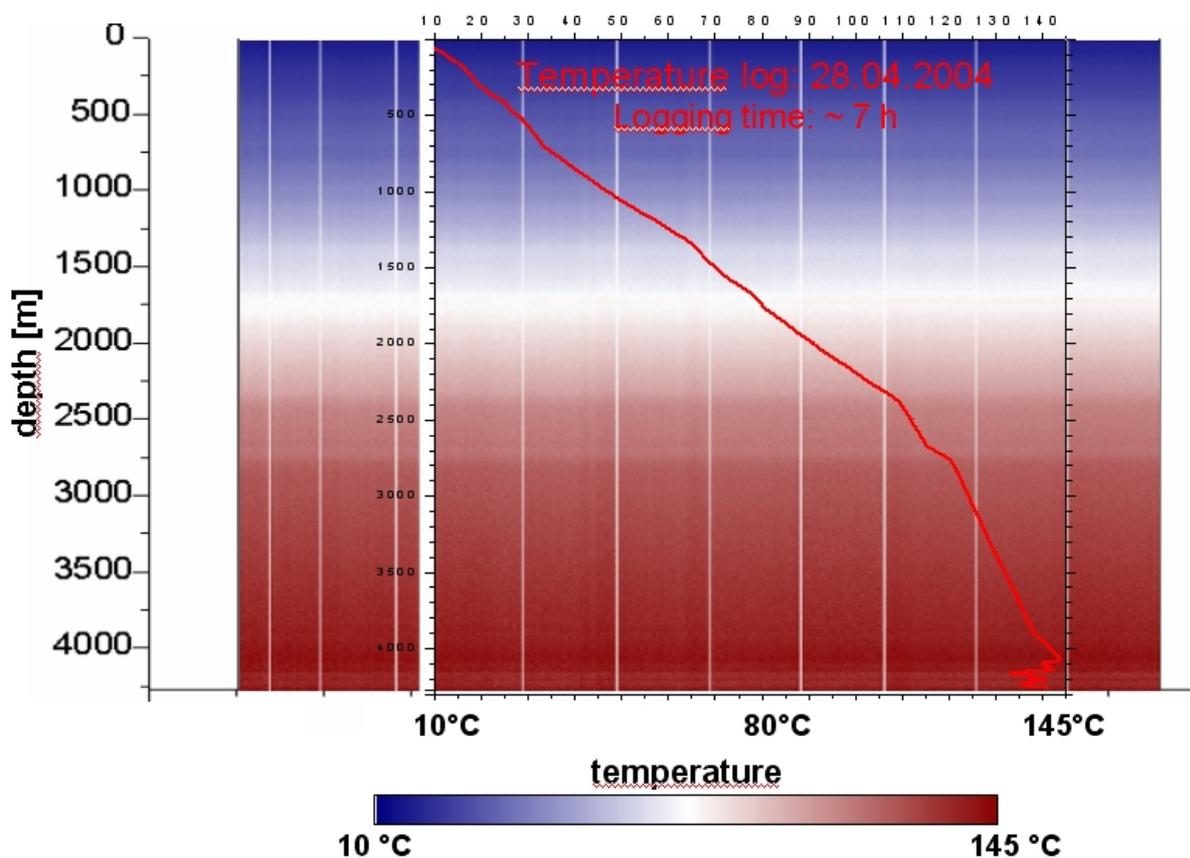


Bild 7.6.1: Rohdaten der ersten wireline DTS-Messungen in Groß Schönebeck vom 03.03.2004 21:01 bis 04.03.2004 7:32. Die Messserie enthält 1924 Profile mit ca. 8,1 Millionen Temperaturwerten. Die Übereinstimmung mit den nachfolgend gemessenen p/T Sondenfahrten ist hervorragend. Im unteren Bereich sind die Temperatursignale der Injektions- und Stimulationsversuche deutlich zu erkennen.

Betrachtet man den stimulierten Bereich genauer (Bild 7.6.2), so kann man neben einer schwachen zeitlichen Änderung zum ersten Mal deutlich die interne Strukturierung des stimulierten Bereiches erkennen.

Dieses Ergebnis wird durch die Daten eines weiteren Einsatzes der DTS-Temperaturmeßtechnik 6 Wochen später zusätzlich belegt (Bild 7.6.3). Zwei hydraulisch aktive Zonen (**Ia**, **Ib**) existierten bereits vor den massiven hydraulischen Stimulationen. Nach dem Experiment wurde eine dritte Zone (**II**) im Bereich des gelochten Liners nachgewiesen. Diese dritte Zone wurde durch die Stimulation innerhalb der Konglomerate und Vulkanite erzeugt, die unterhalb der Rotliegend Sandsteine liegen.

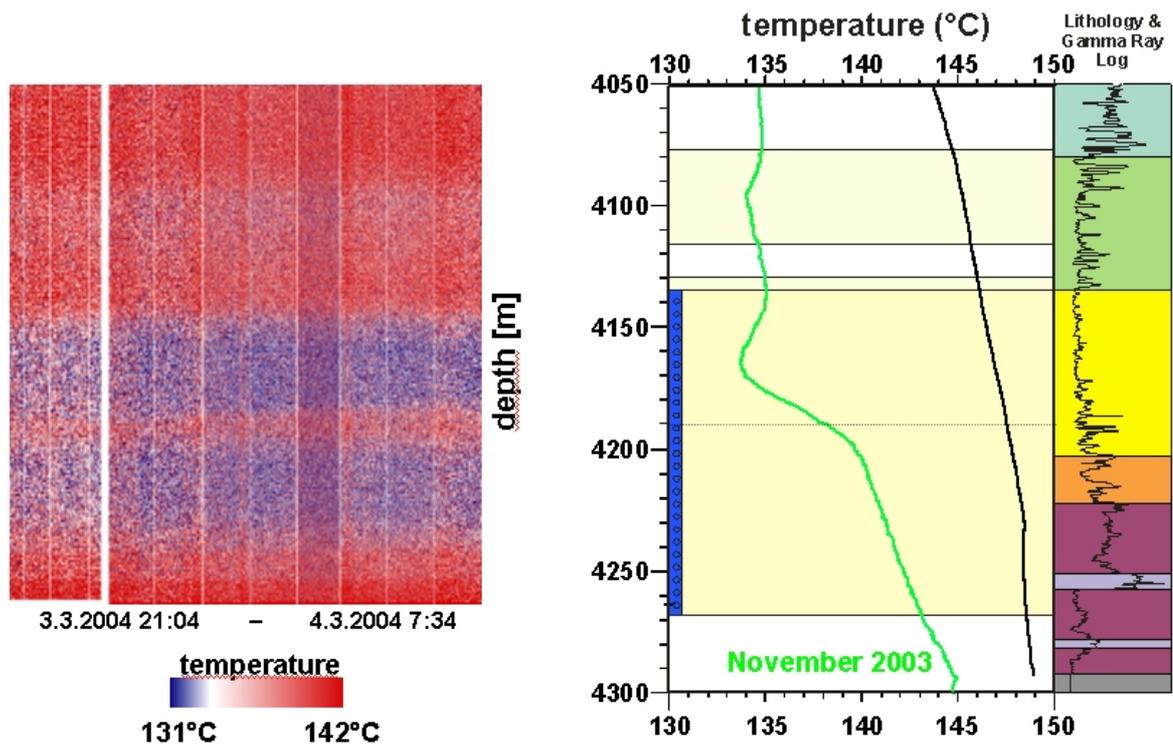


Bild 7.6.2: Zeitlich-räumliche Temperaturentwicklung im untersten Bohrlochbereich während der ersten wireline DTS-Messungen vom 03.03.2004 bis 04.03.2004. Deutlich ist die Zweiteilung des Temperatursignals im durch die perforierte Verrohrung angeschlossenen Stimulationsbereich zu erkennen, was zum ersten Mal einen Hinweis auf die räumliche Verteilung der stimulierten Bereiche bietet. Die zunehmende Fokussierung auf diese Bereiche im Verlauf der Messzeit deutet darauf hin, dass die Störung durch die Kaltwasserinjektion schnell abklingt und danach die Temperatursignatur der massiven Stimulation überwiegt, siehe auch Bild 7.6.3.

Die hier dargestellten Ergebnisse belegen die Durchführbarkeit von Wireline DTS-Messungen in Tiefen über 4 km und Temperaturen von 143 °C in salinaren Formationsfluiden. Damit können mit Hilfe dieser Technologie wichtige Eingangsgrößen für thermo-hydraulische Modellrechnungen über das aufgeschlossene Reservoir erhalten werden.

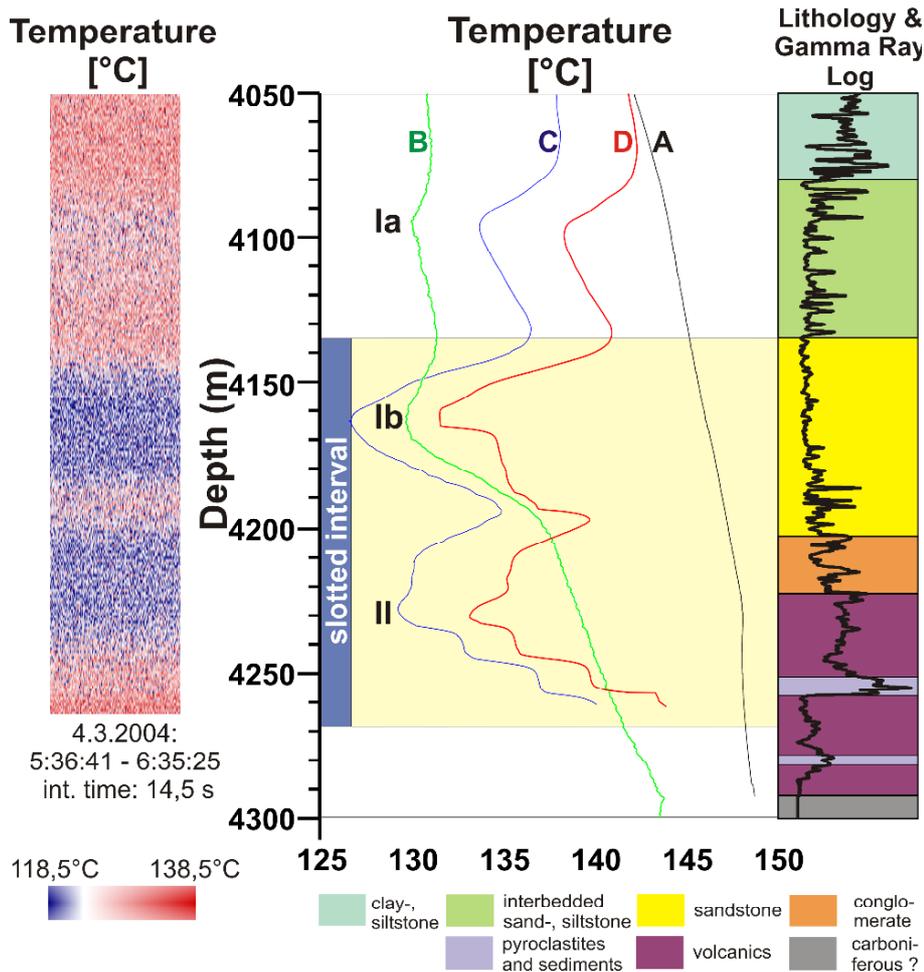


Bild 7.6.3: Temperaturmessungen nach Kaltwasserinjektionen in stimulierte Horizonte im Vergleich mit Temperaturmessungen vor der Stimulation (Henniges et al., 2005). Links: Temperatur-Tiefen-Zeit-Verlauf. Mitte: Temperaturmessungen zu verschiedenen Zeiten, **A:** nach Aufwältigung Oktober 2001, **B:** vor der massiven Stimulation 4. November 2003, **C:** 5. März 2004 nach der massiven Stimulation und **D:** 28. April 2004. Hydraulisch aktive Zonen sind bezeichnet als **la**, **lb**, **II** (siehe Text). Rechts: Lithologie und Gamma Ray.

7.7 Lernpunkte Bohrlochmessungen und Forschungsbedarf

In der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 konnte ein umfangreiches Loggingprogramm erfolgreich durchgeführt werden, das technische Bohrlochinspektionen, Standard-open-hole sowie experimentelle Bohrlochmessungen umfasste. Teilweise waren Wiederholungen von vergleichbaren Messverfahren vor und nach dem 1. massiven Wasserfrac möglich, z. B. Kaliber, Spektrales Gamma Ray sowie Druck und Temperatur und – eingeschränkt – elektrischer Widerstand.

Das technische Logging umfasste die Inspektion der 9 5/8“-Verrohrung im November 2003 mit einem 16-Arm-Multiarmkaliber. Diese Messungen haben sich bewährt und zeigen kompatible Ergebnisse zu der 60-Arm-Multiarmkalibermessung vom Dezember 2000. Es konnte bestätigt werden, dass die Verrohrung sich in diesem Zeitraum praktisch nicht weiter deformiert hat.

Eine Reihe von Standard open-hole Bohrlochmessverfahren wurden in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 erfolgreich eingesetzt, wie Mudparameter (Druck, Temperatur, Spülungswiderstand), Flowmeter bei Fluidspiegelabsenkung und Borehole Compensated Sonic, letzteres mit Einschränkungen an den Stellen mit großen Bohrlochrandausbrüchen. Hier sollte künftig ein Dual Sonic Imager vorgezogen werden.

Die Messung des elektrischen Gebirgswiderstandes hat eine große Bedeutung zur Identifizierung von Fluidzuflußzonen und Gebirgsauflockerungen infolge von Stimulationen. Sowohl Dual Induction log wie auch Dual Laterolog weisen zum Teil sehr niedrige elektrische Widerstände in den höffigen Zonen aus. Einschränkend ist jedoch, dass die eingesetzten Geräte verschieden kalibriert sind, so dass die Einzelmessungen nur relativ vergleichbar bleiben. Mit dem Azimutal Resistivity Imager kann eine winkelabhängige Auflösung des elektrischen Widerstandes in drei verschiedenen Eindringtiefen erzielt werden. Damit könnten fracinduzierte Risse lateral beobachtet werden. In der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 konnte das Orientierungstool aus technischen Gründen nicht mitgeföhren werden, so dass nur die integralen Messwerte Laterolog deep und Laterolog shallow zur Verfügung stehen. In Verbindung mit dem Vertikal Elektroden System können nun auch Aussagen über Radien bis zu 25 m um das Bohrloch erfolgen. Dieses Gerät der Universität Leipzig konnte sowohl in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 wie auch in der Kontinentalen Tiefbohrung Oberpfalz (KTB-VB) erfolgreich eingesetzt werden.

Das Kaliber liegt in den Meßserien der Jahre 2000 bis 2002 als nicht orientierte Vier-Arm-Messung vor. Damit kann ein nicht-orientierter, großer und kleiner Halbachsenwert angegeben werden. Zur Bestimmung des Azimuths von Bohrlochrandausbrüchen ist künftig der Einsatz eines orientierten Sechs-Arm-Kaliber sinnvoll. Alternativ könnte auch ein Borehole Televiewer eingesetzt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Ergebnisse von den Dämpfungseigenschaften des Fluid beeinflusst werden können.

Die auf lithologische Differenzierung zielenden Messverfahren Spektrales Gamma Ray, Dichtelog sowie die auf Neutronenstreuung basierenden Logs (z. B. Reservoir Saturation Tool) konnten erfolgreich geföhren werden. Um das Risiko bezüglich des Einsatzes von radioaktiven Quellen zu vermeiden sollten Geräte verwendet werden, die mit Röntgen- bzw. Neutronengeneratoren arbeiten. Am Beispiel der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 zeigte sich, dass Gammadichte und Neutronendichte nicht direkt kompatible Ergebnisse lieferten. Die Dichte aus dem RST wird über das mineralogische Modell berechnet und weicht daher von der der Gamma-Gamma-Dichte ab.

Zur Erkennung von Strukturen in der Bohrlochwand hat sich der Formation Imager gegenüber dem Akustischen Bohrlochfernseher bzw. Borehole Televierwer als überlegen herausgestellt. Sedimentäre, tektonische wie auch durch Stimulationsarbeiten hervorgerufenen Strukturen können einwandfrei identifiziert und von einander unterschieden werden.

Mit der für die Kontinentale Tiefbohrung Oberpfalz entwickelten Sonde zur Messung des elektrischen Potentials und Redoxpotentials können neue Meßgrößen erschlossen werden. Die als Prototyp vorliegenden Geräte bedürfen einer technischen Anpassung für die Bedingungen in der Bohrung Groß Schönebeck, vor allem der Dichtelemente.

Als Innovation wurde die glasfaseroptische Temperaturmessung (DTS) erstmals erfolgreich in dem Temperaturbereich von über 140 °C und Tiefenbereich über 4 km eingesetzt. Die Entwicklung zu einem Logging- und Monitoringssystem ermöglicht neue Aussagemöglichkeiten bezüglich räumlich und zeitlich veränderlichen Fluidbewegungen im Bohrloch.

Der Einsatz von Messgeräten, die ausfahrbare Sensorarme mit Messelektroden (Pads) besitzen, ist mit erhöhtem Risiko behaftet. Das MSFL blieb in 4180 m hängen und konnte erst nach mehreren Zugversuchen geborgen werden. Das Pad war irreparabel beschädigt. Das FMI wurde in 4107 m fest und konnte mit Zugversuchen unter Verlust von einem der insgesamt vier Sensorflaps befreit werden. Hierfür sind die starken Bohrlochrandausbrüche vor allem in den Schluffsteinen verantwortlich.

8 Energieverfahrenstechnik

Bei der Komplettierung der geothermischen Stromerzeugungsanlagen im ober-tägigen Bereich sind zunächst Fragen zur Materialauswahl zu lösen. Insbesondere geht es um eine langzeitstabile Auslegung der Komponenten, die mit den heißen, salzhaltigen und gasführenden Fluiden in Berührung kommen (Kap. 8.1). In der Folge soll dann die Auslegung der Stromerzeugungsanlage hinsichtlich ihrer Effizienz in Energieumsetzung und konstruktivem Aufwand unter verschiedenen Bedingungen (Temperaturen, Fließraten) des Primärkreislaufs sowie der Kühlung betrachtet werden (Kap. 8.2).

8.1 Materialauswahl für Geothermieranlagen

mit Beiträgen von F. Kabus und B. Rohstock

Der Betrieb von Geothermieranlagen unterliegt spezifischen Bedingungen. Die technischen Anlagen sind warmen und meist hochsalinaren Wässern ausgesetzt. Dieser Themenkomplex der Auslegung von übertägigen Anlagen wurde als Teilaufgabe von Geothermie Neubrandenburg (GTN) bearbeitet.

Die generellen Einflussgrößen für die Materialauswahl sind:

- Temperatur der Thermalwässer,
- Zusammensetzung der Wässer - Anteil von Flüssig- bzw. Gasphase,
- Anlagengestaltung,
- Kosten - Nutzenaspekte.

Die in Deutschland existierenden Thermalwässer mit Temperaturen über 100 °C treten tiefenabhängig in folgenden geologischen Formationen auf:

- Malmkarst (Süddeutsches Molassebecken),
- Rotliegend-Sandsteine des Norddeutschen Beckens,
- Unterkreide bis Rhätkeuper des Norddeutschen Beckens,
- Rotliegend-Sandsteine und Buntsandstein des Oberrheingrabens.

Die Tiefenwässer der oben genannten Formationen unterscheiden sich hinsichtlich der Mineralisation sehr stark voneinander. Die Wässer des Malmkarsts sind schwach mineralisiert, während die Fluide der Rotliegend-Sandsteine Mineralisationen bis 265 g/l aufweisen.

Die hinsichtlich der Materialauswahl relevanten Parameterbereiche für die hochsalinaren Fluide des Norddeutschen Beckens und des Oberrheingrabens sowie des süddeutschen Malmkarsts sind in Tabelle 8.1.1 zu finden.

Die Einflussgröße **Temperatur** ist im Zusammenhang mit den korrosiv wirkenden Bestandteilen der Flüssig- und Gasphase sowie hinsichtlich der geforderten Druckfestigkeit von Bedeutung.

Die höchsten thermischen Beanspruchungen bestehen in den Anlagenteilen von Förderhorizont bis einschließlich Wärmetauscher, z. B. Verdampfer und Vorwärmer der ORC-Anlage. Im Auslauf dieser Baugruppe betragen die Temperaturen der Thermalwässer dann 70 °C oder weniger. Für dieses Temperaturniveau liegen Erfahrungen durch den Betrieb der geothermischen Anlage in Neustadt-Glewe vor.

Die **Gasgehalte** als auch die Zusammensetzung des Gasanteils beeinflussen die Anlagengestaltung in starkem Maße. So stellen mögliche Kalkausfällungen bei der Entlösung von CO₂ für den Anlagenbetrieb sowie die Reinjektion der Wässer eine große Gefahr dar. Methan in der Gasphase führt bei Aufkonzentrierung zur Bildung von explosiven Gemischen. H₂S selbst ist ein sehr starkes Gift, leicht entzündbar und wirkt korrosiv.

Tabelle 8.1.1: Eigenschaften der Fluide der Sedimentbecken in Norddeutschland, Rheingraben und Süddeutschland.

Eigenschaft	Norddeutsches Becken und Rheingraben	Süddeutscher Malmkarst	Bedeutung
Temperatur (°C)	100 bis ca. 150	60 bis 100	Materialfestigkeit, Korrosion
pH-Wert	4,8 bis 6	7,1	Korrosion
Salzgehalt (g/l)	100 bis 300	0,3 bis 1,5	Korrosion
Chlorid (mg/l)	bis 180.000	10 bis 500	Korrosion
Eisen (mg/l)	bis 200	meist <1	Ausfällung bei Sauerstoffkontakt
Silikat (mg/l)	-	temperaturabhängig	Ausfällung
Blei (mg/l)	bis 200	-	Elektrolyt. Ablagerungen, Gefahr durch Radioaktivität
Barium (mg/l)	-	0,1	keine Bedeutung
Gasgehalte (Vol.- %)	20 bis 50	< 10	Entgasung, Ausfällungsgefahr, Gefahr durch CH ₄ und H ₂ S
CO ₂ (Vol.-%)	2 bis 70	5 bis 10	Karbonatausfällung bei Entgasung
H ₂ S (mg/l)	Meist nur Spuren	1 bis 15	H ₂ S ist sehr giftig! Korrosion
Methan (Vol.- %)	5 bis 15	40	Explosionsgefahr

Die angesprochenen Parameter und deren Einflüsse auf die Materialauswahl stehen in engem Zusammenhang zueinander und können nicht losgelöst voneinander betrachtet werden.

Bei der Anlagenauslegung stehen Sicherheit, Langlebigkeit und niedrige Betriebskosten im Vordergrund. Die wesentlichen beeinflussenden Faktoren bei der Gestaltung der Geothermieanlagen sind Systemdruck und Korrosionsresistenz. Durch den Systemdruck werden die Anlagenstabilität und damit Verfahrenssicherheit, Gasentlösung mit Ausfällungsgefahr sowie das Handling dieser Gase beeinflusst.

Durch die Förderung (Druckentlastung) und anschließende Auskühlung der Wässer ändert sich deren Chemismus nennenswert. Es besteht die Gefahr, dass durch die Abkühlung die Sättigungsgrenzen einzelner Verbindungen überschritten werden und es zu Ausfällungen kommt. Durch die Druckentlastung kommt es zur Gasentlösung. Damit ist die Bildung einer Zwei-Phasen-Strömung verbunden. In Abhängigkeit von der Zusammensetzung kann es auch zu Ausfällungen kommen. Die Auslegung soll daher folgende Ziele optimal miteinander vereinbaren

- Geringer Anlagendruck zur Minimierung der Investitionsaufwendungen bzw.
- Anlagendruck soll Gasentlösung und Ausfällungen vermeiden.

Fluide von Groß Schönebeck

Das Tiefenwasser der Bohrung Groß Schönebeck beinhaltet ca. 1 Nm³ Gas pro m³ Thermalwasser. Das Gas besteht zu 80 % aus Stickstoff; 14,9 % Methan; 4,6 % Kohlendioxid und 0,5 % Sonstige. Bei dieser Zusammensetzung kann eine Gasentlösung nicht verhindert werden. Bereits bei einem Druck kleiner 24 MPa (bei 150 °C) liegt ein Gas-Wasser-Gemisch vor. Die wesentlichen Eigenschaften der Gasphasen sind:

Stickstoff: Inertes Gas, Entnahme aus der Thermalsole führt zu keiner Veränderung des chemischen Gleichgewichtes.

Methan: Bei den geplanten Förderraten in Groß Schönebeck in Höhe von 50 bis 75 m³/h werden ca. 7,45 bis 11,2 m³ Methan je Stunde frei. Als technisch sinnvolle Verwertung würde sich ein Verbrennen zur Wärmeengewinnung anbieten, was aber zu zusätzlichen technischen Aufwendungen führt.

Kohlendioxid: In der Thermalsole von Groß Schönebeck führt CO₂-Entlösung zu Karbonat-Ausfällungen.

Entsprechend der vorliegenden Berechnungen in Kap. 2.6 beginnt die CO₂-Entgasung am Standort Groß Schönebeck bei Drücken kleiner 0,75 MPa.

Allerdings kann aus diesem Ergebnis nicht gefolgert werden, dass höhere Systemdrücke eine CO₂-Entgasung verhindern. Im realen Prozess bilden sich z. B. durch turbulente Strömungen oder an Einschnürungen, wie in Drosselquerschnitten von Armaturen, auch bei wesentlich höheren Gesamtdrücken Zonen mit statischen Drücken unter dem Entgasungsdruck, so dass CO₂-Entgasung eintritt. Es ist in der gesamten übertägigen Anlage mit einer Zwei-Phasen-Strömung zu rechnen. Bei einer energetischen Nutzung der Fluide am Standort Groß Schönebeck muss

- eine Abtrennung von Methan sowie
- eine entsprechende Druckhaltung zur Minimierung von Ausfällungen

realisiert werden.

Zur Minimierung der Ausfällungsproblematik wird vorerst ein Anlagendruck von 1,6 MPa angenommen und unter dieser Randbedingung die Materialrecherche durchgeführt. Diese Größe wurde gewählt, da für diesen Druckbereich handelsübliche Aggregate erhältlich sind und keine Sonderkonstruktionen erforderlich werden.

Korrosionsbeständige Materialien

Die Materialien für Geothermieranlagen müssen entsprechende Temperaturbeständigkeit im Dauereinsatz gewährleisten und dürfen keine (oder nur geringfügige) Korrosion aufweisen.

Als Korrosion wird generell die unerwünschte Zerstörung von Werkstoffen durch chemische oder elektrochemische Reaktionen an der Oberfläche infolge äußerer Einflüsse (Sauerstoff, Feuchtigkeit, aggressive Dämpfe, Lösungen oder Salzsäuren) bezeichnet. Unter Korrosion von Metallen versteht man die langsame Oxidation ihrer Oberfläche. Dabei spielt die Bildung sehr kleiner galvanischer Zellen auf der Metalloberfläche, so genannte Lokalelemente, eine große Rolle. Sie können in relativ kurzen Zeiträumen zur Zerstörung von Anlagenteilen führen (z. B. durch Lochfraß).

Ergebnisse der Materialrecherche

Geothermieranlagen mit Temperaturen im Bereich von 150 °C und einer Wasserzusammensetzung analog Groß Schönebeck können bis auf einige Ausnahmen aus marktüblichen korrosionsresistenten Ausrüstungskomponenten gebaut werden. Dies ergaben die in der Studie von GTN angestellten Recherchen und Bewertungen. Sowohl Rohrleitungen als auch Druckbehälter, Filter (einschließlich Filterelemente) und Klappen sind in entsprechenden Qualitäten auf dem Markt verfügbar.

Die wesentliche Ausnahme bilden Regelarmaturen, Sicherheitsventile und Sensoren für pH-Wert und Redoxpotenzial. Für diese Ausrüstungsteile muss auf

„konventionelle“ Armaturen mit entsprechend geringer Lebensdauer (hoher Verschleiß) zurückgegriffen werden bzw. eine kontinuierliche Erfassung der Parameter pH-Wert und Redoxpotenzial kann nur in einer separaten Messstrecke nach Druck- und Temperaturreduzierung möglich gemacht werden.

Eine weitere Besonderheit ist zu beachten. Für eine Anlagenkonfiguration mit einem Systemdruck von 1,6 MPa - zur Minimierung der Ausfällungsgefahr - sind derzeit keine entsprechenden Verpresspumpen erhältlich, die bei dieser Wasserzusammensetzung eine weitere Druckerhöhung ermöglichen. Auch hier muss auf konventionelle Pumpen zurückgegriffen werden. Diese Variante ist machbar, falls der Einsatz von Verpresspumpen auf kurze Zeitintervalle im Harvariefall begrenzt bleibt und nicht für den Dauerbetrieb erforderlich ist.

Die vorliegende Recherche nach Stand der Technik kann Richtlinien für die Materialauswahl der übertragigen Anlagen liefern. Im folgenden Abschnitt wird über die Auslegung der eigentlichen Stromerzeugungsanlage berichtet.

Tabelle 8.1.2 folgende Seite: Übersicht zur Recherche Materialauswahl für geothermische Anlagenbauteile.

Ausgewählte Komponenten	Temperaturbeständigkeit		Druckbeständigkeit		Bemerkungen
	<150 °C	150 °C	<1,6 MPa	1,6 MPa	
Rohrleitungen und Formstücke					
Titanrohrleitungen		Ja		ja	sehr teurer Werkstoff, sehr gute Korrosionsbeständigkeit
Stahlleitung mit Epoxydharz		Ja		ja	bewährt in der Erdöl-Erdgasbranche
Stahlleitungen mit PTFE		Ja		ja	bewährt in der chemischen Industrie
Stahlleitung mit Polyamid (Rilsan B)	ja (130 °C)	nein		ja	Trinkwasserbereich, unbeständig gegen starke Säuren
GFK mit PTFE		Ja	ja	nein	Druckbeständigkeit abhängig von Temperatur, "leichter" Werkstoff im Vergleich zu Stahl, nur wenige Firmen
GFK	ja	nein	ja	ja, aber nur bis 104 °C	bewährter Werkstoff für Geothermieranlagen
Filterbehälter					
Stahl mit Epoxydharz		Ja		ja	preiswerte Variante
Stahl mit E-CTFE (Halar)		Ja		ja	Neustadt-Glewe: Blasenbildung
Stahl mit Nickelbasislegierungen (z.B. Hastelloy)		Ja		ja	sehr teurer Werkstoff, sehr gute Korrosionsbeständigkeit
Filterelemente (Filterfeinheit 10 µm)					
Polyester		Ja			keine Druckbeständigkeit erforderlich
Nomex		Ja			
Fluorpolymere		Ja			
Ryton (Polyphenylensulfid)		Ja			
Dichtungen, Membrane, Kompensatoren*					
EPDM, EPM		Ja			* Druckbeständigkeit von Kompensatoren nur durch Edelstahlumkleidung, teuer
Teflon		Ja			
FPM (Fluorkautschuk)		Ja			
FFKM (Perfluorelatomer)		Ja			
MVQ (Methyl-Vinyl-Silicon Kautschuk)		Ja			
Messtechnik					
pH-Wert-Elektrode	110 °C		< 0,69 MPa		keine pH-Wert- und Redoxelektrode für die geforderten Einsatzbedingungen am Markt vorhanden, Meßtechnik nur im Bypass bei definierten Bedingungen einsetzbar
	80 °C		< 1,0 MPa		
Redoxpotential	135 °C		< 0,6 MPa		

8.2 Geothermische Stromerzeugungsanlagen

mit Beiträgen von S. Köhler

Parallel zu den Stimulationsarbeiten und Materialrecherchen wurde innerhalb des Projektes an der Optimierung von geothermischen Stromerzeugungsanlagen gearbeitet.

Ein geothermisches Kraftwerk setzt sich aus drei sehr unterschiedlichen Komponenten zusammen: der Untergrund, der die Wärme liefert und mit geologischen Methoden erkundet werden muss, der Thermalwasserkreis, in dem eine angepasste Verfahrenstechnik den dauerhaft sicheren Betrieb der Anlage – sowohl untertage als auch übertage – gewährleistet und das Kraftwerk selbst, das auf das niedrige Temperaturniveau und das geringe Enthalpiegefälle hin optimiert werden muss.

Die Limitierung der vorhandenen Temperatur und des förderbaren Thermalwasserstromes – und damit der verfügbaren Wärmeleistung - erfordern ein eigenes Vorgehen bei Entwurf und Optimierung der Anlagen. Die thermodynamische Optimierung zielt nicht primär auf die Verbesserung des Umwandlungswirkungsgrades, sondern auf die Erhöhung der Netzanschlussleistung. Die verfügbare elektrische Leistung resultiert aus der Verbindung der Fähigkeit des Kraftwerkskreislaufes das Thermalwasser abzukühlen mit dem Umwandlungswirkungsgrad des Prozesses.

Zur Wandlung der Niedertemperaturwärme (Temperatur minimal etwa 80 °C) stehen derzeit Kraftwerke nach dem Organic Rankine Cycle (ORC) – Prinzip (Bild 8.2.1) sowie dem Kalina – Verfahren (Bild 8.2.2) zur Verfügung. Bei ersterem dient als Arbeitsmittel eine Flüssigkeit mit niedrigem Siedepunkt, während bei dem zweiten ein Zweistoffgemisch, meist Wasser und Ammoniak, verwendet wird. Der Vorteil dieses Systems liegt in geringeren internen Verlusten bei allerdings höherem technischem Aufwand.

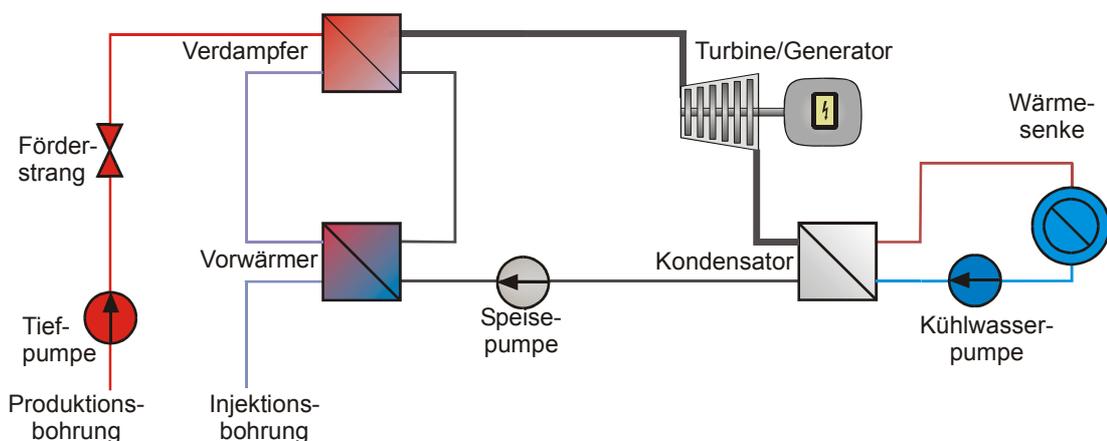


Bild 8.2.1: Schaltbild eines einfachen Organic Rankine Cycle (ORC), aus Köhler (2003).

Das Thermalwasser wird mit einer Tiefpumpe aus der Förderbohrung in das Kraftwerk gefördert. Dort gibt es in Vorwärmer und Verdampfer Wärme an das Arbeitsmittel ab, bevor es in der Injektionsbohrung wieder in den Untergrund geleitet wird. Das Nassdampfgebiet organischer Arbeitsmittel weist im Temperatur-Entropie-Diagramm (T-s Diagramm) eine andere Form als das von Wasser auf (Hung, 2001). Bild 8.2.2 zeigt das T-s Diagramm einer einfachen ORC-Anlage mit trockenem Arbeitsmittel. Das Arbeitsmittel durchläuft nach der Druckerhöhung durch die Speisepumpe (1-2) den Vorwärmer (2-3) und den 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). ORC-Anlagen mit typisch 0,5 bis 1,5 MW Leistung werden weltweit seit über 15 Jahren sicher und zuverlässig betrieben.

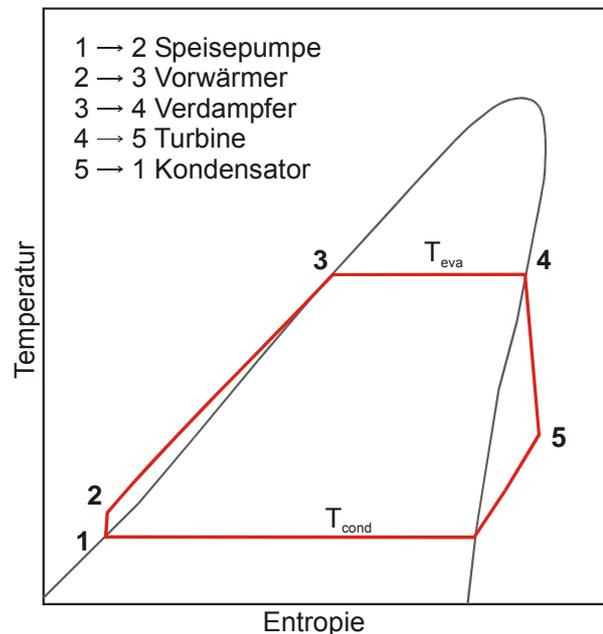


Bild 8.2.2: Typisches T-s Diagramm eines einfachen ORC mit trockenem Arbeitsmedium.

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. Der Prozess ist nach seinem Erfinder benannt und patentrechtlich geschützt.

Bild 8.2.3 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.

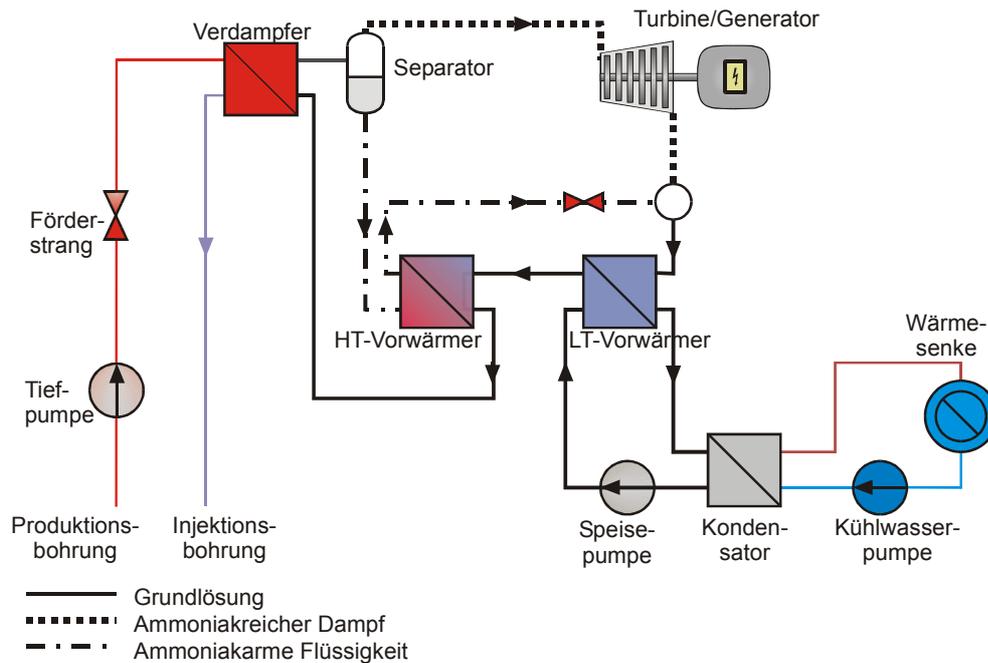


Bild 8.2.3: Schaltbild eines einfachen Kalina-Kraftwerkes (KCS 34), nach Leibowitz and Micak (1999).

Anhand von Vergleichsberechnungen für die Kraftwerkstypen, alle abgestimmt auf die Randbedingungen in Groß Schönebeck, sollen Aussagen zur Eignung der Systeme für eine Anwendung im betrachteten Temperaturbereich gewonnen werden. Es wurden zwei Kalina-Anlagen mit unterschiedlichen maschineninternen Temperaturgefällen sowie eine ORC-Anlage mit i-Butan als Arbeitsmedium für den Standort Groß Schönebeck entworfen und vergleichend bewertet. Alle Anlagen werden mit Wasserkühlung berechnet.

Tabelle 8.2.1: Eckwerte der Vergleichsrechnungen (aus Köhler, 2003).

Temperatur Thermalwasser	150 °C
Massenstrom Thermalwasser	20 kg/s
Temperatur Kühlwasser	15 °C
Maximal erreichbarer Wirkungsgrad η_m	17,5 %
Isentroper Wirkungsgrad Turbine	75 %
Isentroper Wirkungsgrad Pumpen	80 %

Im Ergebnis wurden Auslegungskriterien erarbeitet, die je nach Energieangebot des Thermalwasserstroms und den Grenzwerten des Kühlwasserreservoirs, individuelle Wirkungsgrade und Kennwerte der Anlagen berechnen lassen. Die Berechnungen unter den Vorgaben des geplanten Kraftwerks Groß Schönebeck ($T = 150\text{ °C}$, Massenstrom $20\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, siehe Tabelle 8.2.1) ergaben Richtwerte, nach denen eine Systemauswahl erfolgen könnte. Je nach dem, ob eine große Nettoleistung oder eine möglichst kleine Wärmeübertragungsfläche gewünscht wird, wäre eine große Kalina-Anlage bzw. eine ORC-Anlage besser geeignet. Wenn die gleichzeitige Bereitstellung von Strom und Wärme im Vordergrund steht, dann sind die Kalina Anlagen aufgrund ihrer höheren Rücklauftemperaturen günstiger, siehe Tabelle 8.2.2. Diese Resultate sind in Köhler (2003) publiziert.

Tabelle 8.2.2: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für wassergekühlte Anlagen (aus Köhler, 2003).

	Kalina groß	Kalina klein	ORC Arbeitsmedium i-Butan
Netzanschlussleistung	664 kW	604 kW	600 kW
Rücklauftemperatur Thermalwasser	82 °C	83 °C	66 °C
Kraftwerkswirkungsgrad	5,2 %	4,8 %	4,7 %
Thermischer Wirkungsgrad	12,5 %	11,6 %	9,7 %
Minimale Temperaturdifferenz im Kraftwerk	2 K	5,3 K	7 K
Wärmeübertragerfläche	2513 m ²	1301 m ²	956 m ²
Exergetischer Wirkungsgrad Kraftwerk	30,4 %	27,7 %	27,1 %

Als Kühlungsvarianten können Frischwasserkühlung und direkte Trockenkühlung betrachtet werden. Bei direkter Trockenkühlung wird der Abdampf ohne Zwischenschaltung eines Kondensators durch die Wärmeübertrager des Kühlturmes geleitet und kondensiert dort. Diese beiden Varianten kennzeichnen die oberen und unteren Grenzwerte der möglichen erreichbaren Wirkungsgrade. Kühlung in einem Nasskühlturm wird voraussichtlich dazwischen liegen.

Die Leistung der Ventilatoren geht genauso wie die Leistung der Pumpen in den Eigenbedarf der Anlage ein. Kühltürme werden individuell an den Standort (Höhe über N.N., Auslegungslufttemperatur, relative Feuchte) angepasst. Für eine nicht standortbezogene Aussage kann die Leistung nur auf der Basis von Erfahrungswerten abgeschätzt werden. Bohn (1985) gibt eine Abschätzung der erforderlichen Ventilatorleistung in Abhängigkeit von Massenstrom im Kraftwerk, Verdampfungsenthalpie, Lufttemperatur und Kondensationstemperatur an, die in den folgenden Betrachtungen verwendet wurde. Die Berechnungen erfolgen für ein ORC-Kraftwerk (siehe auch Köhler, 2002).

Tabelle 8.2.3: Annahmen für die vergleichende Berechnung von Frischwasserkühlung und Trockenkühlturm für ein ORC-Kraftwerk (aus Köhler, 2002).

	Frischwasserkühlung	Direkte Trockenkühlung
Kühlmedium	Wasser	Luft
Eintrittstemperatur des Kühlmediums	15 °C	20 °C
Zulässige Erwärmung	5 K	10 K
Pinch point Kondensator	5 K	10 K
Kondensationstemperatur	25 °C	40 °C

Das Ergebnis zeigt einen fast linear steigenden Wirkungsgrad mit der Thermalwassertemperatur (Bild 8.2.4). Die Tiefpumpe verursacht den größten Teil des Eigenbedarfes. Sowohl ihre Leistung als auch die realisierbaren Kühlungstemperaturen sind stark standortabhängig, so dass insbesondere bei vergleichsweise geringen Thermalwassertemperaturen eine genaue Berechnung für die vor Ort vorliegenden Verhältnisse erfolgen sollte. Für Thermalwassertemperaturen unter 100 °C kann bei ungünstigen Kühlungsverhältnissen der Eigenbedarf über die Generatorleistung steigen und so der Kraftwerkswirkungsgrad kleiner Null werden.

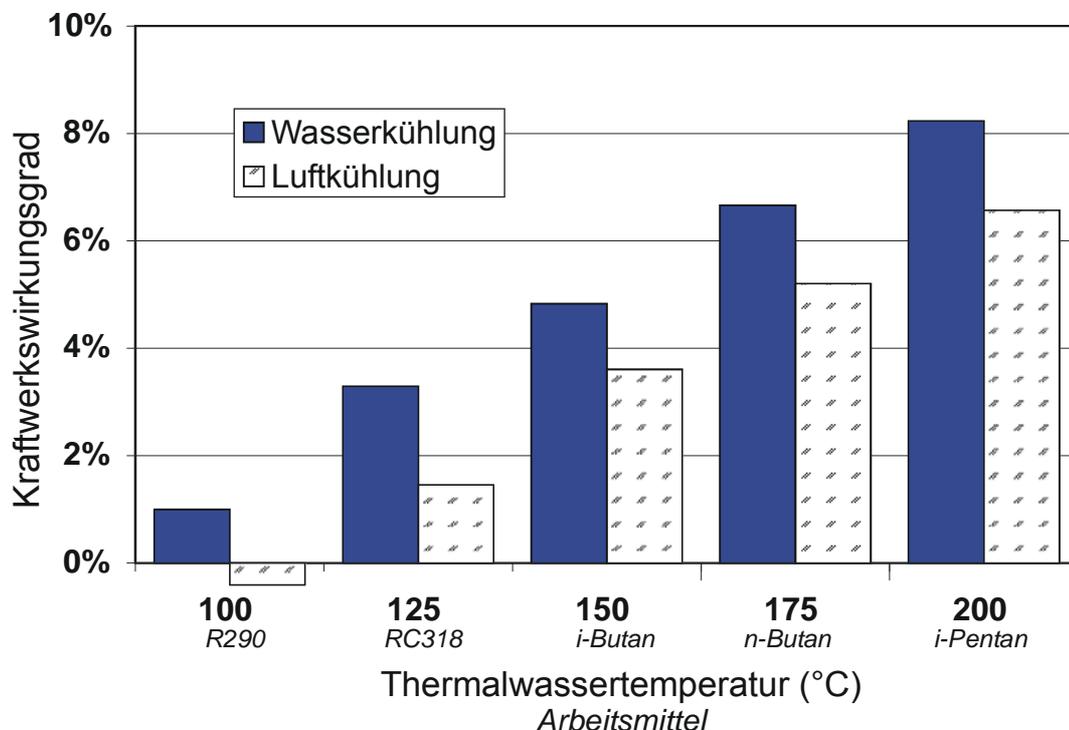


Bild 8.2.4: Kraftwerkswirkungsgrade in Abhängigkeit von der Thermalwassertemperatur. Betrachtung von Wasserkühlung und Luftkühlung für ORC-Anlagen (Köhler, 2002).

Die Nettoleistung eines geothermisch angetriebenen ORC-Kraftwerks hängt nahezu linear vom Thermalwassermassenstrom ab (Bild 8.2.5). Durch den Wechsel zu Frischwasserkühlung kann die Nettoleistung um ca. 70 % gegenüber der Luftkühlung erhöht werden (Köhler, 2002).

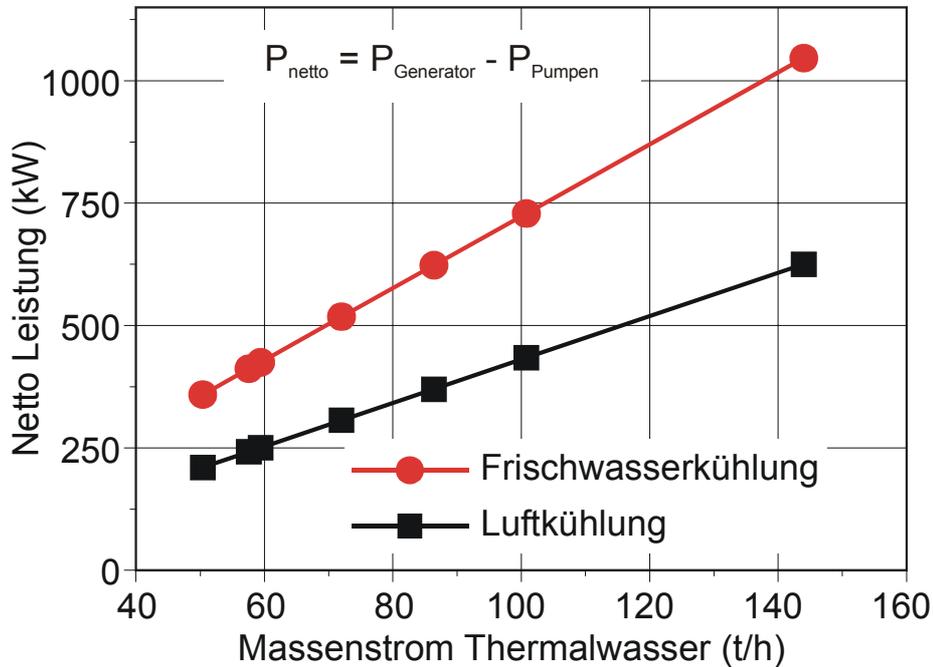


Bild 8.2.5: Nettoleistung eines ORC-Kraftwerks in Abhängigkeit von der Förderrate für Luftkühlung und Wasserkühlung, Beispielrechnung für ein Fallbeispiel im Norddeutschen Becken (Köhler, 2002).

Zusammenfassung

Mit dem ORC-Prozess und dem Kalina-Prozess stehen zwei technisch ausgereifte Technologien zur Wandlung von Niedertemperaturwärme in elektrische Energie zur Verfügung. Betriebserfahrungen mit diesen Technologien sind bisher in unterschiedlicher Tiefe vorhanden.

Wärmequellen mit niedriger Temperatur und begrenzter Wärmeleistung wie z. B. Geothermie geben feste Rahmenbedingungen für den Entwurf eines Kraftwerkes vor. Der erzielbare Kraftwerkswirkungsgrad hängt neben der Temperatur der Wärmequelle stark von den Eigenschaften der Wärmesenke ab. Die Nettoleistung eines geothermischen Kraftwerkes ist durch die Thermalwassertemperatur, den Thermalwasserstrom und das nutzbare Kühlmedium sowie die aus den Parametern des Untergrundes resultierende Leistung der Tiefpumpe stark standortbezogen. Sie hängt nahezu linear vom Thermalwasserstrom ab und steigt mit zunehmender Thermalwassertemperatur. Durch Frischwasserkühlung kann die Kraftwerksleistung gegenüber der direkten Luftkühlung um ca. 70 % erhöht werden.

9 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts Groß Schönebeck 3/90 wurden Stimulationsmaßnahmen zur Erhöhung der Fließrate in den Sedimenten des Rotliegend durchgeführt. Neben hydraulischen Tests dokumentiert ein Bohrlochmessprogramm die Veränderungen im Reservoir. Mit Modellrechnungen kann die Rissausdehnung quantifiziert werden. Begleitend zu diesen Arbeiten wurden geophysikalische Untersuchungen und Messungen durchgeführt. Parallel erfolgten Studien zur Reservoirgeologie, Standortwahl, Fluidchemie und Optimierung der obertägigen Anlagentechnik.

Ergebnisse

Das regionale Reservoir wurde durch Auswertung von Bohrungsdaten und seismischen Messungen charakterisiert. Es konnten im Rotliegend die Erstreckung der äolischen Sandsteine, die für eine geothermische Nutzung besonders günstig sind, bestimmt werden sowie Störungssysteme nachgewiesen und ein Modell zum tektonischen Bau des Prä-Zechstein im Raum Groß Schönebeck erstellt werden.

Zur Konditionierung der Injektionsfluide wurden Durchströmungsversuche im Labor durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass eine Mobilisierung und Quellung von Tonmineralen durch den Einsatz von salzfreiem, angesäuertem Brunnenwasser verhindert werden kann. Abhängig vom Injektionsdruck können jedoch Feinstpartikel mobilisiert werden. Eine Ansäuerung des Injektionsfluids auf $\text{pH} < 5$ mit Essigsäure hat sich im Laborversuch als erfolgreich zur Verminderung von Eisenhydroxidausfällungen erwiesen. Beim in situ Großexperiment selbst, dem 2. Wasserfrac, konnten keine nachteiligen Eigenschaften festgestellt werden.

Mit numerischen Simulationsrechnungen wurde versucht, den zeitlichen Verlauf und die räumliche Verteilung der Gebiete mit Auflösung oder Ausfällung der relevanten Zementminerale Calcit, Anhydrit und der amorphen SiO_2 -Modifikationen in einem stimulierten Reservoir zu modellieren. Es wird offensichtlich, dass eine Differenzierung entsteht und deshalb mindestens 2-dimensionale gekoppelte hydraulisch-thermische Berechnungen notwendig sind.

Während des Langzeitpumptests im Sommer 2002 wurden Tiefenproben der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 aus den Hauptzuflusszonen der Bohrung genommen. Als typische Kennwerte für die Rotliegend-Fluide können eine Salinität von 260 g/l und ein pH-Wert um 6 angegeben werden. Nach den Hauptbestandteilen der wässrigen Lösung handelt es sich um ein Fluid vom Ca-Na-Cl-Typ. Relativ hohe Gehalte an Eisen, Mangan, Blei, Zink und Kupfer deuten auf eine metallreiche Fluidquelle hin. Bei dem Pumptest wurden erstmals Ausfällungen von gediegenem Blei und Kupfer beobachtet. Die Ursache ist noch nicht vollständig geklärt. Das Gas-Wasser-Volumenverhältnis beträgt im Tiefenfluid

unter Standardbedingungen etwa 1. Hauptbestandteile der Gasphase sind Stickstoff (ca. 80 Vol. %), Methan (ca. 15 Vol. %) und Kohlendioxid (2-5 Vol. %). Als Nebenbestandteil tritt u. a. Helium (ca. 0,4 Vol. %) auf. Beim Fördern entgasen N_2 und CH_4 bei Drucken unterhalb von 24 MPa.

Berechnungen mit geochemischen Modellierungsprogrammen ergeben, dass im Thermalwasserkreislauf ein Druck von mindestens 0,7 MPa gehalten werden sollte, um die Fällung von Calcit und Anhydrit bei Abkühlung des Tiefenwassers auf 70 °C zu verhindern. Mit einer Inertgasbeaufschlagung kann einer Mangan- und Eisenhydroxidausfällung entgegengewirkt werden.

Mit den Stimulationen im Februar 2003 konnte bereits ein zusätzliches Reservoir angeschlossen werden, erkennbar an der steigenden Injektivität. Bei diesem Experiment traten im offenen Bohrlochabschnitt Instabilitäten infolge von Nachfall aus der Bohrlochwand auf. Dadurch wurde die Bohrung in etwa 3900 m Tiefe verstopft, so dass der darunter liegende Abschnitt nicht mehr zugänglich war. Es wurden eine Bohranlage aufgebaut und das Bohrloch geräumt. Ein Schutzstrang mit gelochten Rohren im Speicherbereich, die eine Anbindung an das Reservoir gewährleisten, wurde im Tiefenbereich von 3985 bis 4309 m eingebracht. In der gesicherten Bohrung wurden die massiven Stimulationsexperimente im November und Dezember 2003 fortgesetzt. Die Stimulationsexperimente wurden mit Injektionen von leicht angesäuertem Wasser von 30 und kurzzeitig 40 l/s über mehrere Tage durchgeführt. Kurzzeitig wurde die Injektionsrate auf 80 l/s gesteigert. Insgesamt wurden 7291 m³ Fluid verpresst. Der Produktivitätsindex der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 konnte mit den Stimulationen von 1,2 m³·h⁻¹·MPa⁻¹ unmittelbar nach der Aufwältigung im Jahre 2000 auf 14 m³·h⁻¹·MPa⁻¹ im November 2003 gesteigert werden.

Mit geophysikalischen Untersuchungen, die teilweise auch stimulationsbegleitend durchgeführt wurden, sollte die Ausdehnung der neu erzeugten Fließwege erfasst werden. Die elektromagnetischen und gleichstromgeoelektrischen Messverfahren erreichten in der Zieltiefe nicht die erforderliche Auflösung zur Klärung der Fragestellung. Die Ursache ist darin begründet, dass eine sehr gut leitende Schicht in 1 bis 2 km Tiefe (Salzwasser) die Informationen aus dem tieferen Untergrund abschirmt. Die seismischen Messungen während der Stimulation zeigten innerhalb des möglichen Signal-Rausch-Abstandes keine Signale aus dem Injektionshorizont. Hier führten wahrscheinlich zu geringe Injektionsvolumina in Verbindung mit starker Signaldämpfung in den Formationen des Zechsteins zu diesem Ergebnis. Künftig sollten bei beiden Verfahren Bohrloch-Bohrloch-Techniken angewendet werden.

Die Messungen mit dem Vertikal Elektroden System der Universität Leipzig in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 vor den Stimulationen im offenen Bohrloch zeigen einen elektrisch sehr gut leitenden Bereich in den Sandsteinen mit radialen Ausdehnungen um 25 m. Dieser korrespondiert sehr gut mit den Modellierungen der abgepackerten Sandsteinfracs.

Die struktursensitiven Bohrlochmessungen in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 konnten die Stadien der Stimulationen verfolgen, wie der Vergleich der Fahrten von November 2002 und 2003 zeigt.

Es wurde ein vertikaler, etwa N-S ausgerichteter Riss erzeugt. Die Höhe des mit den Stimulationen im Februar 2003 erzeugten Risses beträgt etwa 120 m. Die lithologisch sensitiven Bohrlochmessverfahren konnten aufzeigen, dass ab einer Tiefe von 4280 m Gesteine des Karbons in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 anstehen. Temperaturmessungen mit konventioneller und neuer Glasfasertechnik zeigen die Entwicklung der Förderhorizonte in den verschiedenen Ausbaustadien der Bohrung.

Die Berechnungen zur Auslegung des geplanten Kraftwerks Groß Schönebeck ergaben Richtwerte, nach denen eine Systemauswahl erfolgen könnte. Je nach dem, ob eine große Nettoleistung oder eine möglichst kleine Wärmeübertragungsfläche gewünscht wird, wäre eine große Kalina-Anlage bzw. eine ORC-Anlage besser geeignet. Wenn die gleichzeitige Bereitstellung von Strom und Wärme im Vordergrund steht, dann sind die Kalina Anlagen aufgrund ihrer höheren Rücklauftemperaturen günstiger.

Eine Studie zur Materialauswahl der Anlagenbauteile ergab, dass für ein Thermalwasserkreislaufs unter den Bedingungen von Groß Schönebeck die meisten Komponenten verfügbar sind, allerdings teilweise kostenintensiv. Bei den Sensoren (pH, Eh) zur Überwachung des Fluidkreislaufs bestehen Einschränkungen bezüglich Einsatztemperatur und -druck.

Mit einer Standortrecherche wurden Gebiete in Deutschland charakterisiert, die für eine geothermische Stromerzeugung geeignet sind. Hierzu gehören große Teile des Buntsandstein im Norddeutschen Becken. Im Oberrheingraben kann dieser Horizont nur in Verbindung mit Kluftspeichern genutzt werden. Auch die Rotliegendesandsteine im Norddeutschen Becken sind in Verbindung mit Kluftsystemen geeignet. Zwar weist der Malmkarst in Süddeutschland hohe Durchlässigkeiten auf, jedoch werden nur südlich von München die erforderlichen Temperaturen erreicht.

Schlussfolgerungen

Nach den nun vorliegenden Ergebnissen soll die bestehende Bohrung Groß Schönebeck 3/90 nicht als Förder- sondern als Schluckbohrung verwendet werden. Die notwendigen Injektivitätswerte konnten im Verlauf der Experimente dargestellt werden. Aus geometrischen Gründen ist es besser, zur Förderung eine neue Bohrung zu verwenden. Sie soll im Speicherbereich abgelenkt werden und damit größere Zuflussflächen erschließen.

Im Kontext mit den anderen durchgeführten Stimulationsexperimenten kann im Verlauf der Jahre eine stetig steigende Lernkurve bezüglich der erzielten Produktivität verzeichnet werden. Die Methode des massiven Wasserfracs in einem gesicherten Bohrloch, ergänzt durch eine abschließende Stützmittelbehandlung zur Sicherung der Rissöffnung, erweist sich damit als Schlüsselverfahren für eine zukünftige Technologie der geothermischen Stromerzeugung aus sedimentären geothermischen Reservoiren.

10 Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse

Die gemeinsame Zielstellung der drei FuE-Projekte BEO 0327063, BMU ZIP 0327063C und BMU ZIP 0327508 ist die Nutzbarmachung von klüftig-porösen Speichergesteinen zur geothermischen Stromerzeugung. Das In situ Geothermielabor Groß Schönebeck dient hierzu als Experimentierfeld für ein Programm von geowissenschaftlichen und bohrtechnischen Methoden. Nach den erfolgreichen Stimulationen liegt nun ein Verfahren vor, mit dem die Produktivität aus einer niedrigthermalen sedimentären Lagerstätte so gesteigert werden kann, dass eine geothermische Stromerzeugung in realisierbare Nähe gerückt ist. Der Erfolg rechtfertigt die Abteufung einer zweiten Bohrung am Standort Groß Schönebeck. Das nächste Ziel mit der zweiten Bohrung ist die Durchführung eines Kommunikationsexperimentes. Die Langzeitzirkulation zwischen den zwei Bohrungen soll zeigen, ob das erzeugte Rissystem dauerhaft als Transportweg und als Wärmetauscher genutzt werden kann. Aus den jetzt gewonnenen Erfahrungen können auch die Konzepte zur geophysikalischen Erkundung des Reservoirs modifiziert werden.

Diese Erfahrungen sind auch übertragbar auf die Findung von Lösungsansätzen für die Zukunftsaufgabe der Speicherung von CO₂ im Untergrund. Synergien bestehen für die Erschließungstechnik, im Reservoirmanagement und in der Entwicklung von modernen Untertage-Monitoringverfahren.

Das Konzept einer späteren geothermischen Nutzung sieht vor, dass die aus der zweiten Bohrung (Förderbohrung) geförderten Tiefenwässer nach ihrer thermischen Nutzung über die erste Bohrung (Injektionsbohrung) wieder in den Speicher eingeleitet werden.

Kann eine entsprechende Produktivität nachgewiesen werden, ist in Kooperation mit Partnern aus der Industrie die Errichtung einer Demonstrationsanlage am Standort vorgesehen, die vor allem verfahrenstechnische Fragen klären soll. Die Wirtschaftlichkeit geothermischer Stromerzeugung steht dabei im Vordergrund.

Die im November 2003 in Neustadt-Glewe in Betrieb genommene Kraft-Wärme-Kopplungsanlage zeigt, dass eine Stromerzeugung aus Erdwärme unter hiesigen geologischen Bedingungen erfolgreich realisierbar ist. Die Pilotanlage ermöglicht erstmals auch in Deutschland geothermische Stromerzeugung zu demonstrieren und theoretische Berechnungen und Modelle praktisch mit Kraftwerksdaten zu untermauern.

Konzeption, Bau und Betrieb der Anlage wurden vom GFZ Potsdam wissenschaftlich mit energie- und verfahrenstechnischen Methoden begleitet. Daten zum Thermalwasser-, Kraftwerks- und Kühlkreislauf werden unter verfahrenstechnischen und energiewirtschaftlichen Aspekten analysiert, um Optimierungspotenziale im System zu erschließen.

Bereits in der Planungsphase des Kraftwerkes entwickelte das GFZ ein angepasstes Messkonzept. Dieses ermöglicht nicht nur eine vollständige Energiebilanz der Gesamtanlage, sondern auch die Analyse einzelner Komponenten, insbesondere der ORC-Turbine (Organic Rankine Cycle), dem Herzstück der Anlage. Diese Erkenntnisse sollen in das Auslegungs- und Monitoringkonzept der geplanten Anlage in Groß Schönebeck einfließen.

Innerhalb des Projektes konnten aus Projektmitteln finanzierte Mitarbeiter ihre Diplomarbeiten (Herr A. Reinicke) und Dissertationen (Herr A. Saadat und Herr B. A. Legarth) erfolgreich fertig stellen. Auch in diesen, an der TU Berlin abgeschlossenen wissenschaftlichen Qualifizierungen, spiegelt sich der Erfolg des Projektes wider.

11 Literaturverzeichnis

- Baisch, S. and H.-P. Harjes, 2002. A model for fluid-injection-induced seismicity at the KTB Germany. *Geophys. J. Int.*, 152, 160-170.
- Bartels, J., M. Kühn and C. Clauser, 2003. Numerical simulation of reactive flow using SHEMAT. In: Clauser, C (Hrsg.) Numerical simulation of reactive flow in hot aquifers - SHEMAT and Processing SHEMAT, Springer Publishers, Heidelberg, 5 - 74.
- Bedrosian, P., U. Weckmann, O. Ritter, C. Hammer, J. Hübner, and A. Jung, 2003. Electro-magnetic Monitoring of the Groß Schönebeck Stimulation Experiment. Poster at 17. Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Königstein (Sachsen), 29.09. – 03.10.2003.
- Benek, R., W. Kramer, T. McCann, M. Scheck, J. F. W. Negendank, D. Korich, H. D. Hueb-scher, and U. Bayer, 1996. Permo-Carboniferous magmatism of Northeast German Basin. *Tectonophysics*, 266, 379 - 404.
- Berthelsen, A., 1992. From Precambrian to Variscan Europe. In: A Continent Revealed – The European Geotraverse, Blundell, D., Freeman, R. & Mueller, S. (eds). Cambridge University Press, Cambridge. 153 - 164.
- Bohn, T., 1985. Konzeption und Aufbau von Dampfkraftwerken. Gräfeling: TÜV Rheinland.
- Boisdet, A., J. P. Cautru, I. Czernichowski-lauriol, J. C. Foucher, C. Fouillac, J. L. Honnegger, and J. C. Martin, 1989. Experiments on Reinjection of geothermal brines in deep Triassic sandstones. Intern. Sem. European Geothermal Update held by the European Union Com-mision at Florence, Italy 27-30 April 1989, Conference Proceedings, 419 - 428.
- Boutéca, M. J., J.-P. Sarda, and O. Vincké, 2000. Constitutive law for permeability evolution of sandstones during depletion. SPE 58717.
- Breitkreuz, C. and A. Kennedy, 1999. Magmatic flare up at the Carboniferous/Permian bound-ary in the NE German Basin revealed by SHRIMP zircon ages. *Tectonophysics*, 302, 307 - 326.
- Büttner, G., and E. Huenges, 2003. The heat transfer in the region of the Mauna Kea (Hawaii) – constraints from borehole temperature measurements and coupled thermo-hydraulic model-ling. *Tectonophysics*, 371, 1-4, 23 - 40.
- Cinco-Ley, H., and F. Samaniego, 1981. Transient pressure analysis for fractured wells. SPE paper 0149, 1749 - 1766.
- Clauser, C. (Hrsg.), 2003. Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers - SHEMAT and Processing SHEMAT. Springer Publishers, Heidelberg.
- Crockett, A.R., N. M. Okusu, M. P. Cleary, 1986. A Complete Integrated Model for Design and Real-Time Analysis of Hydraulic Fracuring Operations, SPE Paper 15069.
- David, C., Y. Gueguen and G. Pampoukis, 1990. Effective medium theory and network theory applied to the transport properties of rock. *J. Geophys. Res.*, 95, B5, 6993 - 7005.
- Dullien, F. A. L., 1992. Porous media: fluid transport and pore structure. - Academic Press, San Diego, CA.
- Earlougher, R. C., 1977. Advances in Well Test Analysis, SPE of AIME, Dallas.
- Förster, A., J. Schrötter, D. F. Merriam, and D. D. Blackwell, 1997. Application of optical-fiber temperature logging – An example in a sedimentary environment; *Geophysics*, 62 (4), 1107 - 1113.
- Gerling, P., E. Idiz, G. Everlien, and E. Sohns, 1995. New aspects on the Origin of Nitrogen in Natural Gases in Northern Germany, *Geologisches Jahrbuch*, D103, 65 - 84.
- Giese, L. B., A. Seibt, T. Wiersberg, M. Zimmer, J. Erzinger, S. Niedermann, and A. Pekdeger, 2002. Zur Geochemie der Formationsfluide der Bohrung E Groß Schönebeck 3/90, *GFZ Potsdam Scientific Technical Report*, STR 02-14, 51 - 71.

- GTN, 2004. Wissenschaftliche Grundlagen und Experimente zur Stimulation von Vulkaniten in der Geothermiebohrung Groß Schönebeck. Abschlußbericht zum F+E-Vertrag 5074 mit dem GFZ, Geothermie Neubrandenburg (GTN), 436 pp.
- Harjes, H.-P., 1990. Konzipierung und Realisierung eines hochfrequenten Regionalarray (GERRES) im Bayerischen Wald. Seismische Verifikation 1989 BGR, Hannover, Bericht Nr. 106438, 74 - 94.
- Heiland, J., 2003. Laboratory testing of coupled hydro-mechanical processes during rock deformation. *Hydrogeology Journal*, 11, 122 - 141.
- Henninges, J., G. Zimmermann, G. Büttner, J. Schrötter, K. Erbas, and E. Huenges, 2005. Wireline distributed temperature measurements and permanent installations behind casing. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24–29 April 2005, submitted.
- Henninges, J., Schrötter, J., Erbas, K., and Huenges, E., 2004. Temperature field of the Mallik gas hydrate occurrence – implications on phase changes and thermal properties. In: Dallimore, S.R., and Collett, T.S. (eds.), Scientific Results from Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada, *Geological Survey of Canada Bulletin*, 585, in press.
- Hoffmann, N., B. Fluche, H. Jödicke, A. Jording, G. Kallaus, W. Müller, and G. Pasternak, 1997. Erforschung des tieferen Untergrundes der Nordostdeutschen Senke – ein Beitrag der Magnetotellurik zur Untersuchung des präwestfalen Muttergesteinspotentials. Technical Report BMBF-Forschungsvorhaben: 0327105 C, BGR, Berlin and Hannover. Unveröffentlicht.
- Hoffmann, N., H. Jödicke, and P. Gerling, 2001. The distribution of Pre-Westphalian source rocks in the North German Basin – Evidence from magnetotelluric and geochemical data. *Geologie en Mijnbouw / Netherlands Journal of Geosciences*, 80 (1), 71 - 84.
- Hoffmann, N., H. Jödicke, B. Fluche, A. Jording und W. Müller, 1998. Modellvorstellungen zur Verbreitung potentieller präwestfalischer Erdgas-Muttergesteine in Norddeutschland – Ergebnisse neuer magnetotellurischer Messungen. *Z. Angew. Geologie.*, 44 (3).
- Holl, H.-G., I. Moeck and H. Schandelmeier, 2004. Geothermal well Groß Schönebeck 3/90: A low enthalpy reservoir (Rotliegend, NE Germany). Proceedings 66th EAGE Conference and Exhibition, F032, Paris.
- Holl, H.-G., I. Moeck and H. Schandelmeier, 2005. Characterisation of the Tectono-Sedimentary Evolution of a Geothermal Reservoir – Implications for Exploitation (Southern Permian Basin, NE Germany), Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005, submitted.
- Holl, H.-G., S. Hurter, A. Saadat, S. Köhler, M. Wolfgramm, G. Zimmermann, U. Trautwein, H. Winter, B. Legarth and E. Huenges, 2003. First Hand Experience in a Second Hand Borehole: Hydraulic Experiments and Scaling in the Geothermal Well Groß Schönebeck after Reopening, Proceedings International Geothermal Conference Reykjavik, 14-17 September 2003, S01, Paper 060, 8 - 13.
- Horner, D. R., 1951. Pressure Build-Up in Wells, Proc. Third World Pet. Cong., The Hague, II: 501.
- Hung, T.-C., 2001. Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids. *Energy Conversion and Management*, Vol. 42, 539 - 553.
- Hurtig, E., J. Schrötter, S. Großwig, K. Kühn, B. Harjes, W. Wieferig, and R. P. Orrell. 1993. Borehole temperature measurements using distributed fibre optic sensing; *Scientific Drilling*, 3 (6), 283 - 286.
- Jung, R., R. Jatho, P. Kehrer, J. Orzol, T. Tischner, 2004. Das Geothermieprojekt GeneSys – Ergebnisse von massiven Wasserfrac-Tests im Buntsandstein des Norddeutschen Beckens. DGMK-Frühjahrstagung 2004, Fachbereich Aufsuchung und Gewinnung, 29. – 30. April 2004, Celle, DGMK-Tagungsbericht 2004-2, 421 - 429.
- Jupp, D. L. B. and K. Vozoff, 1977a. Resolving Anisotropy in Layered Media by Joint Inversion. *Geophysical Prospecting*, 25, 460 – 470.

- Jupp, D. L. B. and K. Vozoff, 1977b. Stable iterative methods for the inversion of geophysical data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 42, 957 – 976.
- Khan, M. and L. W. Teufel, 2000. The effect of geological and geomechanical parameters on reservoir stress path and its importance in studying permeability anisotropy. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 3 (5), 394 - 400.
- Klarner, S., 1993. Analyse des strukturellen Aufbaus (Grabenproblematik) des Rotliegenden im Raum Zehdenick-Gransee. *Geol. Jb.*, A131, 239 – 251.
- Köhler, S., 2002. Geothermisch angetriebene Kraftwerke - Systembetrachtung und Prozessvergleich. In: Geothermische Stromerzeugung Stand der Technik und Perspektiven. VDI-GET (ed.), Workshop proceedings, Potsdam 17.-18. Oktober 2002. *VDI Berichte*, 1703, 71 - 84.
- Köhler, S., 2003. Effizienz der geothermische Stromerzeugung. Proceedings 1. Fachkongress geothermischer Strom, Neustadt-Glewe, 12. – 13. November 2003, 128 - 133.
- Krooss, B. M., R. Littke, B. Müller, J. Frielingsdorf, K. Schwochau, and E. F. Idiz, 1995. Generation of nitrogen and methane from sedimentary organic matter: implications on the dynamics of natural gas accumulations. *Chemical Geology*, 126, 291 - 318.
- Lee, W. H. K., and C. M. Valdes, 1989. Hypo71PC Toolbox for seismic data acquisition, processing and analysis, IASPEI & SSA.
- Legarth, B. A., 2003. Erschließung sedimentärer Speichergesteine für eine geothermische Stromerzeugung. Dissertation TU Berlin. GeoForschungsZentrum Potsdam Scientific Technical Report, STR 03/09 (ISSN 1610-0956), 211 pp.
- Legarth, B. A., E. Huenges, and G. Zimmermann, 2004. Hydraulic Fracturing in a Sedimentary Geothermal Reservoir: Results and Implications. *International Journal of Rock Mechanics*, Special Issue, in press.
- Leibowitz, H.M. and Micak, H.A., 1999. Design of a 2 MW Kalina Cycle Binary Module for Installation in Husavik, Iceland. In: GRC Transactions, Vol. 23, 75.-80, Geothermal Resources Council, USA.
- Mamyrin, B. A. and Tolstikhin, I. N., 1984. Helium isotopes in nature, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo, 273 pp.
- MeSy, 2004. Erschließung potentieller geothermischer Speicher im norddeutschen Becken - Experimente zur Stimulation in der Geothermiebohrung Groß-Schönebeck. MeSy GmbH, Bochum, Abschlußbericht 15. April 2004, 34 pp.
- Naumann, D., 2000. Salinare Tiefenwässer in Norddeutschland – Gas- und isotopengeochemische Untersuchungen zur Herkunft und geothermischen Nutzung. GFZ Potsdam Scientific Technical Report, STR 00/21, 116 S.
- Niitsuma, H., H. Moriya, H. Asanuma, K. Evans, R. Jones, R. Jung, and R. Baria, 2002. Detecting hydraulically created permeable structures in the Soultz HDR site by high resolution seismic mapping techniques. Proceedings 24th NZ Geothermal Workshop 2002, 24, 153.
- Pischner, M., T. Voss und H.-G. Holl, 2004. Auswertung von akustischen Bohrlochfernerherdaten (ABF) der Bohrung Groß Schönebeck 3/90. GeoForschungsZentrum Potsdam Scientific Technical Report STR 04/03, 41 - 65.
- Reinicke, A., 2003: Veränderung hydraulischer Eigenschaften nach Stimulations-experimenten im Rotliegend der Geothermie-Forschungsbohrung Groß Schönebeck, Unveröffentlichte Diplomarbeit, Technische Universität Berlin.
- Reinicke, A., G. Zimmermann, E. Huenges, H. Burkhardt, 2004. Estimation of hydraulic parameters after stimulation experiments in the geothermal reservoir Groß Schönebeck 3/90 (North-German Basin). *International Journal of Rock Mechanics*, Special Issue, in press.
- Rieke, H., D. Kossow, T. McCann, and C. Krawczyk, 2001. Tectono-sedimentary evolution of the northernmost margin of the NE German Basin between uppermost Carboniferous and Late Permian (Rotliegend). *Geological Journal*, 36, 19 - 38.
- Ritter, O., A. Junge, and G. J. K. Dawes, 1998. New equipment and processing for magnetotelluric remote reference observations. *Geophys. J. Int.*, 132, 535 - 548.

- Rockel, W., P. Hoth, P. Seibt, 1997. Charakteristik und Aufschluss hydrogeothermaler Speicher. *Geowissenschaften*, 15, Heft 8, 244 - 252.
- Rodi, W., and R. L. Mackie, 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversions. *Geophysics*, 66:174 – 187.
- Seibt, A., D. Naumann, and P. Hoth, 1999. Lösung und Entlösung von Thermalwassergasen - Konsequenzen für den Anlagenbetrieb, GFZ Potsdam Scientific Technical Report, STR 99-04, 63 - 86.
- Terzaghi, K., 1923. Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der hydrodynamischen Spannungserscheinungen. *Sitz. Akad. Wissenschaften Wien Math. Naturwiss. Kl., Abt. IIa.*, 132, 125 – 138.
- Tischner, T., C. Thorenz, R. Jung, W. Kessels, 2002. Ergebnisse des Primärtests: Hydraulik, GFZ Potsdam Scientific Technical Report, STR 02/14.
- Trautwein, U. and E. Huenges, 2003. Pore pressure induced changes of transport properties reflecting microstructural deformation in Rotliegend sandstones. EURO-Conference on Rock Physics and Geomechanics: Micromechanics, Flow and Chemical Reactions, 7. – 11. September 2003, Kijkduin, The Netherlands.
- Trautwein, U., and E. Huenges, 2004. Pore pressure induced changes of permeability reflecting microstructural deformation in Rotliegend sandstones. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Science*, Special Issue, in press.
- Trautwein, U., 2004. Poroelastisches Verhalten petrophysikalischer Eigenschaften von Rotliegend Sandsteinen unter einaxialer Verformung. Dissertation Technische Universität Berlin, Fakultät VI Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften, vorgelegt.
- Ungemach, P., 2003. Reinjection of cooled geothermal brines in sandstone reservoirs. Paper on congress of EUG 2003 Hungary, Conference Proceedings, 1 - 16.
- Weng, X., Pandey, V., Nolte, K.G., 2002. Equilibrium Test – A method for Closure Pressure Determination. SPE/ISRM Paper 78173.
- Wiersberg, T., A. Seibt und M. Zimmer, 2004. Gas-geochemische Untersuchungen an Formationsfluiden des Rotliegend der Bohrung E Groß Schönebeck 3/90, GFZ Potsdam Scientific Technical Report, STR 04/03.
- Winter, H., J. Stoll and E. Aulbach, 1991. The new electrical potential logging tool. *Scientific Drilling*, 2, 147 - 159.
- Wisian, K.W., D. D. Blackwell, S. Bellani, J. A. Henfling, R. A. Normann, P. C. Lysne, A. Förster, and J. Schrötter, 1998. Field comparison of conventional and new technology temperature logging systems. *Geothermics*, 27 (2), 131 - 141.
- Wolfgramm, M., S. Raab, A. Seibt, U. Trautwein, G. Zimmermann, H.-G. Holl, T. Kellner, 2004. Hydraulische und chemische Eigenschaften eines Rotliegend-Sandsteins im Durchströmungsversuch. GFZ Potsdam Scientific Technical Report, STR 04/03, 9 – 28.
- Wolfgramm, M., H.-G. Holl, A. Seibt und T. Kellner, 2004. Chemische Konditionierung von Injektionsfluiden zur Stimulation von Rotliegendgesteinen in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90, GFZ Potsdam Scientific Technical Report, STR 04/03, 171 - 185.
- Wolfgramm, M., A. Seibt, S. Hurter, and G. Zimmermann, 2002. Origin of geothermal fluids of Permo-Carboniferous rocks in the NE German Basin (NE Germany). *Journal of Geochemical Exploration*, 78-79, 127 - 131.
- Zhu, W. and T. F. Wong, 1997. The transition from brittle faulting to cataclastic flow: permeability evolution. *J. Geophys. Res.*, 102, B2, 3027 - 3041.
- Ziegler, P., 1990. Geological Atlas of western and central Europe. Shell International Petroleum Maatschappij B.V.: Amsterdam.
- Zimmermann, G., S. Hurter, A. Saadat, S. Köhler, U. Trautwein, H.-G. Holl, M. Wolfgramm, H. Winter, B. Legarth, and E. Huenges, 2003. The in-situ laboratory Groß Schönebeck – Stimulation experiments of sandstones in 4200 m depth. Proceedings, SGP-TR-173, Twenty-eighth workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University, Stanford, California.

- Zimmermann, G., A. Reinicke, H.-G. Holl, B. Legarth, and E. Huenges, 2005. Enhancement of hydraulic productivity after stimulation experiments in the geothermal reservoir Groß Schönebeck. submitted to: Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005, submitted.
- Zoback, M. D., and H.-P. Harjes, 1997. Injection-induced earthquakes and crustal stress at 9 km depth at the KTB deep drilling site, Germany. *J. Geophys. Res.*, 102, 18477 - 18491.

12 Anhang - Übersicht

Anhang 1:
Komplettierung der Bohrung Groß Schönebeck 3/90, Stand Mai 2004

Anhang 2:
Bohrlochmessungen in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90

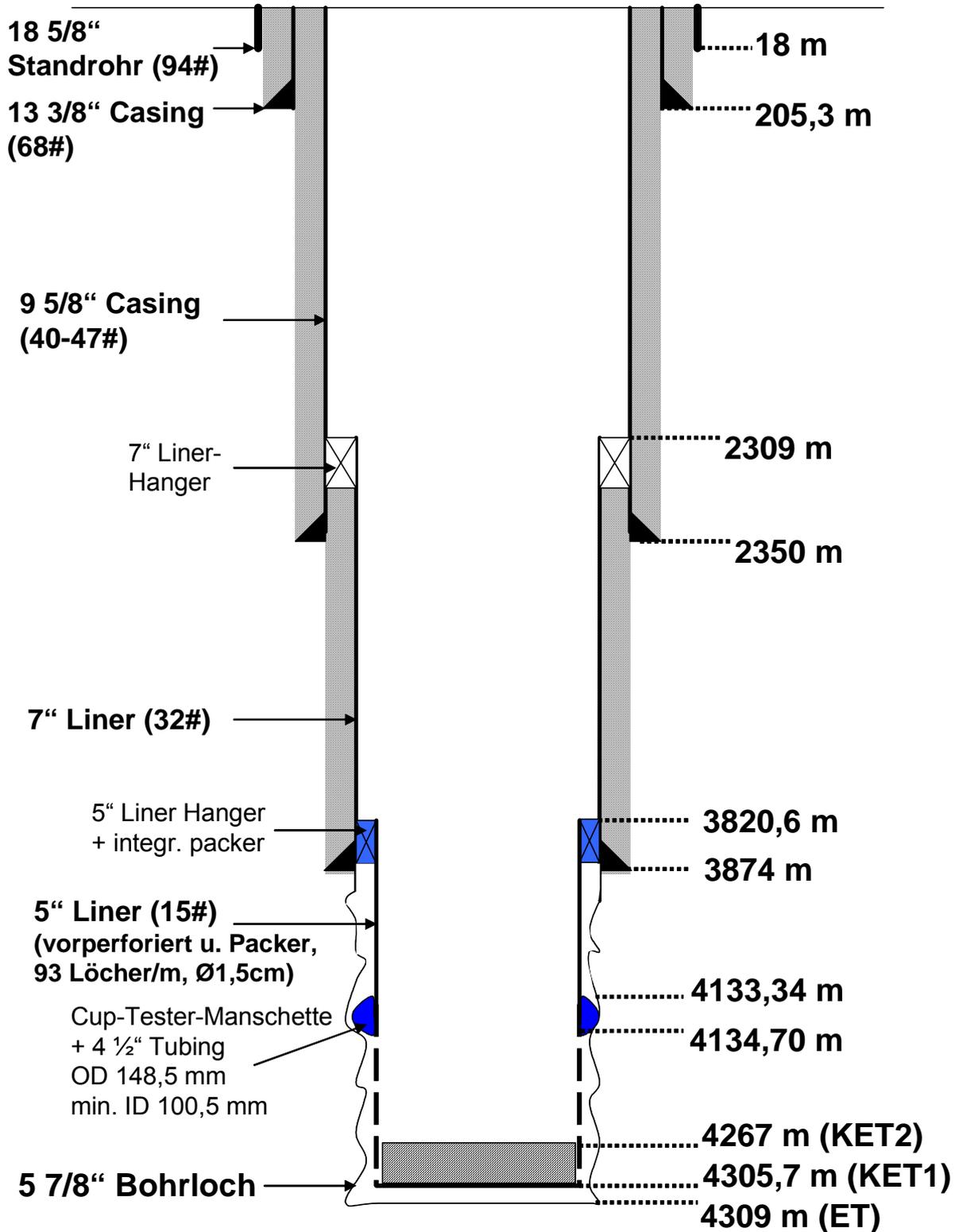
Anhang 3:
Magnetotellurische Messungen

Anhang 4:
Gleichstromgeoelektrische Messungen

Anhang 5:
Publikationen der Sektion 5.2 des GeoForschungsZentrum Potsdam

Anhang 6:
Glossar

Anhang A 1
Komplettierung der Bohrung Groß Schönebeck 3/90
Stand August 2004



Anhang A 2

Bohrlochmessungen in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90

Zeitraum von 1990 bis November 2003

Tabelle A 2.1: Chronologische Liste aller Bohrlochmessungen in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90, beginnend von Oktober 1990 bis November 2003. Eine Erläuterung der Abkürzungen befindet sich in Tabelle A 2.2.

Datum	Tiefenintervall (m)	Messverfahren	Ausführender*
08.-09.10.1990	2375 - 0 2375 - 205,3	GR/NG, BA Kb, OK/UK	EEG
02.11.1990	3455 - 2369 4010 - 3874	BA G	EEG
21.-22.11.1990	3875 - 2275	Kb, GR/NG, OK/UK, AL, BA	EEG
07.-08.01.1991	4240 - 3796	GR, Kb, AL, DIL, NN, BA, GG, FED, SGR	EEG
20.12.2000	2315 - 0 3873 - 2303 4284 - 3870	Casing Inspection Caliper (CIC) Casing Inspection Caliper (CIC) X-Y Caliper (4-arm cal)	Computalog EUROPE GmbH
01.02.2001	0 - 4285	T-P-MRES-GR	GFZ/OSG
02.02.2001	0 - 4285	T-P-MRES-GR	GFZ/OSG
03.02.2001	0 - 4285	T-P-MRES-GR	GFZ/OSG
04.02.2001	4283 - 3865	SGR	GFZ/OSG
06.02.2001	4285 - 3838 4268 - 450	GR-BCS-DIL-LL3 BCS-GR	GFZ/OSG
08.02.2001	4212 - 3869	ABF 14 Televiwer	GFZ/OSG - GeoSys
28.08.2001	0 - 4285	T-P-MRES-GR	GFZ/OSG
27.02.2001	4285 - 3850	GR-SP-DIL	GFZ/OSG
17.10.2001	4292 - 0	T-P-MRES-GR	GFZ/OSG
18.10.2001	4292 - 3875	ABF 14 Televiwer	GFZ/OSG - GeoSys
06.12.2001	0 - 4228	T, P	Schulze
03.01.2002	4297 - 3868	GR, CCL, LS, CALX, CALY	Computalog
13.01.2002	4296 - 3852	CALX, CALY	Computalog
19.01.2002	4098 - 4192	T	Schulze
26.01.2002	4122 - 3857	CALX, CALY	Computalog
28.01.2002	4074 - 4122	T	Schulze
03.02.2002	4049 - 4261	Flowmeter (V, T, Q)	Schulze
13.03.2002	3700 - 4285	T	Schulze
06.06.2002	4 - 4286	T, P	Schulze
22.10.2002	8 - 4280	T-P-MRES-GR	GFZ/OSG
23.-24.10.2002	260 - 4275	EP, Redox	GFZ/OSG - Uni Ffm
25.10.2002	2100 - 3351, 4289 - 3850	GR-BCS-DIL	GFZ/OSG
26.10.2002	4275 - 4073, 3888 - 3857	ABF 14 Televiwer	GFZ/OSG - GeoSys
27.10.2002	4281 - 4180	MSFL	GFZ/OSG
28.10.2002	4274 - 3777, 2500 - 2200	Slimhole tool: T, BCS	GFZ/OSG

01.11.2002	4210 - 4164	GR, CAL1, CAL2	Computalog
01.11.2002	4282 - 3847	GR, CAL1, CAL2, CCL	Computalog
06.-07.11.2002	4290 – 3840	VES	GFZ/OSG - Uni Leipzig
04.11.2003	4309 – 3875	GR, ALAT, EMS, FMI, HNGS, RST	Schlumberger
04.11.2003	3874 - 2300 m, 2309 - 1660 m	16-Arm-Kaliber (Casing inspection)	Schlumberger

*

Computalog Europe: Servicefirma Bohrlochmessungen;
 EEG: Erdöl Ergas GmbH: Explorationsfirma;
 GeoSys: Hersteller und Verleiher des akustischen Bohrlochfernsehers ABF;
 GFZ/OSG: Operational Support Group des GeoForschungsZentrums Potsdam;
 Schlumberger: Servicefirma Bohrlochmessungen;
 Schulze: Servicefirma Bohrlochmessungen (Flowmeter, p, T).

Tabelle A 2.2: Verwendete Abkürzungen.

Abkürzung	Erläuterung
ABF	Akustischer Bohrlochfernseher / Acoustic Borehole Televiwer (GeoSys)
AL	Acoustic Log
ALAT	Azimuthal Laterolog
ARI	Azimuthal Resistivity Imager
BA	Bohrlochabweichung / Deviation
BCS	Borehole Compensated Sonic
BHTV	Borehole Televiwer
CAL, Kb	Caliber
DIL	Dual Induction Log (deep and shallow)
EMS	Environmental Measurement Sonde
EP	Electrical Potential (Ag/AgCl electrodes)
FED	Four E Dipmeter (see Serra, 1968)
FMI	Formation Imager
GR	Gamma Ray
HNGS	Hostile natural gamma spectra
Kb	Caliber
LL3	Laterolog 3
MP	Mud Parameter (temperature, pressure, mud resistivity)
NG	Natural gamma ray
NN	Neutron
OK/UK	Oberkante/Unterkante, Resistivity
P	Druckmessung
REDOX, RXP	Redox potential
RST	Reservoir saturation tool
SGR	Spectral Gamma Ray
SP	Spontaneous Potential
T	Temperaturmessung
T-P-MRES	Mud Parameter (temperature, pressure, mud resistivity)
VES	Vertikal Elektrodensystem

Anhang A 3

Magnetotellurische Messungen

Mit magnetotellurischen Sondierungen kann die Struktur des elektrischen Widerstandes im Untergrund erkundet werden. Bei diesem Messverfahren werden Variationen des erdmagnetischen und erdelektrischen Feldes als Zeitreihen registriert und im Frequenzbereich ausgewertet. Die prozessierten Daten werden dargestellt als scheinbarer spezifischer Widerstand (ρ_a), Phase (ϕ) sowie Induktionspfeile (Real- und Imaginärteil) über die Frequenz bzw. Periode. Dabei repräsentieren höhere Frequenzen den oberflächennahen Bereich, während die niederen Frequenzen Aussagen bis in Tiefen von 30 km ermöglichen (Skinneffekt). Die senkrecht zueinander stehenden Komponenten des Impedanzensors enthalten auch Informationen über die Dimensionalität der Widerstandsverteilung im Untergrund.

Im Rahmen dieses Projekts zur Erschließung potenzieller geothermischer Speicher im Norddeutschen Becken wurde die Magnetotellurik zur Bestimmung der Widerstandsverteilung in der Region sowie direkt an der Bohrung Groß Schönebeck eingesetzt. Während der hydraulischen Tests im Februar 2003 erfolgten kontinuierliche magnetotellurische Registrierungen auf einem L-förmig angelegten Profil mit dem Ziel, Veränderungen des elektrischen Widerstandes infolge der hydraulischen Stimulationen zu beobachten.

Re-Prozessing von regionalen Magnetotellurikdaten

mit Beiträgen von A. Cyganiak

Etwa 30 km westlich von Groß Schönebeck verläuft ein magnetotellurisches Profil von Usedom bis Fläming mit 18 Meßstationen, das im Auftrag der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, in den Jahren 1993 bzw. 1995 gemessen wurde, siehe Bild A 3.1.

Die Auswertung dieser Daten erfolgte bisher im Hinblick auf die Charakterisierung von tiefen geologisch-tektonischen Strukturen des Nordostdeutschen Beckens. (Hoffmann et al., 1998; Hoffmann et al., 2001). Mit der Neubearbeitung der Daten bestand die Erwartung, weitere Informationen über die Widerstandsstruktur der oberen 5 km in der Region zu erhalten. Die Daten wurden dankenswerterweise von der BGR zur Verfügung gestellt. Nachfolgend werden die zentralen Ergebnisse aus dem Arbeitsbericht wiedergegeben.

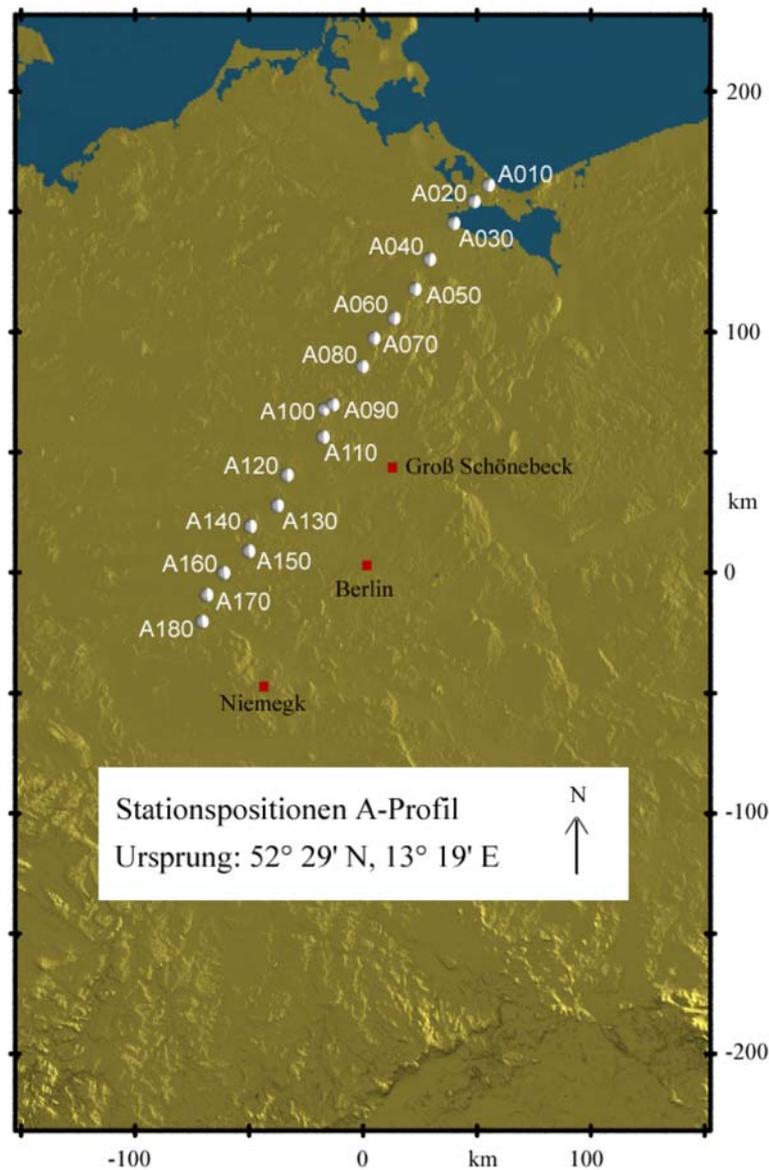


Bild A 3.1: Stationen des magnetotellurischen Messprofils in Nordostdeutschland. Die Richtung des Profils ist 35° NNE.

Der registrierte Frequenz- bzw. Periodenbereich umfasst 240 Hz – 4096 s. Die Messkurven ρ_a , und ϕ zeigen einen ähnlichen Verlauf bei allen Stationen. Die Widerstandskurve beginnt bei kurzen Perioden für beide Komponenten mit Werten zwischen 10 und 100 Ωm , sinkt dann auf unter 1 Ωm bei etwa 10 s und steigt dann unter Aufspaltung der Komponenten wieder an. Zu erkennen ist, dass die Datenqualität der nördlichen Station (A050) schlechter ist als bei den beiden südlichen. Die Werte streuen im ersten Fall bei kurzen Perioden deutlich stärker.

Die Induktionspfeile sind über weite Periodenbereiche sehr klein. Dies bedeutet, dass sich im Induktionsraum keine lateralen Leitfähigkeitskontraste befinden. Erst bei ungefähr 100 s, sobald die Aufspaltung der ρ_a und Phasenkurven einsetzt, nehmen die Induktionspfeile eine nennenswerte Größe an und lassen einen systematischen Trend erkennen: Die Realteile der Induktionspfeile zeigen im Südteil des Profils vorzugsweise nach Süden, mit einem Maximum bei etwa 1000 s, das 0.4 nicht überschreitet. Für den Nordteil des Profils ist eine Vorzugsrichtung der Realpfeile weniger gut zu erkennen. Sie bleiben insgesamt kleiner und zeigen eher nach Osten. Die sogenannte Tensorschiefe ist ein Indikator für dreidimensionale Strukturen. In den Daten ist sie an fast allen Stationen klein, d. h. unter 0.2. Somit können auch die langperiodischen Daten mit einer zweidimensionalen Widerstandsstruktur erklärt werden.

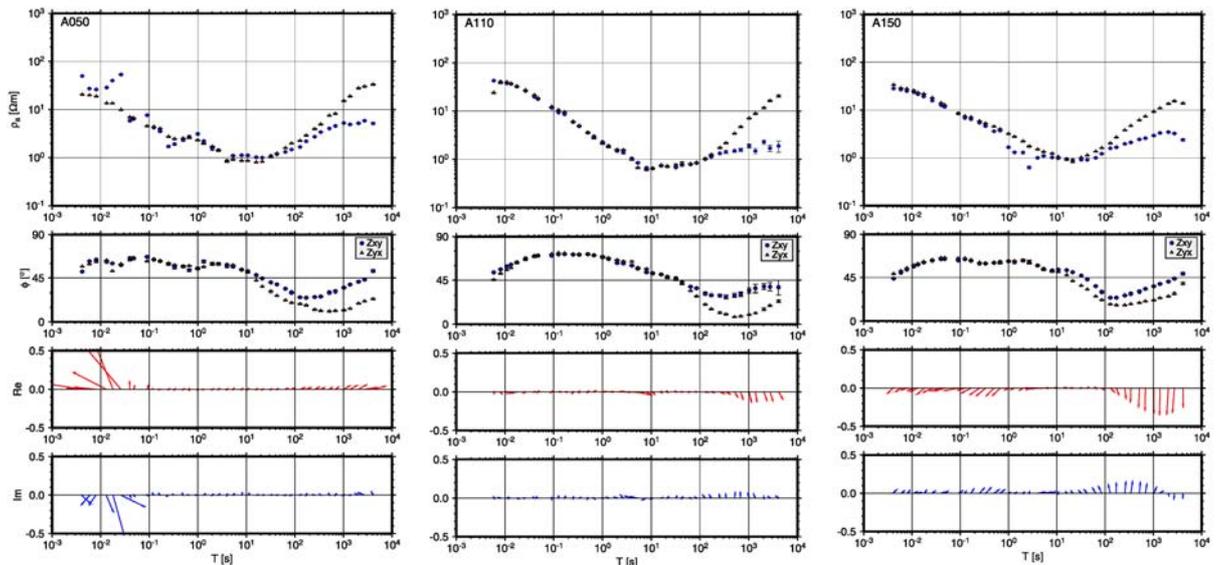


Bild A 3.2: Beispiel für die Sondierungskurven ρ_a und Phase ϕ sowie die Induktionspfeile. Stationen A50 (Nord), A110 (Mitte) und A150 (Süden) des Profils. A110 liegt der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 am nächsten. Stark streuende Werte bei kurzen Perioden sind auf Störsignale zurückzuführen.

Eindimensionale Modellierung

Die eindimensionale Modellierung wurde mit einem Programm nach einem Verfahren von Jupp and Vozoff (1977a, 1977b) durchgeführt. Die Schichtanzahl, Schichtwiderstände und Tiefenlage werden iterativ unter Minimierung der Abweichung zwischen Daten und Modellantwort bestimmt. Der Vertrauensbereich der Fehlergrenzen beträgt 95 %. Bei den meisten Stationen ergab sich ein Dreischichtenfall mit einer obersten, 200 bis 300 m mächtigen Schicht von 30 bis 40 Ωm . Es folgt eine gut leitende Schicht von etwa 0.5 bis 1.2 Ωm , die bis in etwa 2 km Tiefe reicht. Die darunter liegende Schicht weist einen durchweg höheren Widerstand auf, jedoch ist dieser bereits von der Aufspaltung der Sondierungskurven beeinflusst und damit erst mit der zweidimensionalen Auswertung bestimmbar. Die Ergebnisse für die der Bohrung Groß Schönebeck nächstgelegene Station A110 sind in Bild A 3.3 gezeigt. Am Verlauf der Fehlergrenzen erkennt man, dass die Unterkante der ersten Schicht und der Widerstand der zweiten Schicht gut bestimmt sind. Die folgende Schichtgrenze und der Widerstand der dritten Schicht divergieren für die beiden Komponenten. Hier liegt bereits eine zweidimensionale Widerstandsverteilung vor.

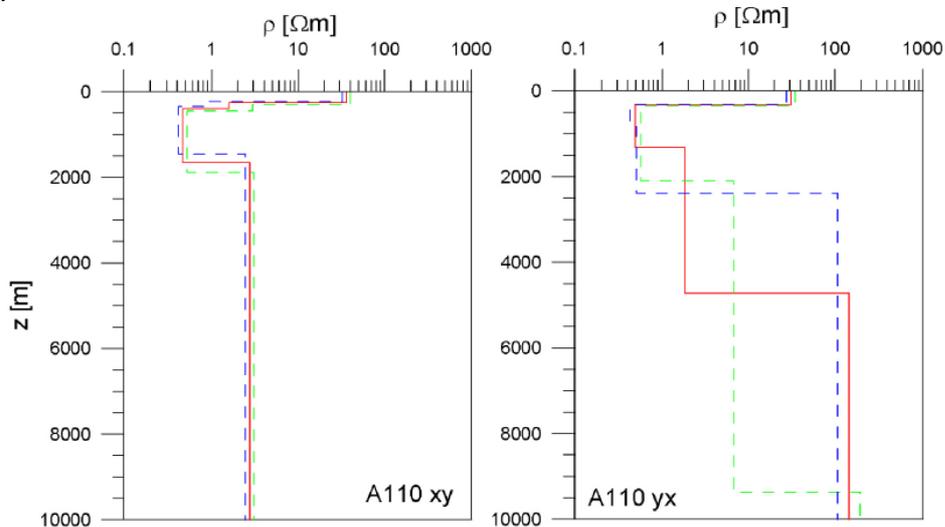


Bild A 3.3: Ergebnis der 1D Modellierung für die beiden Komponenten N-S (xy) und E-W (yx) der Station A110. Beste Modellanpassung (durchgezogene Linie) und Fehlergrenzen (gestrichelte Linien) innerhalb des 95 % Vertrauensbereichs.

Zweidimensionale Modellierung

Für die zweidimensionale Modellierung ist zunächst die Ermittlung einer geoelektrischen Streichrichtung erforderlich. Bei der Magnetotellurik stehen für jede Station prinzipiell zwei Meßgrößen zur Verfügung. Zum einen der Drehwinkel einer Hauptachsentransformation des Impedanzensors, der eine 90° Ambiguität aufweist. Zum zweiten treten bei Widerstandsstrukturen, die mindestens zweidimensional sind, vertikal gerichtete Komponenten des Magnetfeldes auf. Die Darstellung des vertikalen magnetischen Feldes der Induktionspfeile an der Erdoberfläche gibt eine Richtung an, die stets von der gutleitenden Struktur senkrecht wegzeigt.

Für die Daten des MT-Profiles wurden die Hauptachseneckwinkel um 15° für die größeren Perioden bestimmt. Gleichzeitig zeigen die Induktionspfeile vorzugsweise in südliche Richtung. Mit diesen beiden Angaben konnte die Streichrichtung der regionalen zweidimensionalen Struktur zu etwa -75° N für den mittleren Abschnitt des Profils bestimmt werden (WNW – ESE). Eine Ausnahme bilden die Stationen A110 und A120, bei denen beide Bestimmungsverfahren zu widersprüchlichen Ergebnissen führten, hier scheint die Widerstandsstruktur bereits dreidimensional zu sein.

Die 2D-Inversion erfolgte nach dem Algorithmus von Rodi and Mackie (2001) im Periodenbereich von 4 s bis 4096 s. In einer Reihe von Versuchen wurden die Parameter der Inversion variiert, um eine möglichst gute Anpassung zu erhalten. Mit einem Glättungsparameter $\tau = 3$ wurde nach 100 Iterationen die Fehlergrenze von 5% bei ρ_a und ϕ erreicht. In Bild A 3.4 wird die Anpassung an die Daten des mittleren Profilsabschnitts (Stationen A40 bis A150) gezeigt und in Bild A 3.5 das dazugehörige Modell dargestellt.

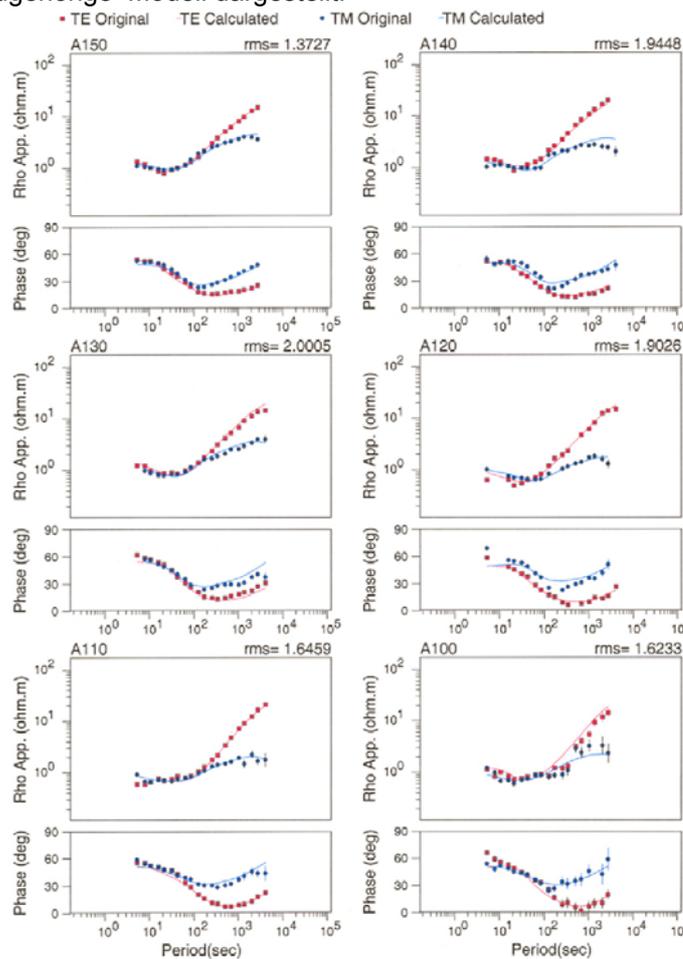


Bild A 3.4: Anpassung des 2D Modells an die Sondierungskurven der Stationen A100 bis A150. Punkte: Messdaten, Linien: Modellkurve.

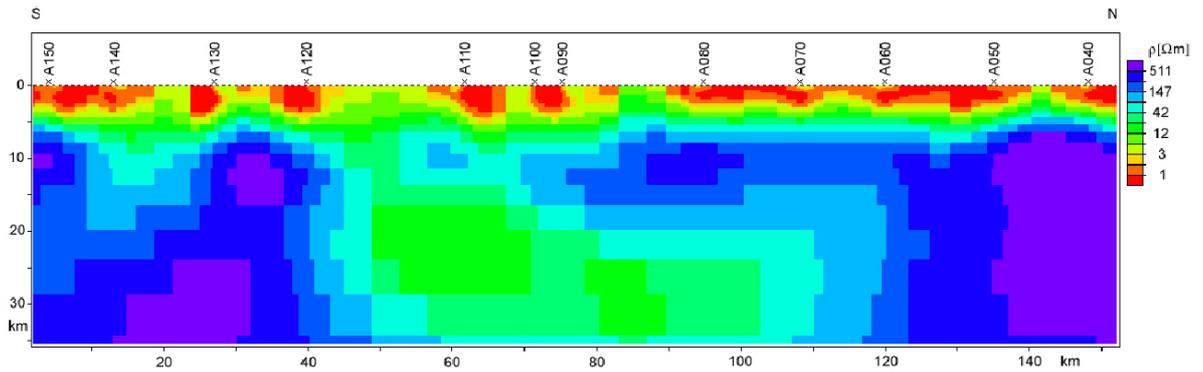


Bild A 3.5: Regionales 2D Modell im Mittelteil des Profils zwischen den Stationen A40 und A150 (siehe Text).

Die aus der eindimensionalen Modellierung bekannte oberflächennahe Schichtung wird bei der zweidimensionalen Modellierung nur unzureichend abgebildet. Dies ist nicht durch die Daten sondern durch den weiten Stationsabstand von durchschnittlich 13 km bedingt. Die oberflächennahe Struktur ist in diesem Fall nur durch die jeweils benachbarte Station belegt, da sich die Induktionsräume der Stationen erst bei den langen Perioden überlappen. Die oberste Schicht könnte vermutlich auch durchgängig leitfähig sein.

Im Süden und Norden des Profils nimmt der Widerstand allmählich zu, übersteigt in etwa 10 km Tiefe den Wert von 100 Ωm und beträgt in 20 km Tiefe einige hundert Ωm . Im mittleren Teil des Profils, zwischen den Stationen A90 und A120 deutet sich eine großräumige Leitfähigkeitsanomalie an, deren Widerstände höchsten 20 Ωm in 25 km Tiefe erreichen.

Zur geologischen Interpretation

1. Der Widerstand von 30 – 40 Ωm in den ersten 100 - 200 m ist den quartären Sedimenten zuzuordnen, die überall in Norddeutschland an der Oberfläche anzutreffen sind.
2. Der extrem gute Leiter zwischen einigen hundert und etwa 2000 m Tiefe mit Widerständen unter 1 Ωm ist auf die mit der Tiefe zunehmende Salinität der Grundwässer zurückzuführen.
3. Die große tiefliegende laterale Anomalie könnte mit der Pritzwalk Anomalie im Zusammenhang stehen, an deren östlichen Rand das Profil verläuft. Diese ist als eine Struktur mit hoher Magnetisierung und Dichte bekannt und wird als eine Intrusion gedeutet.

Zur Übertragbarkeit der Daten auf Groß Schönebeck

In der Forschungsbohrung Groß Schönebeck 3/90 wurden unter dem mächtigen Zechstein mit hohen elektrischen Widerständen in ca. 4000 m Tiefe Schichten mit hoch-salinaren Fluiden und niedrigen Widerständen um 0.1 Ωm angetroffen. Die Daten der Magnetotellurik weisen für diesen Bereich einen großräumigen (bulk) Widerstand um 10 Ωm aus. Die Porosität der Sandsteine in der Bohrung Groß Schönebeck beträgt im Mittel 10 %. Mit der Leitfähigkeits-Porositäts-Beziehung nach Archie erhält man aus einem Fluidwiderstand von 0.1 Ωm und einer Gesteinsporosität von 10 % einen bulk-Widerstand von 10 Ωm . Damit können die Ergebnisse der Magnetotellurik mit den Daten der Bohrung nachvollzogen werden.

Methodischer Ausblick

- Für eine laterale Auflösung der oberflächennahen Schichten ist eine hohe Stationsdichte mit einem Stationsabstand kleiner 1 km erforderlich.
- Infolge der abschirmenden Wirkung der guten elektrischen Leiter bis in 2 km Tiefe kann ein in 4 km Tiefe befindlicher guter Leiter erst ab einer relativ großen Mächtigkeit differenziert werden.

Elektromagnetisches Monitoring an der Bohrung Groß Schönebeck während der hydraulischen Stimulation Februar 2003

mit Beiträgen von P. Bedrosian, O. Ritter und U. Weckmann

Während der hydraulischen Stimulation in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 im Februar 2003 wurden Stationen zur Registrierung von elektromagnetischen Feldern zur Beobachtung von Veränderungen der elektrischen Widerstandsstruktur errichtet. Die Durchführung erfolgte durch die Arbeitsgruppe „Elektromagnetische Tiefensondierung“ in der Sektion Erdmagnetfeld des GFZ. Nachfolgend werden Aufbau, Messungen und Ergebnisse beschrieben. Die Angaben beruhen auf der Publikation von Bedrosian et al. (2003).

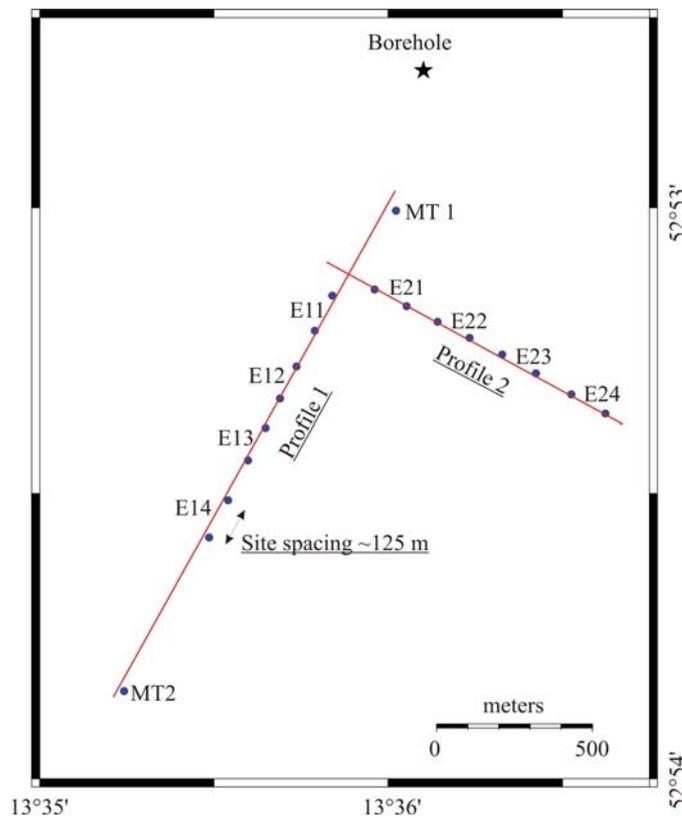


Bild A 3.6: Lokales EM Array für das Monitoring in der Bohrung Groß Schönebeck.

Das Array besteht aus 16 E-Feld-Stationen und zwei fünfkanaligen magnetotellurischen Stationen, die südlich der Bohrung in L-Form aufgebaut wurden. (Bild A 3.6). Es werden jeweils die Komponenten E_x und E_y bei den E-Feld-Stationen sowie E_x , E_y , B_x , B_y und B_z bei den magnetotellurischen Stationen registriert. Für die weitere Verarbeitung ist eine geeignete Bandpassfilterung unerlässlich. Einen Ausschnitt der gefilterten Zeitreihen zeigt Bild A 3.7.

Die Zeitreihen werden in Blöcke unterteilt und mit einer Fouriertransformation in Spektren gewandelt. Dann können mit einer Kohärenzanalyse die möglichst homogenen Anregungssignale ausgesucht werden. Die weiteren Verarbeitungsschritte sind Stapelung, Berechnung des Impedanzensors und schließlich die Sondierungskurven des scheinbaren spezifischen Widerstandes ρ_a und der Phase ϕ . Das Processing erfolgte mit dem Programmpaket EMERALD (Ritter et al., 1998).

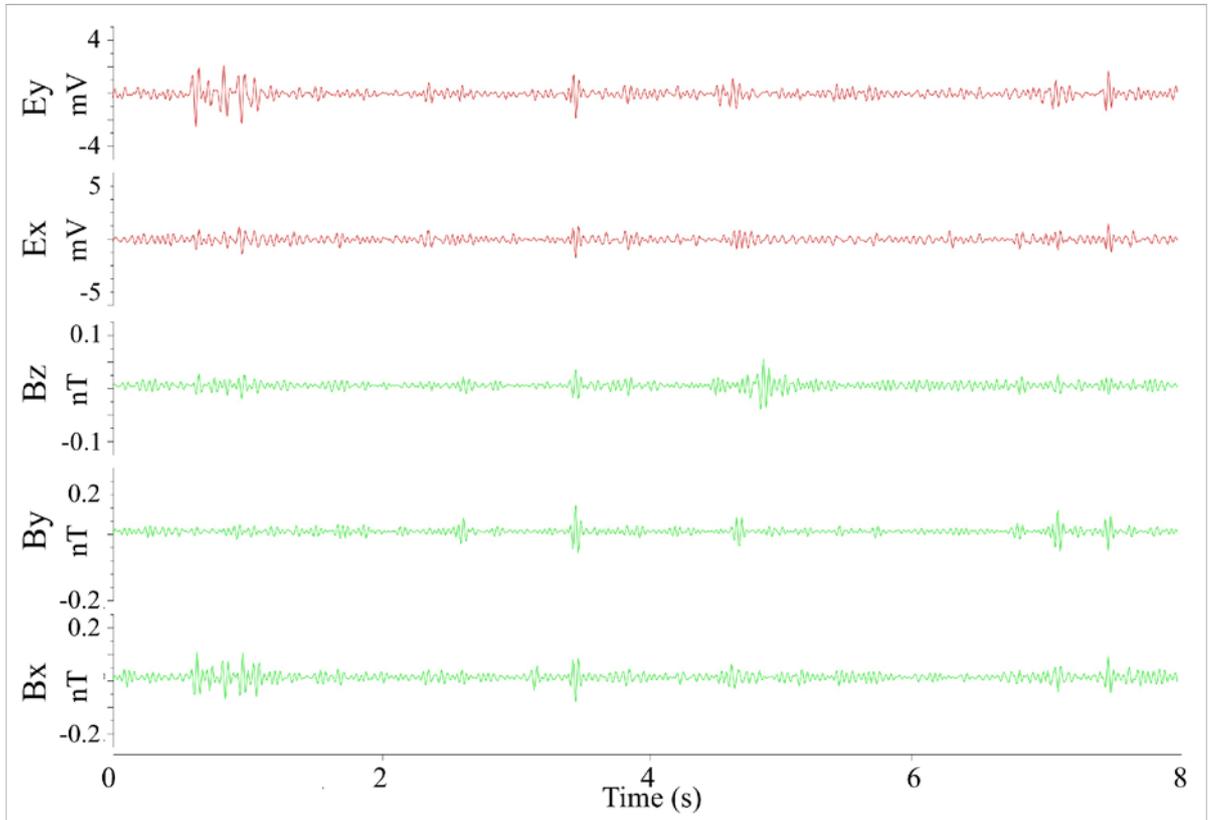


Bild A 3.7: Beispiel für eine Registrierung am Standort Groß Schönebeck vor der Stimulation nach Bandpassfilterung der Daten. Dargestellt sind die Zeitreihen für die zwei Komponenten des elektrischen Feldes und die drei Komponenten des Magnetfeldes. Die kohärenten Signale sind natürliche elektromagnetische Variationen, die für die magnetotellurische Auswertung verwendet werden können.

Monitoring

Um Veränderungen in der Widerstandsstruktur zu detektieren, werden die Daten in sechs Abschnitte unterteilt, die einzelnen hydraulischen Aktivitäten zugeordnet werden können (Bild A 3.8).

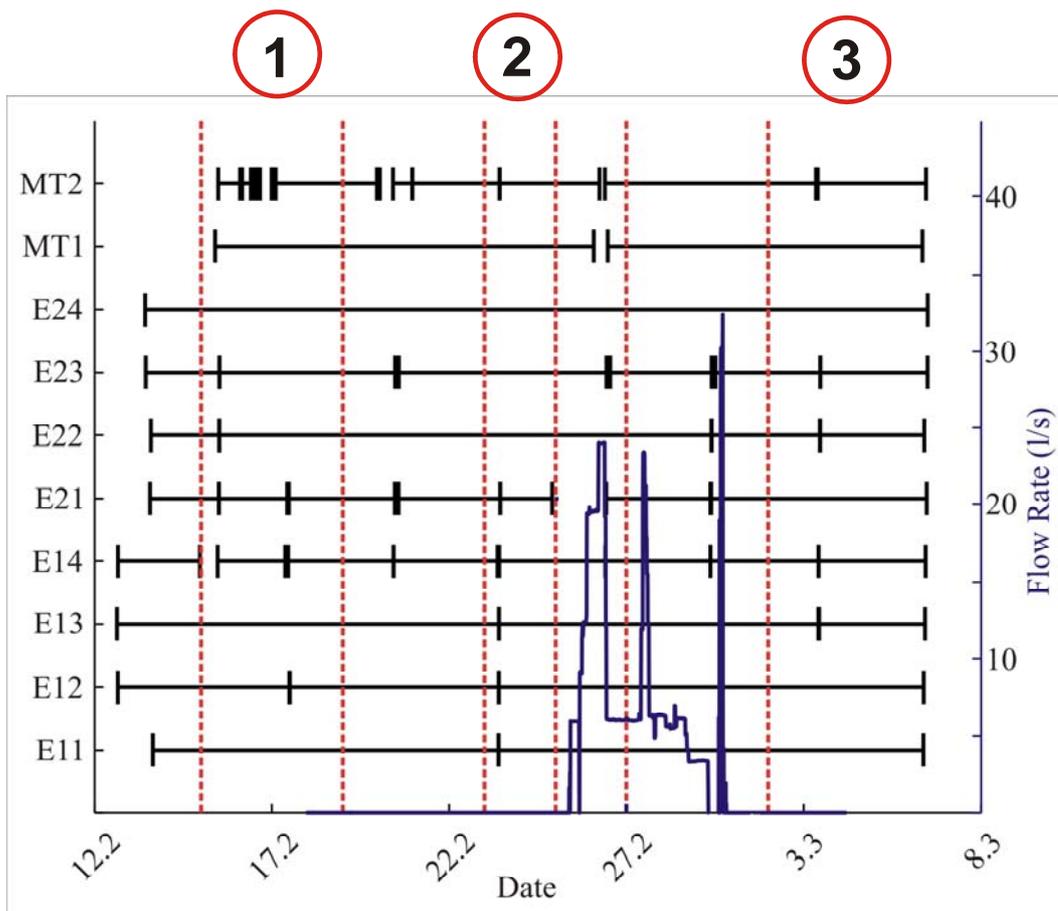


Bild A 3.8: Registrierzeiten der magnetotellurischen Stationen (Schwarze Linien). Die blaue Linie stellt die Fließrate in der Bohrung dar. Repräsentative Zeitfenster vor (1), während (2) und nach (3) den Stimulationsarbeiten.

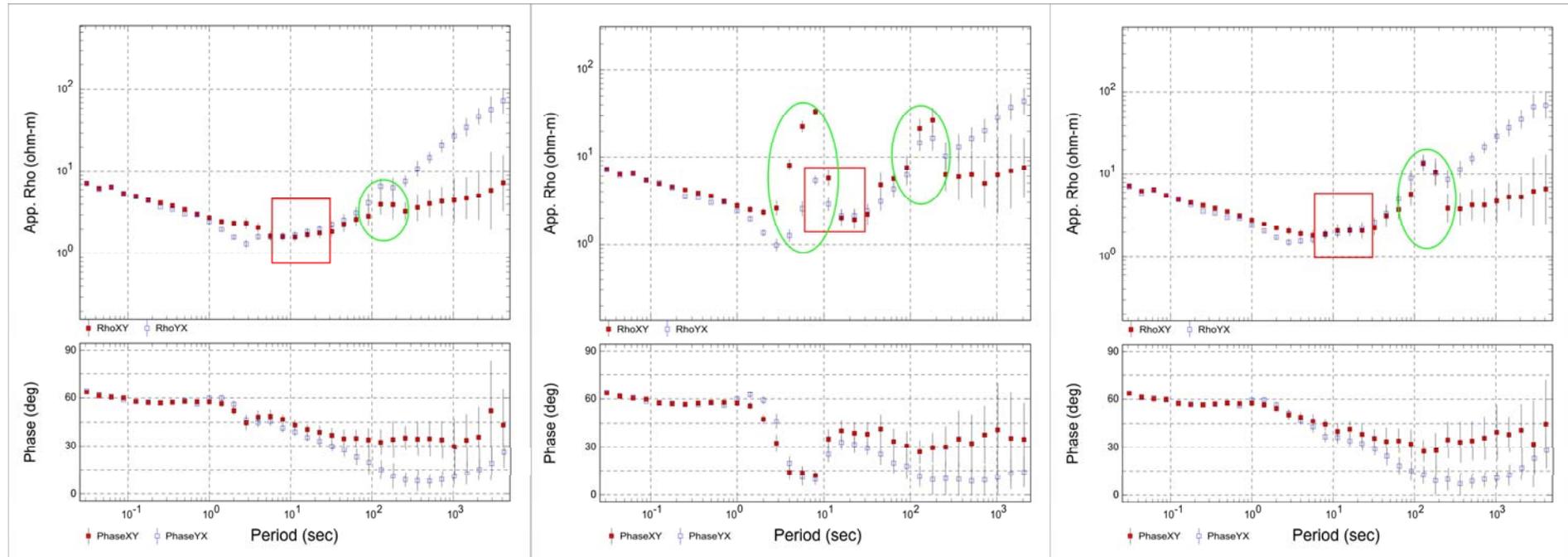


Bild A 3.9: Sondierungskurven von drei ausgewählten Registrierzeitfenstern, vor (links), während (mitte) und nach (rechts) den Stimulationsarbeiten. Rot eingeraht ist der Periodenbereich, in dem eine Variation infolge der Stimulation zu erwarten wäre. Grüne Kreise kennzeichnen stark gestörte Messwerte.

Ergebnisse

In Bild A 3.9 sind die Sondierungskurven für drei Zeitabschnitte vor der Stimulation und zwei danach wiedergegeben. Diesen Kurven liegen jeweils Registrierzeiten von zwei bis vier Tagen zugrunde. Die Sondierungskurven zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die des MT Profils westlich von Groß Schönebeck (siehe oben). Unter der Annahme eines mittleren elektrischen Widerstandes von 1 bis 5 Ωm in den oberen 4 Tiefenkilometern kann ein Periodenbereich von 6 bis 30 s definiert werden, in dem Widerstandsänderungen in 4 km Tiefe zu signifikanten Änderungen in der Sondierungskurve führen könnten. Dieser Abschnitt ist rot eingerahmt. Gleichzeitig sind mit grünen Ellipsen die Bereiche mit auffälligem Störpegel gekennzeichnet. Aus Bild A 3.9 ist zu erkennen, dass bis auf das erste und letzte Zeitfenster der interessante Periodenbereich gestört ist. Besonders dominant waren in dieser Zeit Perioden um 8 s unbekannter Ursache. Für die Widerstands-Tiefen-Modelle wurden zwei ungestörte Zeitabschnitte ausgewählt, sechs Tage vor und sieben Tage nach der Stimulation. Die Modellierung erfolgte mit dem Programmpaket WinGLink mit dem Algorithmus von Rodi and Mackie (2001).

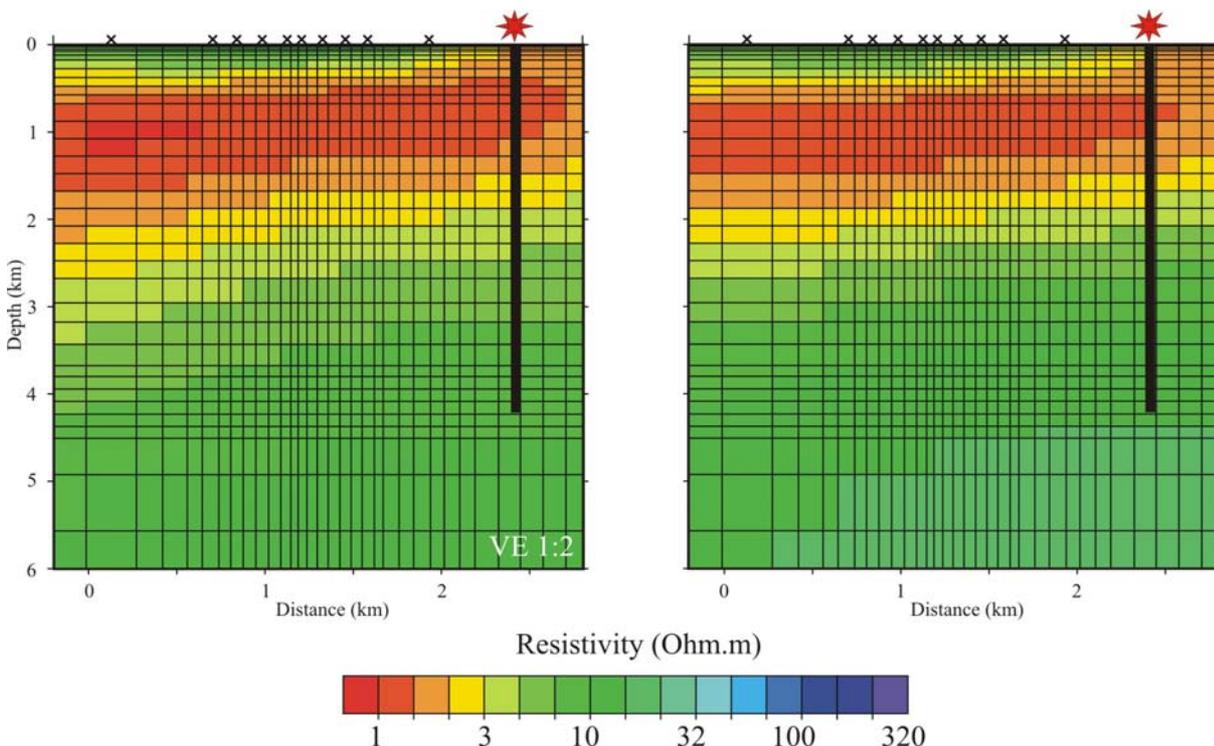


Bild A 3.10: Widerstands-Tiefen-Modell für Groß Schönebeck (Profil 1), vor (links) und eine Woche nach (rechts) der Stimulation. Lage und Tiefenerstreckung der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 sind mit Stern und Balken eingezeichnet.

Das Modell zeigt eine dreifache Schichtung, oberflächennah um 3 Ωm , gefolgt von einer Zone sehr niedrigen Widerstandes unter 1 Ωm ab einer Tiefe von 100 m und einer darunter liegenden hochohmigen Schicht um 20 Ωm ab etwa 2 km Tiefe. Infolge des extrem guten elektrischen Leiters oberhalb ist diese nicht weiter auflösbar. Dennoch konnte mit dem dichten Messarray in den oberen vier Tiefenkilometern eine verbesserte Auflösung gegenüber dem MT Profil östlich von Groß Schönebeck erreicht werden.

Die beiden Widerstands-Tiefen-Modelle vor und nach der Stimulation unterscheiden sich nur geringfügig (Bild A 3.10). Etwaige Änderungen des Widerstandes sind eine Woche nach der Stimulation nicht festzustellen.

Modellstudie

Mit einer Modellstudie soll abgeschätzt werden inwieweit eine Widerstandsänderung in 4 km Tiefe unter einer sehr gut leitenden Schicht, wie in Groß Schönebeck vorhanden, mit magnetotellurischen Messungen detektierbar ist. Die Fraczone um den Injektionspunkt wird durch einen Block niedrigen elektrischen Widerstandes dargestellt (Bild A 3.11). Mit einer Vorwärtsmodellierung kann die an der Oberfläche registrierbare Antwort modelliert und mit dem Ausgangszustand verglichen werden (Programm WinGLink).

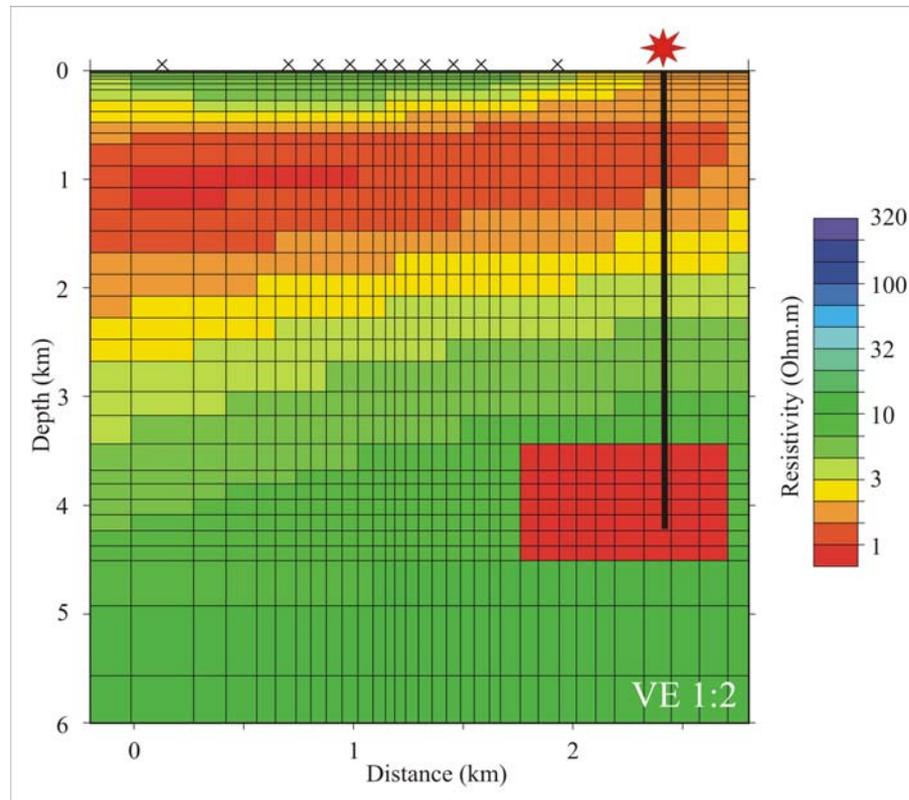


Bild A 3.11: Modell eines künstlich erzeugten Widerstandscontrasts im Injektionspunkt der Bohrung Groß Schönebeck.

Es wurde eine Reihe von Szenarien mit variierenden Abmessungen und Widerstandscontrasts berechnet (Bild A 3.12). Unter Annahme einer kugelförmigen Ausdehnung des gut leitenden Rissystems wurden Radien von 100, 200, 400 und 500 Metern modelliert, jeweils mit einer Reduktion des Widerstands um einen Faktor 10, 30 bzw. 100. Die Beispiele, bei denen die Veränderung an der Oberfläche detektierbar wäre, sind mit roten Ellipsen markiert. Für die Beispiele Radius 500 m und Widerstandsreduktion um einen Faktor 30 bzw. 100 sind die modellierten Sondierungskurven in Bild A 3.13 wiedergegeben.

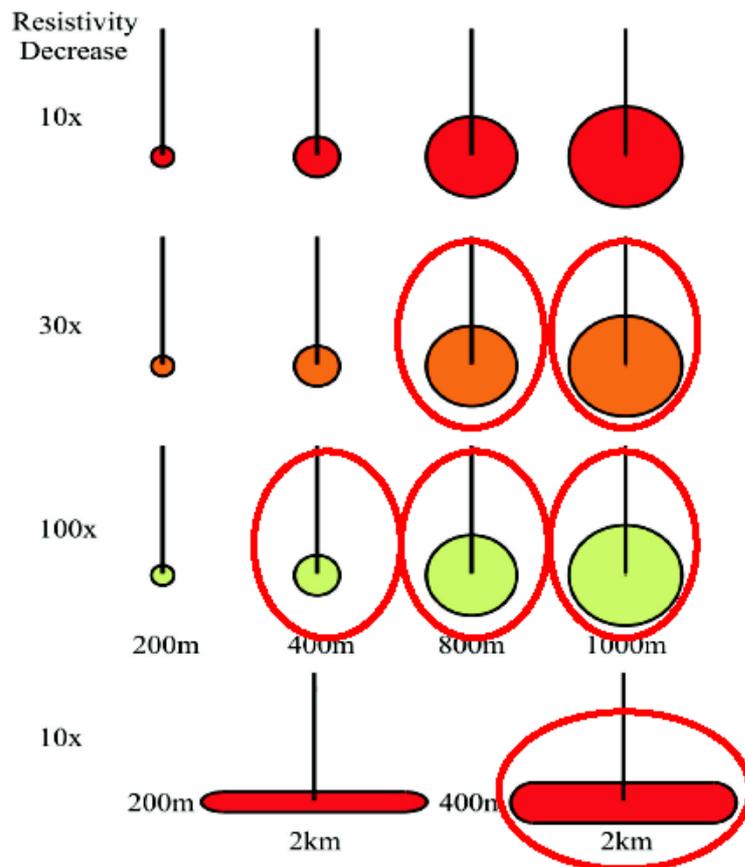


Bild A 3.12: Fallstudie mit verschiedenen Widerstandskontrasten und räumlichen Ausdehnungen des Fracvolumens. Rote Ellipsen kennzeichnen Fälle, bei denen ein magnetotellurischer Messeffekt an der Erdoberfläche zu erwarten wäre.

Die beiden unteren Modelle in Bild A 3.12 sind für den Fall der Ausbreitung des Rissystems in einem 200 m bzw. 400 m mächtigen Horizont mit einem Radius von 1000 m gerechnet. Damit wird simuliert, dass durch die Stimulation nur in der Sandsteinschicht ein Frac entsteht, nicht aber in den hangenden Tonsteinen bzw. liegenden Vulkaniten. In diesem Fall würde erst eine Frac-Höhe von 400 m eine messbare Antwort ergeben.

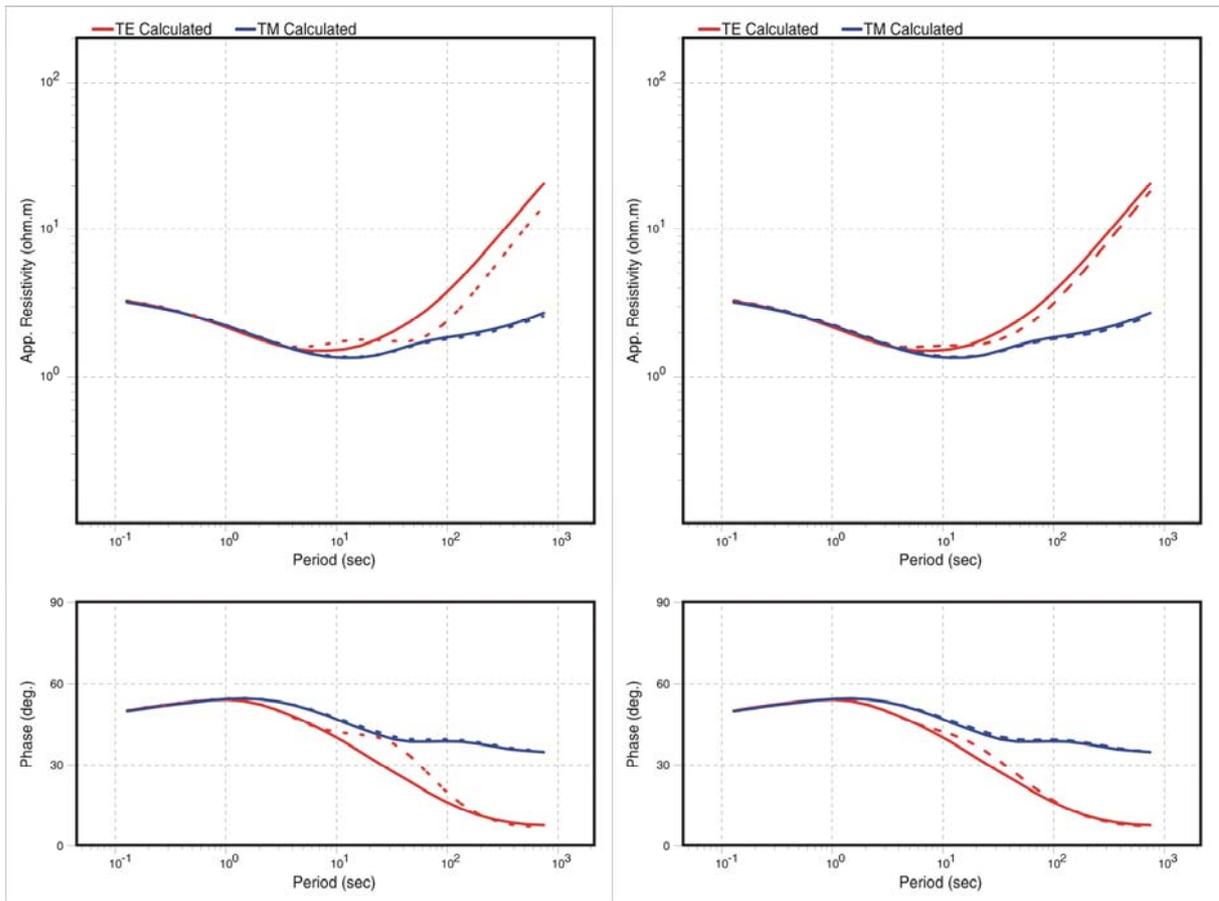


Bild A 3.13: Modellierung von Szenarien: Modellkurven für zwei Fallbeispiele, kugelförmige Struktur, Radius 500 m, Widerstandsreduktionsfaktor 100 (links) bzw. 30 (rechts). Eine Leitfähigkeitsänderung im Untergrund würde hauptsächlich in der TE Mode feststellbar sein (rote Kurven).

Zusammenfassung der Ergebnisse

- Die während störarmer Zeiten berechneten Modelle der Widerstandsverteilung sind reproduzierbar. Damit ist ein Monitoring des elektrischen Widerstandes prinzipiell möglich.
- Eine Woche nach der Stimulation ist keine Leitfähigkeitsveränderung erkennbar. Das verpresste Süßwasser könnte durch Vermischung mit Formationsfluid aufgesalzen worden sein, so dass der Leitfähigkeitskontrast für die Messungen zu klein wird, um an der Erdoberfläche noch detektierbar zu sein.
- Ein großer Widerstandskontrast und/oder ein weites künstlich erzeugtes Rissssystem sind erforderlich um einen messbare Antwort an der Erdoberfläche zu erzeugen.
- Die sehr gut leitenden Schichten in 1 – 2 km Tiefe an der Bohrung Groß Schönebeck schirmen tiefer liegende Veränderungen in hohem Maße ab.
- Eine Weiterentwicklung von Rechenalgorithmen zur Reduktion von Störsignalen in den Daten wäre für künftige Stimulationsbeobachtungen vorteilhaft, da durch den Maschineneinsatz mit einem hohen elektromagnetischen Störpegel gerechnet werden muß.
- Zur sicheren Detektion von Veränderungen durch die Stimulation in 4 km Tiefe müsste das verpresste Volumen erheblich größer sein.
- Der Leitfähigkeitskontrast zwischen Formations- und Injektionsfluid sollte 1,5 bis 2 Dekaden umfassen, damit ein Messeffekt erkennbar wird.

Literatur zum EM Monitoring und Re-Prozessing MT Norddeutschland

Bedrosian, P., U. Weckmann, O. Ritter, C. Hammer, J. Hübert, and A. Jung. Electromagnetic Monitoring of the Groß Schönebeck Stimulation Experiment. Poster at 17. Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Königstein (Sachsen), 29.09. – 03.10.2003.

Hoffmann, N., B. Fluche, H. Jödicke, A. Jording, G. Kallaus, W. Müller, and G. Pasternak. Erforschung des tieferen Untergrundes der Nordostdeutschen Senke – ein Beitrag der Magnetotellurik zur Untersuchung des präwestfalen Muttergesteinspotentials. Technical Report BMBF-Forschungsvorhaben: 0327105 C, BGR, Berlin and Hannover, 1997. Unveröffentlicht.

Hoffmann, N., H. Jödicke, B. Fluche, A. Jording und W. Müller. Modellvorstellungen zur Verbreitung potentieller präwestfälischer Erdgas-Muttergesteine in Norddeutschland – Ergebnisse neuer magnetotellurischer Messungen. *Z. Angew. Geol.*, 44 (3), 1998.

Hoffmann, N., H. Jödicke, and P. Gerling. The distribution of Pre-Westphalian source rocks in the North German Basin – Evidence from magnetotelluric and geochemical data. *Geologie en Mijnbouw / Netherlands Journal of Geosciences*, 80 (1), 71 - 84, 2001.

Jupp, D. L. B. and K. Vozoff. Resolving Anisotropy in Layered Media by Joint Inversion. *Geophysical Prospecting*, 25, 460 – 470, 1977a.

Jupp, D. L. B. and K. Vozoff. Stable iterative methods for the inversion of geophysical data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 42, 957 – 976, 1977b.

Klarner, S. Analyse des strukturellen Aufbaus (Grabenproblematik) des Rotliegenden im Raum Zehdenick-Gransee. *Geol. Jb.*, A131, 239 – 251, 1993.

Ritter, O., Junge, A. and Dawes, G. J. K. New equipment and processing for magnetotelluric remote reference observations. *Geophys. J. Int.*, 132, 535 - 548, 1998.

Rodi, W. and R. L. Mackie. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversions. *Geophysics*, 66, 174 – 187, 2001.

Anhang A 4

Gleichstromgeoelektrische Messungen

mit Beiträgen von E. Danckwardt, F. Jacobs und R. Kniess

Vor und nach den Stimulationsarbeiten in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 sollten durch Messungen des elektrischen Widerstandes im Bohrloch sowie zwischen Oberfläche und Bohrloch die Veränderungen durch die hydraulischen Experimente beobachtet werden.

Am Institut für Geophysik und Geologie der Universität Leipzig wurde ein Vertikal Elektroden System (VES) entwickelt, mit dem sowohl Messungen des elektrischen Widerstandes im Bohrloch (in hole) wie auch Messungen zwischen Erdoberfläche und Bohrloch (surface to hole) durchgeführt werden können. Mit einer Sondenkette im Bohrloch (in hole Messungen) kann die Verteilung des elektrischen Widerstandes in der Bohrlochumgebung in einem Radius von mehreren Zehnermetern untersucht werden. Diese Information erweitert damit die nur im Meterbereich sensitiven konventionellen Bohrlochtools wie z. B. Dual Laterolog und Dual Induction Log.

Mit den Oberflächen-zu-Bohrloch-Messungen ist es möglich, richtungsabhängige Widerstandsänderungen (z. B. durch Bildung von Fracs und/oder Fluidbewegungen) zu ermitteln. Daraus könnten Aussagen über einen günstigen Zielpunkt der notwendigen zweiten Bohrung abgeleitet werden. Bei einem entsprechend höheren Messaufwand (Einspeisung auf mehreren konzentrischen Kreisen um die Bohrung) ist auch eine tomographische 3D-Inversion möglich.

Dieses System wurde erfolgreich im Rahmen des Pumptests an der Kontinentalen Tiefbohrung Oberpfalz (DFG-Projekt JA 590/19-2, "Geoelectrical investigation in the surround area of continental boreholes to estimate actual states and processes by combined surface / vertical electrode systems") eingesetzt.

Die gleichstromgeoelektrischen Arbeiten wurden im Rahmen des Projekts als Auftrag an die Universität Leipzig vergeben. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus dem Bericht des Instituts für Geophysik und Geologie der Universität Leipzig wiedergegeben.

Sondenkettenmessungen im Bohrloch

Mit dem im Institut für Geophysik und Geologie der Universität Leipzig entwickelten Vertikal-Elektroden-System (VES) wurden mehrere Bohrloch-Logs gefahren. Die Hauptbestandteile des VES sind ein 100 m langes "Bridle-Kabel" mit 5 in einem Abstand von 25 m angebrachten Elektroden. Mit dem VES wurde über mehrere Tage hinweg in verschiedenen Konfigurationen gemessen (Wenner, großer Dipol, kleiner Dipol), siehe Bild A.1. Als Messsystem kam die Geoelektrikapparatur 'GEOTOM' zum Einsatz.

In Bild A 4.1 ist auch einen Schnitt durch ein Modellierungsergebnis (Autor: Kniess) mit dargestellter Potentialverteilung während einer Inhole-Messung zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Isolinien durch die hohe Leitfähigkeit der Bohrlochflüssigkeit in das Bohrloch hineingezogen werden. In Analogie zur gut leitfähigen Konglomeratschicht im Bohrloch wurde eine 60 m dicke Schicht mit nur 0,1 Ω m Widerstand in das Modell eingefügt.

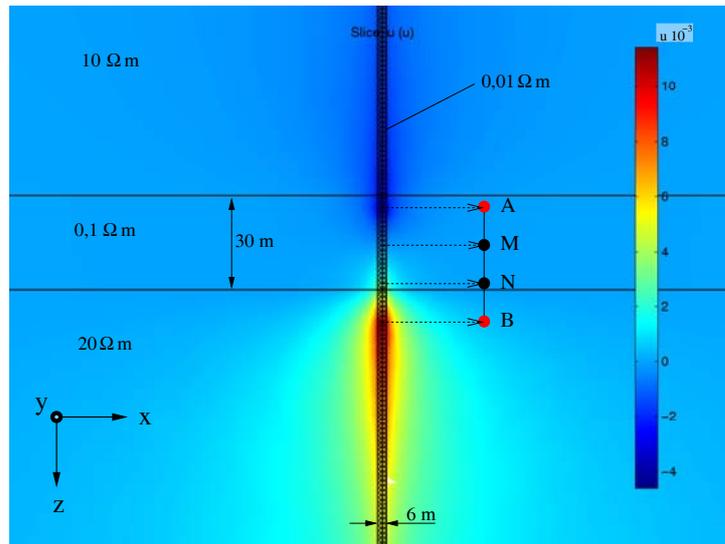


Bild A 4.1: Messprinzip des Vertikalelektrodensystems (VES) im Bohrloch. Die Anordnung der Stromspeisung A, B und Messelektroden M, N kann durch wechselseitiges Anschließen der fünf Elektroden an der Kette variiert werden. Weiterhin dargestellt ist das Ergebnis der Potentialverteilung U aus einer Modellierung für eine geschichtete Leitfähigkeitsverteilung mit einer 30 m mächtigen gut leitenden Schicht von $0,1 \Omega\text{m}$.

Durch Modellierungen von Bohrlochbefahrungen mit dem VES wurde versucht, ein Widerstandsmodell zu finden. Bild A 4.2 zeigt zwei Modellkurven im Vergleich zu der tatsächlich gemessenen Widerstandskurve. Es ist deutlich der nicht zu vernachlässigende Einfluss der niederohmigen Bohrlochflüssigkeit zu erkennen. Die beiden Kurven unterscheiden sich zusätzlich in der Qualität. Da durch die Einbeziehung des Bohrloches sehr hohe Widerstands- und Geometriecontraste entstehen, muss die Qualität durch erhöhten Rechenaufwand kompensiert werden. Trotzdem ist es möglich für Messungen mit Gestein

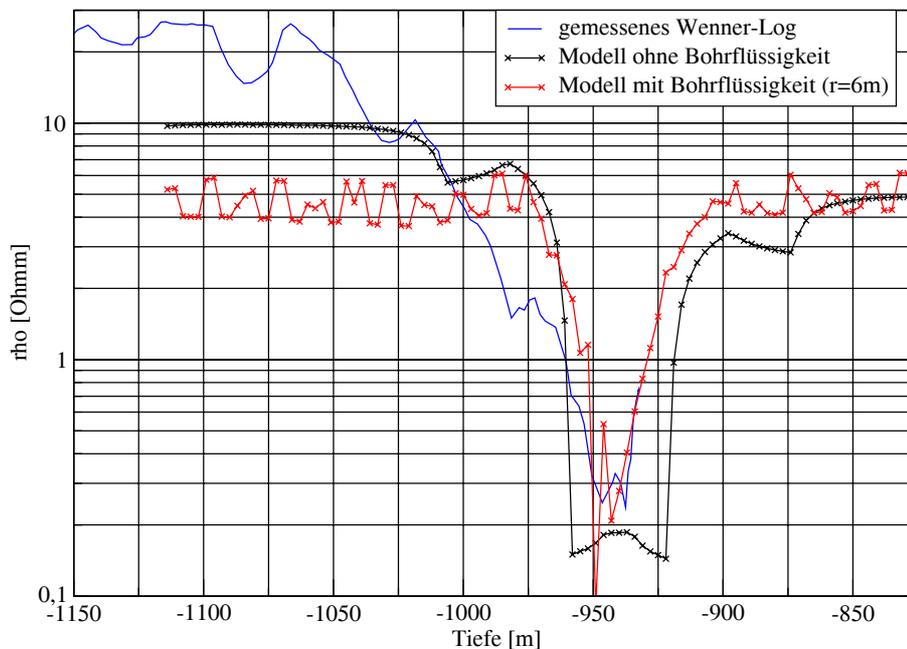


Bild A 4.2: Finite Elemente Modellierung (FEM) einer Bohrlochmessung mit dem VES durch die Modellstruktur von Bild A 4.1. Die angegebenen Tiefenwerte entsprechen den Modellkoordinaten. Modell mit und ohne Berücksichtigung der Bohrlochflüssigkeit. Zum Vergleich wurde eine In hole Messung in Wenneranordnung aus der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 eingefügt.

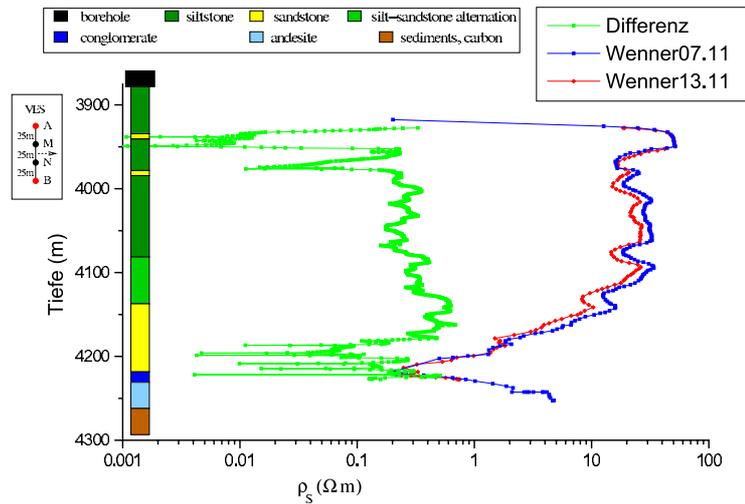


Bild A 4.3: In Hole Messung in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 mit der Wenneranordnung (A-M-N-B). Dargestellt sind zwei Fahrten zu verschiedenen Zeiten (rote und blaue Kurve) sowie die Differenz der beiden (grün).

In Bild A 4.3 sind zwei Wennermessungen, die innerhalb von 6 Tagen gefahren wurden, dargestellt. Die Tiefe wurde dabei auf die Mitte der Messanordnung korrigiert. Aus dem zusätzlichen Differenzplot können Bereiche großer und kleiner Änderungen zwischen den Messungen unterschieden werden. Die Differenz ist für eine aussagekräftigere Darstellung auf die Mittelwerte der beiden Messungen an der jeweiligen Tiefe normiert. Zu erkennen sind geringe Differenzen im Bereich der Sandsteinschichten und ein Widerstandsabfall in Höhe der Konglomeratschicht. Im oberen Teil bis etwa 3940 m Tiefe sind die Messwerte noch stark von der Verrohrung des Bohrloches beeinflusst.

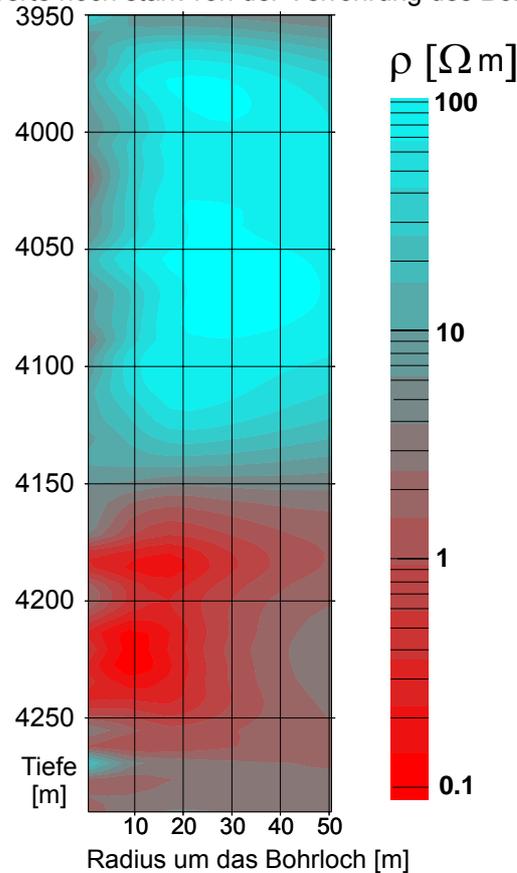


Bild A 4.4: Inversion der Wenner- und Dipol-Daten der VES in der Bohrung Groß Schönebeck. Dargestellt ist die Verteilung des elektrischen Widerstandes in einem Schnitt entlang der Bohrlochachse in radialer Richtung. Hohe Widerstandswerte (blau), niedrige (rot). Auf der Ordinate ist der Radius um das Bohrloch und auf der Abszisse die Tiefe aufgetragen, beide in Metern.

Die In-Hole-Messungen in Wenner- und Dipolanordnung wurden mit einem für dieses Problem angepassten Inversionsalgorithmus ELTOMO-GS (Autor: E. Danckwardt) invertiert. Dabei werden Bohrl Lochdurchmesser und Bohrl Lochflüssigkeitswiderstand als konstant vorgegeben. Die Daten aus dem Laterolog Deep werden als a priori Information für die unmittelbare Bohrl Lochumgebung genutzt. In Bild A 4.4 ist ein vertikaler Schnitt entlang der Bohrl Lochachse mit der modellierten Widerstandsverteilung für das VES dargestellt. Man erkennt in den Tiefenabschnitten von 4180 bis 4240 m Zonen guter elektrischer Leitfähigkeit. Die Struktur reicht 20 bis 30 Meter tief ins Gebirge. Diese könnte als erhöhte Vernetzung der hydraulischen und elektrischen Wegsamkeiten interpretiert werden. Die VES Messungen liegen zeitlich nach den abgepackerten Sandsteinfracs und noch vor den massiven Wasserfracs.

Da in die Bohrung Groß Schönebeck 3/90 nach der Aufwältigung im November 2003 der Liner eingebaut wurde, war eine Wiederholungsmessung mit der VES parallel zur Schlumberger DLL Messung zur Beobachtung der Veränderungen durch die Wasserfracs nicht mehr möglich.

Oberflächen-zu-Bohrloch-Messungen

Bei den Oberflächen zu Bohrloch Messungen dient die Sondenkette als Potentialmessaufnehmer während die Stromspeisung an der Erdoberfläche erfolgt.

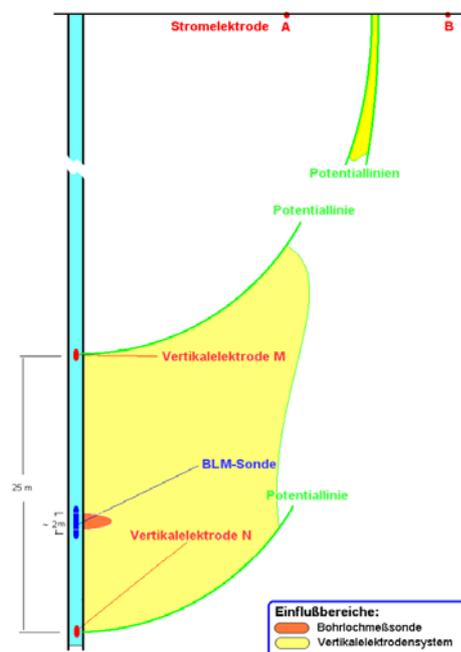


Bild A 4.5: Messprinzip der Oberflächen-Bohrloch-Messungen.

Mit den Stromspeisungen in der Nähe der Bohrung unter verschiedenen Azimuthen und gleichzeitiger Spannungsregistrierung mit dem VES in dem unverrohrten Bereich des Bohrloches sollte eine Richtungsabhängigkeit der Leitfähigkeiten ermittelt werden. Erfolge mit ähnlichem Aufbau wurden bereits an der Kontinentalen Tiefbohrung Oberpfalz (KTB) erreicht. In der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 zeigte sich nach nur wenigen Einspeisungen, dass an der Sondenkette im offenen Bohrlochabschnitt von 3874 bis 4291 m kein Nutzsignal zu registrieren ist. Zunächst wurde mit Signalstapelungen versucht, das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Auch die Steigerung der Stromspeisung auf maximal mögliche 30 Ampere führte zu keinem auswertbaren Spannungssignal am VES. Offenbar findet der Stromfluss vor allem in den elektrisch gut leitenden Gesteinsschichten der oberen 2000 m statt, so dass in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 keine Spannungsvariation messbar ist, siehe auch Anhang A 3.

Stimulationsbegleitende elektrische Registrierungen

Während der Stimulation im Februar 2003 wurden elektrische Potentialmessstrecken in der Bohrplatzumgebung aufgebaut. Dienen diese dazu, Veränderungen des elektrischen Feldes zu registrieren. In Bild A 4.6 ist ein Registrierbeispiel einer Station etwa ein Kilometer nördlich des Bohrplatzes wiedergegeben. Es deuten sich Zusammenhänge mit der Rückförderung der Fluide aus der Bohrung an.

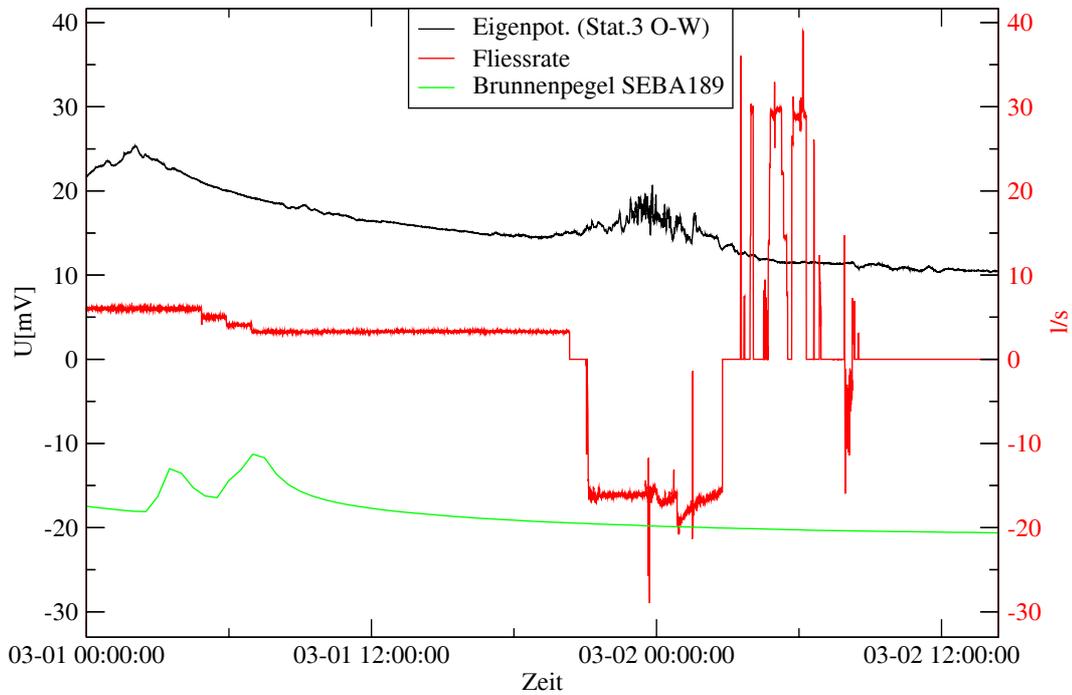


Bild A 4.6: Registrierung des elektrischen Potentials (Station 3, EW) an der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 während der hydraulischen Tests (schwarze Kurve). Gleichzeitig aufgetragen sind Brunnenpegel (grüne Kurve) und Fließrate (rote Kurve) in der Bohrung Groß Schönebeck 3/90.

Anhang A 5

Glossar

Eine aktuelle Version dieses Glossars kann unter der Webadresse <http://www.gfz-potsdam.de/pb5/pb52/services/welcome.html> eingesehen werden.

ac-Klüfte

Klüfte, die senkrecht zu einer Faltenachse verlaufen.

ALAT

Azimuthales Laterolog, Messung des richtungsabhängigen elektrischen Gebirgswiderstandes mit einem Bohrlochmessgerät.

Andesit

Feldspatreiches vulkanisches Gestein.

Array

Aufbau von Messstationen im Gelände nach bestimmten Kriterien, um eine bevorzugte Empfindlichkeit für bestimmte Richtungen und/oder Gebiete zu erhalten.

Aufbrechdruck

Druck, bei dem bei einer hydraulischen Stimulation das Gestein aufzureißen beginnt.

Auslauftest

Hydraulischer Test nach Stimulation einer Bohrung unter Ausnutzung erhöhter Kopfdrucke zur Rückförderung.

Biozide

Stoffe mit allgemeiner oder spezifischer Wirkung auf oder gegen Organismen, auch Mikroorganismen einschließlich Bakterien, Viren oder Pilze, die eingesetzt werden, um deren Ausbreitung zu verhindern.

Blattverschiebung

Horizontale Verschiebung von Gesteinsblöcken, vgl. auch strike-slip-fault.

breakdown Test

Injektion von Fluiden bei hohen Raten. Mit diesem Test wird der Aufbrechdruck des Gebirges bestimmt.

Build-up

Druckaufbau durch Absperren des Bohrlochs nach hydraulischen Maßnahmen.

bulk-Widerstand

elektrischer Widerstand einer größeren Einheit, z. B. eines Gebirgsblocks, ohne Berücksichtigung von Vorzugsrichtungen.

Dendritisch

[griech. Dendron „Baum“] baum-, strauchförmig verzweigte Struktur

Dipol-Dipol-Anordnung

in der Geoelektrik eine Anordnung von Stromelektroden AB und Messelektroden MN in der Folge ABMN hinter- oder nebeneinander.

DTS

Distributed Temperature Sensing, eine Technik zur Messung von Temperaturen entlang von Glasfaserkabeln.

Equilibrium Rate

Injektionsrate zur Erreichung des hydraulischen Gleichgewichts.

Equilibriumtest

Methode zur Bestimmung des Riss-schließdruckes. Zunächst wird ein Fluid oberhalb des Fracdrucks in die Formation injiziert (Fracrate). Hierdurch wird ein Riss erzeugt und ausgedehnt. Im Anschluss wird die hohe Fließrate schlagartig auf ein geringeres Niveau, die Equilibrium Rate, reduziert und dort konstant gehalten solange bis der Behandlungsdruck ein konstantes Niveau erreicht. Sobald der Druck wieder leicht ansteigt, ist ein Equilibrium zwischen der kleinen in den Riss injizierten Fluidrate und der in die Matrix, über die Rissflächen, abfließenden Fluidrate erreicht. Das Bohrloch wird nun eingeschlossen und der Druckabfall aufgezeichnet. Mit Hilfe von Modellannahmen kann der Riss-schließdruck aus dem Druckverhalten während des Testablaufs berechnet werden. Eine Überprüfung des ermittelten Wertes erfolgt anhand einer klassischen Analyse des Druckabfalls am Ende des Tests.

Exergetischer Wirkungsgrad

Der exergetische Wirkungsgrad beschreibt, welcher Anteil der im Thermalwasser enthaltenen Exergie im Produkt bzw. in den Produkten wiedergefunden wird. Der exergetische Wirkungsgrad eines geothermisch angetriebenen Kraftwerkes ist definiert als Quotient von Exergie des Produktes (hier: elektrische Leistung) zu zugeführter Exergie (hier: Exergie des Thermalwassers).

Fazies

Summe der Eigenschaften, die ein Sediment bei seiner Bildung bezüglich seines Aufbaus oder seines Fossilinhaltes erhalten hat.

flow-back test

siehe Auslauffest.

Fluid

Sammelbegriff für Wässer aus Tiefengesteinen, die gelöste Salze und/oder Gas enthalten.

Fluidrheologie

Fließeigenschaft des Fluids.

Fördertest

Hydraulischer Test zur Förderung von Tiefenwasser mittels Tiefenpumpe.

Formation Micro Imager (FMI)

Bohrlochmessgerät zur Abbildung der Bohrlochwand auf Basis des elektrischen Widerstandes mit Sensorplatten, die an dieser anliegen.

Formationswasser

Wässer bzw. Fluide, die aus einer bestimmten Gebirgsformation stammen.

Frac

künstlich erzeugter Riss im Gestein.

Fracdruck

Druck, bei dem ein künstlich erzeugter Riss im Gestein erzeugt wird, auch Aufbrechdruck.

Gamma Ray (GR)

Bohrlochmessgerät zur Messung der radioaktiven Strahlung des Gebirges. Dient vor allem zur Tiefeneinordnung von verschiedenen Messfahrten.

Gel

In der Bohrtechnik als Träger für Partikel verwendet, z. B. Stützmittel (Proppants).

Geophon

Messsensor für die Registrierung von seismischen Wellen.

Georeferenzierte Daten

Kartendaten, die auf geographische Referenzpunkte bezogen sind.

GOST Rohre

Rohre, die nach dem GOST Standard gefertigt wurden. Abkürzung für russisch „Gosudarstvennyj obschtschesojusnyj standart, "Staatlicher Allunions-Standard", Bezeichnung für die technischen und wissenschaftlichen Normen der GUS (entspricht dem deutschen DIN).

Graben

geologische Dehnungsstruktur, von Störungen begrenzt

Horizontale Hauptspannung im Gebirge

Kraft, die hervorgerufen durch tektonische Prozesse, im Gebirge auf eine Fläche senkrecht zur horizontalen Ebene wirkt.

Horizontkorrelation

Verbindung von Horizonten gleicher Stratigraphie in geologischen Schnittbildern.

Horner-Verfahren

Standardverfahren zur Linearisierung des Theis-Problems (radiale Anströmung).

Hostile Natural Gamma Spectra (HNGS)

Bohrlochmessgerät zur Messung der Gesteinsradioaktivität aufgeteilt nach den drei Hauptträgern Kalium, Thorium und Uran. Der Begriff „hostile“ steht hier für die Ertüchtigung des Geräts für hohe Drücke und Temperaturen.

Ignimbrit

Schmelztuff, pyroklastisches Gestein, das aus einer vulkanischen Glutwolke abgesetzt wird.

Inhibitor

Chemischer Zusatz zum Injektionsfluid, der chemische Prozesse verhindert oder abschwächt (z. B. Korrosionsinhibitor).

Injektionsrate

Fließrate, die in das Gebirge eindringt.

Injektivität

Maß für die Aufnahmefähigkeit des Gebirges von Fluiden.

Injektivitäts-Index

Quotient aus Injektionsrate und Druckerhöhung.

Isentroper Wirkungsgrad einer Turbine

Enthalpiedifferenz der nicht-isentropen (verlustbehafteten) Entspannung geteilt durch die Enthalpiedifferenz der isentropen (reversiblen) Entspannung bei gleichen Frischdampfparametern und Abdampfdruck.

Kaliber (CAL)

Querschnitt eines kreisförmigen Hohlkörpers, Durchmesser einer Bohrung.

Kalina Cycle Verfahren

Der Prozess ist nach seinem Erfinder benannt und patentrechtlich geschützt (Kalina). Als Arbeitsmittel wird ein Zweistoffgemisch, Ammoniak-Wasser, verwendet. Im Wesentlichen entspricht der Kalina Kreislauf einem Clausius-Rankine-Prozess mit einem hohen Grad an interner Wärmerückgewinnung sowie zusätzlichen Destillations- und Rektifikationseinheiten. Wird als Kraftwerkskreislauf in geothermisch angetriebenen Kraftwerken mit Sekundärkreislauf eingesetzt.

Karbonatzement

Hier verwendet für: karbonatisches Bindemittel in Sandsteinen.

Klastische Sedimente

Sedimentgesteine, deren Material aus der mechanischen Zerstörung anderer Gesteine stammt (Trümmergestein).

Kluftspeicher

geklüfteter Speicherhorizont ohne Matrixporosität.

Kohärenz

[von lat. cohaerere = zusammenhängen] bezeichnet die Eigenschaft einer Welle, über einen größeren räumlichen und/oder zeitlichen Bereich hinweg eine definierte Phasenbeziehung aufzuweisen. Kohärenz ist Voraussetzung für alle Interferenzphänomene. Sie ist z. B. bei von Lasern erzeugtem Licht besonders ausgeprägt.

Konglomerate

verfestigte, klastische Sedimente mit einer Korngröße von 2 – 63 mm.

Konnektivität

Grad der Vernetzung von Fließwegen.

Konstriktivität

Verhältnis zwischen Porendurchmesser und Porenhalsdurchmesser, eine Quantifizierung von Einschnürungen bzw. Engstellen im Porenraum.

Kopfdruck

Druck, der am Bohrlochkopf gemessen wird.

Leakoff Rate

Abflussrate von Fluiden aus einem Riss in die Gesteinsmatrix.

Lithologie

Zusammensetzung des Gesteins.

Magnetotellurik

Ein geophysikalisches Erkundungsverfahren, das Variationen des Erdmagnetfeldes als Anregung benutzt und die in der Erde induzierten Ströme registriert. Aus beiden Meßgrößen kann eine Aussage über die Struktur des elektrischen Widerstandes im Untergrund getroffen werden.

Malm

stratigraphische Einheit, siehe Tabelle A 6.1.

Matrix

Korngerüst des Gesteins.

Matrixabfluss

Abfluss von Fluiden über die Gesteinsmatrix.

Matrixinjektivität

hydraulische Aufnahmefähigkeit der Gesteinsmatrix.

Mesozoikum

stratigraphische Einheit, siehe Tabelle A 6.1.

Multifinger Kaliber Messung

mechanische Vermessung des Querschnitts eines kreisförmiges Hohlkörpers durch den Einsatz multipler, ausfahrbarer Messarme.

Multirate-Superposition-Plot-Technique

Linearisierung des zeitlichen Verlaufs der Druckänderung bei hydraulischen Tests. Verallgemeinerung des Horner-Verfahrens.

- Namur**
stratigraphische Einheit, siehe Tabelle A 6.1.
- Nettorissdruck**
Druck innerhalb des Risskörpers.
- Open hole**
Nicht verrohrter Bereich einer Bohrung.
- Organic Rankine Cycle (ORC)**
Clausius-Rankine-Prozess mit organischem Arbeitsmittel. Wird als Kraftwerkskreislauf in geothermisch angetriebenen Kraftwerken mit Sekundärkreislauf eingesetzt.
- Paläozoikum**
stratigraphische Einheit, siehe Tabelle A.6.1.
- Permeabilität**
Bezeichnung für die Durchlässigkeit von Gesteinskörpern für Flüssigkeiten oder Gase.
- Petrographie**
Gesteinskunde.
- pH-Wert**
Maß für die Wasserstoffionenkonzentration in einer wässrigen Lösung.
- pinch point**
minimale, bei der Wärmeübertragung auftretende Temperaturdifferenz.
- Porenspeicher**
poröses Speichergestein, z. B. Sandstein.
- Produktionstest**
Förderung von Fluiden aus einer Bohrung, Oberbegriff für Auslaufftest (passiv) und Förder- bzw. Pumpstest (aktiv).
- Produktivitätsindex**
Maß für die Entnahmefähigkeit von Fluiden aus dem Gebirge (Quotient aus Produktionsrate und Druckabsenkung).
- Proppant**
Stützmittel die zur Offenhaltung von hydraulisch erzeugten Rissen verwendet werden.
- Pumpexperiment**
Aktiver Produktionstest.
- Pyroklastika**
Sedimente, die aus vulkanischen Auswurfmassen bestehen.
- Quartär**
Stratigraphische Einheit, siehe Tabelle A 6.1.
- Raman-Komponente des Lichts**
Der Raman Effekt bezeichnet die inelastische Streuung elektromagnetischer Wellen an Materie, bei der das Streusystem von der einfallenden Strahlung Energie aufnehmen oder an sie abgeben kann. Er dient hauptsächlich der strukturellen Charakterisierung von Flüssigkeiten und Festkörpern und hat durch die technische Verfügbarkeit leistungsstarker Laser seit 1960 und der Einführung der Fourier-Transform-Technik wieder neue Bedeutung erlangt. Bei dem DTS system wird die Raman-Komponente zur Temperaturmessung genutzt.

RDA-Analyse

Röntgendiffraktometrie, Analysemethode von Gesteinsproben zur Bestimmung des Gehalts an spezifischen Mineralen.

Redoxpotenzial

auch Eh-Wert, ein Maß für den Anteil von reduzierend bzw. oxidierend wirkenden Substanzen in einer wässrigen Lösung.

Reservoir Saturation Tool (RST)

Ein Bohrlochmessgerät zur Bestimmung der Sättigung von potentiellen Speichergesteinen mit Fluiden. Die Bestimmung erfolgt aus der Kombination verschiedener Parameter, u. a. der Neutronenstreuung und -absorption.

Reservoircharakterisierung

Zusammenfassung aller verfügbaren lagerstättenrelevanten, geologischen Parameter.

Rhätkeuper

Stratigraphische Einheit, siehe Tabelle A 6.1.

Rhyolit

SiO₂-reiches, saures vulkanisches Gestein.

Rissaufbrechdruck

Druck zur Erzeugung eines Zugrisses. Der Wert dient der Berechnung der Zugfestigkeit des Gesteins (Rissaufbrechdruck \geq Rissfortleitungsdruck $>$ Risschließdruck).

Risschließdruck

Druckniveau bei dem sich ein künstlich erzeugter Riss wieder schließt, d. h. die beiden Rissflächen wieder Kontakt erhalten.

Rissfortleitungsdruck

Druckniveau bei dem eine aktive Fortleitung von Rissen in das Gebirge stattfindet.

Rotliegend

Stratigraphische Einheit, siehe Tabelle A 6.1.

Salinität

Prozentualer Salzgehalt von Wasser.

Samplingrate

Abtastrate bei der digitalen Aufzeichnung von Zeitreihen.

Sandsteine

verfestigte, klastische Sedimente mit einer Korngröße von 0,063 - 2 mm.

Sättigungsindex

Der Sättigungsindex gibt an, wieviel Prozent der physikalisch möglichen Sättigung einer Lösung mit einer Spezies zum Zeitpunkt der Probenahme erreicht sind.

Scaling

Mineralausfällungen, z. B. in den Rohren von Produktionsbohrungen.

Seismik

Geophysikalische Erkundungsmethode des Untergrundes unter Verwendung von seismischen Wellen, die künstlich durch Sprengungen bzw. Vibratoren erzeugt werden.

Sensorflap

Mit Sensoren bestückte Platte, die von einem Arm der Bohrlochsonde an die Bohrlochwand gedrückt wird.

- Shut-in**
Einschluss eines Bohrlochs unter definiertem Druck nach einer hydraulischen Maßnahme.
- Siliziklastisch**
Ablagerungen aus siliziumreichen Gesteinen, siehe klastische Sedimente.
- Siltsteine**
verfestigte, klastische Sedimente mit einer Korngröße von 0,002 - 0,063 mm.
- Skin**
Beschreibung der Veränderung der hydraulischen Eigenschaften im bohrlochnahen Bereich, z. B. Druckabfall.
- Sondenkreuz**
Installation am Bohrlochkopf mit Absperrschieber und verschiedenen Anschlüssen.
- Speicherfluid**
Fluid, das aus einem bestimmten Speicherhorizont stammt.
- Stickstofflittest**
Spezieller Fördertest unter Einbringung von Stickstoff in das Bohrloch.
- Stimulation**
Verfahren zur Verbesserung der Zuflussbedingungen in einer Produktionsbohrung.
- Störungen, geologische**
Durch tektonische Bewegungen hervorgerufene Scherflächen, an denen Gesteinseinheiten gegeneinander versetzt werden.
- Stratigraphie**
Einordnung von Gesteinen nach ihrem Entstehungsalter in die geologische Zeitskala.
- Strike-Slip**
horizontale Parallelverschiebung von Gesteinsblöcken.
- Stufeninjektion**
Injektionstest mit variablen Fließraten.
- Stützmittel**
auch Proppant, hier kleine Sandkügelchen, die zur Abstützung von hydraulisch geöffneten Rissen dienen, um eine dauerhafte Öffnung zu gewährleisten.
- Swab-Arbeiten**
Fördertechnik basierend auf der Kolbenwirkung.
- Synsedimentär**
Vorgänge, die zeitgleich mit der Ablagerung eines Sedimentgesteins ablaufen.
- Tertiär**
stratigraphische Einheit, siehe Tabelle A 6.1.
- Tonsteine**
verfestigte, klastische Sedimente mit einer Korngröße von < 0,002 mm.
- Tortuosität (Porenraumeigenschaft)**
Verhältnis des realen Weges zum direkten Weg, dient der Beschreibung von hydraulischer bzw. elektrischer Leitfähigkeit in einem Gesteinskörper.
- Totpumpen der Bohrung**
Vorgang zur Beseitigung artesischer Bohrlochverhältnisse durch Injektion von schwerem Fluid.

- Transmissibilität**
Produkt aus Permeabilität und Mächtigkeit der Formation.
- transtensiv**
Dehnung in Folge einer Scherung.
- Trennflächensystem**
Summe aller Störungs- und Kluffflächen.
- Tuffit**
umgelagerte Pyroklastika.
- Turbidit**
klastische Ablagerung aus Trübeströmen.
- Unterkreide**
Stratigraphische Einheit, siehe Tabelle A 6.1.
- vergente Mulde**
Kipprichtung einer geneigten Falte.
- Vulkanit**
Oberbegriff für vulkanisch gebildetes Gestein.
- Wasserfrac (hydraulic fracturing)**
Stimulationsmaßnahme bei der künstliche Risse mit Hilfe von geringviskosen Fluiden bei hohen Injektionsraten erzeugt werden: Wasser oder andere gering viskose Flüssigkeiten werden unter hohem Druck über eine Bohrung in den Untergrund verpresst. Durch die Druckverhältnisse und die im Gebirge vorherrschenden Spannungen werden künstliche Risse im Gestein erzeugt.
- Wenneranordnung**
in der Geoelektrik eine Anordnung von Stromelektroden AB und Messelektroden MN in der Folge AMNB mit gleichen Abständen.
- Wireline**
bezeichnet in der Bohrtechnik Arbeiten, die am Kabel ausgeführt werden, z. B. Bohrlochmessungen. Im Gegensatz dazu stehen die Arbeiten mit dem Rohrstrang.
- Workoveranlage**
Obertägige Aufbauten, die für eine Tiefbohrung erforderlich sind, z. B. Bohrturm, Pumpen, Spülsaufbereitung, Stromgeneratoren, Hydrauliksysteme etc.
- Zechstein**
Stratigraphische Einheit, siehe Tabelle A 6.1.
- Zementminerale**
Minerale, die als Bindemittel in klastischen Sedimenten fungieren, z. B. Karbonate und Anhydrit.