

## 6 Ausfällungs- und Verträglichkeitsverhalten der Thermalwässer

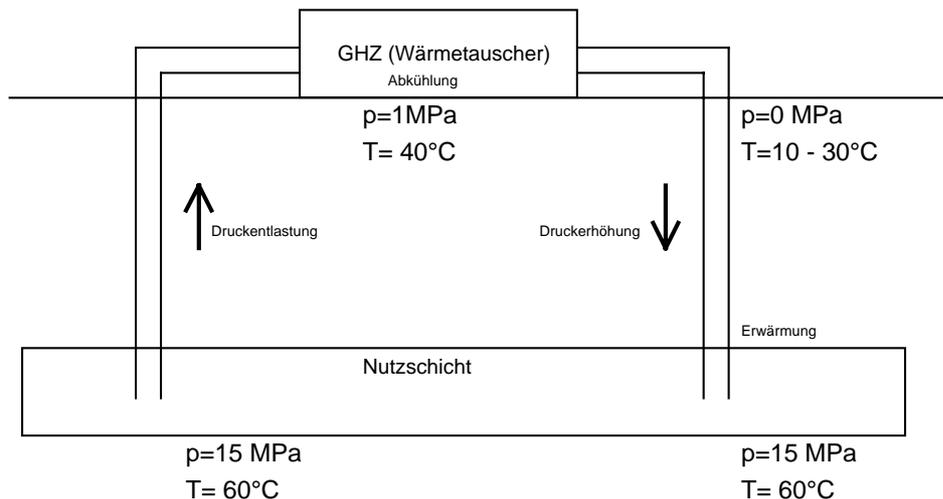
### 6.1 Reinjektion der Thermalwässer - Chemische Wechselwirkungsreaktionen

*Torsten Kellner*

In erster Näherung stehen die Thermalwässer im dynamischen Gleichgewicht mit dem Speichergestein. Im Thermalwasserkreislauf werden die geothermisch genutzten Wässer Druck- und Temperaturschwankungen unterworfen. Es kommt zur

- Druckentlastung (Entspannung) bei Förderung,
- Temperaturabsenkung und/oder möglicher Sauerstoffzutritt im obertägigen Thermalwasserkreislaufsystem,
- Druckerhöhung bei der Reinjektion,
- Vermischung mit "in situ-Schichtwässern",
- Erwärmung.

Beispielhaft ergeben sich für die Lagerstätte Waren die in Abbildung 6-1 dargestellten Änderungen.



**Abbildung 6-1:** Druck- und Temperaturänderungen im Thermalwasserkreislauf der GHZ Waren / Müritz

Dabei sind, bedingt durch die Druckentlastung während der Förderung, Entgasungserscheinungen möglich, die zu pH-Wert- und Redoxpotentialveränderungen führen können. Sauerstoffzutritt führt ebenfalls zur Erhöhung des Redoxpotentials mit nachfolgender vorrangiger Eisenhydroxidausfällung. In der Erdölindustrie werden bei der Förderung ähnlich zusammengesetzter Wässer temperaturabhängige Löslichkeitsveränderungen beschrieben. Die Druck- und Temperaturänderungen können Feststoffbildungen in Form von Ausfällungen und Scaling mit nachfolgender Permeabilitätsreduzierung im Nutzhorizont bedingen [Pekdeger et al., 1992]. Weiterhin sind chemische Veränderungen im Thermalwasserkreislauf durch mikrobiologische Aktivitäten bekannt, die zur Bildung von Feststoffen (Ausfällungen) führen. Insbesondere bei bakteriell induzierter  $H_2S$ -Bildung kommt es zu pH-Wert-Verschiebungen und nachfolgender Sulfidfällung (vgl. Teil A, Kapitel 4.5).

Die Thermalwasserbewertung erfordert spezielle analytische Methoden (vgl. Teil A, Kapitel 4.2) [Kühn et al., 1996], um eine solide Datenbasis zu schaffen. Eine Abschätzung möglicher Ausfällungen kann anhand geochemischer Modellrechnungen erfolgen. Ein Vergleich von

geochemischen Modellierungsprogrammen PHREEQC [Parkhurst, 1995], PHRQPITZ [Plummer et al., 1990], EQ 3-6 [Wolery et al., 1990] und SOLMINEQ [Perkins et al., 1990] hinsichtlich potentiell ausfallender Mineralphasen relevanter Thermalwässer erfolgte durch Kühn (1997). Es wurden Sensitivitätsanalysen der chemischen Gleichgewichte für sich verändernde Druck- und Temperaturbedingungen durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, daß mit EQ 3-6 und PHREEQC die verlässlichsten Daten für die untersuchten Thermalwasserzusammensetzungen gewonnen werden können.

Die geothermisch genutzten Schichtwässer Norddeutschlands wurden mehrfach auf mögliche Einschränkungen bei der Nutzung untersucht, die sich aus der chemischen Zusammensetzung ergeben können. Zur Bewertung des Gefährdungspotentials durch Druck- und Temperaturänderungen wurden für einige Thermalwässer mögliche Ausfällungsreaktionen abgeschätzt sowie für zwei Lagerstätten mit gesichertem Datenfonds eine komplexe geochemische Modellierung mit dem Expertensystem XPS - FROCKI [Albertsen et al., 1993] durchgeführt. Die Berechnungen und Abschätzungen ergaben, daß bei einer energetischen Nutzung von Wässern des in Norddeutschland vorhandenen Typs lediglich mit Eisenausfällungen bei Sauerstoffkontakt zu rechnen ist sofern eine Vermischung mit Fremdwässern vermieden und ein geschlossener Kreislauf ohne Stoffaustausch realisiert wird. Andere Mineralneubildungen sulfatischer, karbonatischer und silikatischer Art im obertägigen Thermalwasserkreislauf und im Speichergestein sind in relevanten Größenordnungen nicht zu erwarten [Rockel et al., 1993, Seibt, P. et al., 1997]. Gleiche Schlußfolgerungen lassen sich auch aus den Ergebnissen der an Bohrkernen durchgeführten Durchströmungsversuche ableiten [Wildemann, 1991; Köckritz und Martin, 1996; Martin et al., 1997; Seibt, P. et al., 1997; Kühn, 1997] (vgl. Teil B, Kapitel 6.2). Die auf Berechnungen bzw. Durchströmungsversuchen basierenden Schlußfolgerungen werden durch die Praxiserfahrungen im wesentlichen bestätigt. Chemische Untersuchungen an suspendierten Feststoffen von Thermalwässern verschiedener Lagerstätten und von Filtrerrückständen wiesen vorrangig Eisenverbindungen (Fe-oxide bzw. Fe-hydroxide) nach (vgl. Teil B, Kapitel 7.3). Ausfällungen und Inkrustationen (z. B. Sulfate, Karbonate) in den Thermalwasserkreisläufen bestehender Geothermieanlagen wurden bisher bei z. T. über 10-jähriger Betriebszeit nicht in nennenswerten Mengen festgestellt [Fietz et al., 1992; Kellner, 1994]. Da der überwiegende Teil der für eine energetische Nutzung in Norddeutschland in Betracht kommenden Thermalwässer ähnlich zusammengesetzt ist [Klinge, 1991; Pekdeger und Thomas, 1993], kann von einer gewissen Allgemeingültigkeit dieser Aussagen hinsichtlich des thermodynamischen Verhaltens der Wässer ausgegangen werden. Eine Studie über die Bewertung geothermischer Reserven und Ressourcen im Niedersächsischen Becken unterstützt diese Annahme [Rockel et al., 1993].

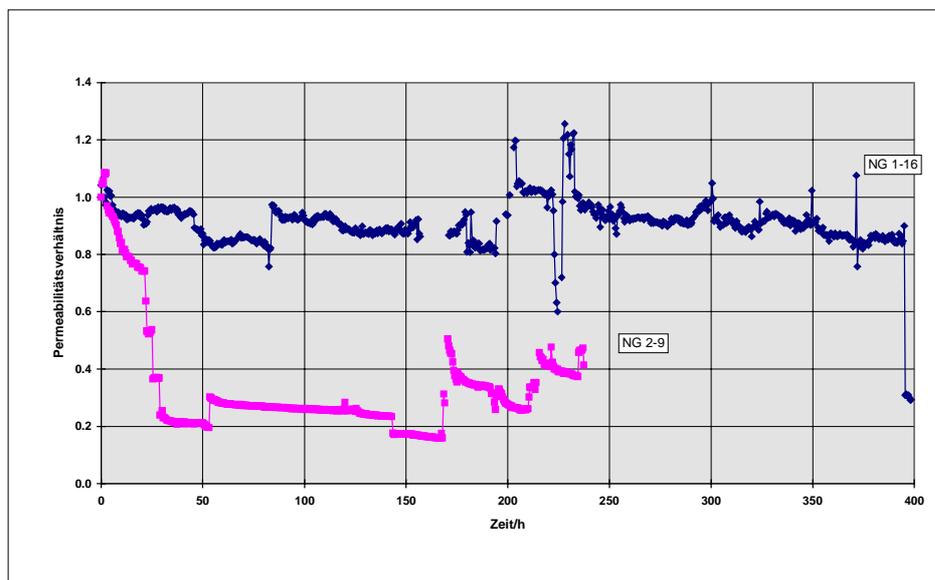
## 6.2 Durchströmung von Reservoirsandsteinen

*Margit Martin und Volker Köckritz*

Aus Ergebnissen von Kerndurchströmungsexperimenten lassen sich Schlußfolgerungen zu Beeinträchtigungen der Speicherschicht durch Wechselwirkungen zwischen injiziertem Fluid und Reservoirgestein ableiten. Für die Durchströmungsversuche wurden aus den in den Kernlagern beprobten Bohrkernen Probenkörper entsprechender Abmaße ausgebohrt und die Einströmflächen begradigt. Die bei 60 bzw. 105°C im Trockenschrank getrockneten Probenkörper wurden entgast und mit Schichtwasser bzw. einem synthetisch hergestellten Fluid gesättigt.

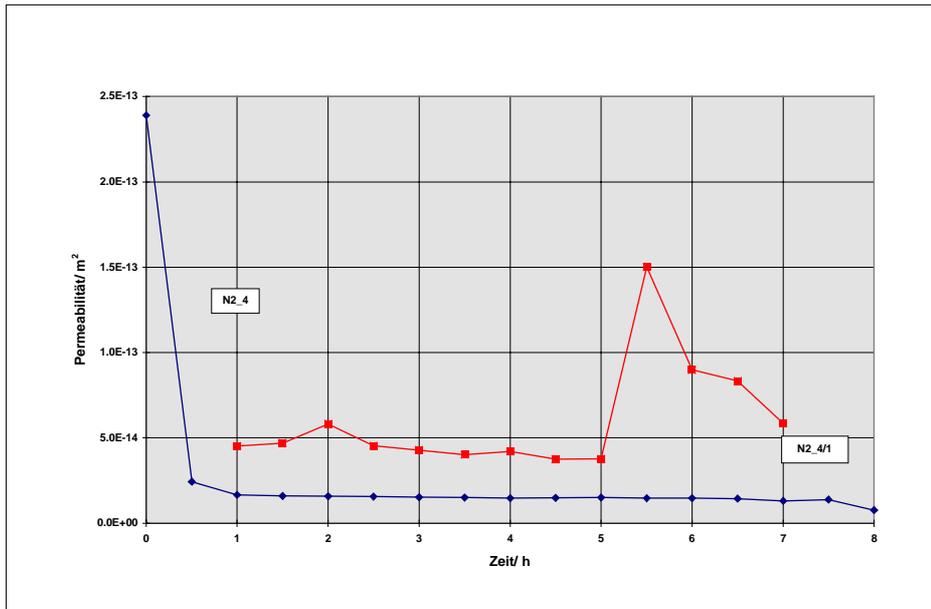
### Versuchsergebnisse

In der Abbildung 6-2 sind Durchströmungsversuche mit Reservoirsandsteinen der Bohrung Neustadt-Glewe 1 und 2 (Flußrate von 25 ml/min entspricht einer Darcy-Geschwindigkeit von 2 cm/min) dargestellt. Die Anfangspermeabilität der durchströmten Probenzylinder liegt bedingt durch mechanische Veränderungen an den Einströmlächen etwa  $0,100 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  unter der ursprünglich erwarteten. Am Verlauf der Kurven wird deutlich, wie durch Änderung der Versuchsbedingungen das eigentlich konstante Permeabilitätsverhalten dieser hochpermeablen Gesteine beeinflusst werden kann. Der Kern NG 1-16 wurde unter Sauerstoffabschluß ( $\text{N}_2$ -Beaufschlagung bzw. Zusatz eines Reduktionsmittels) mit hochsalinaren Lösungen unter erhöhtem Druck bei Raumtemperatur durchströmt. Die Permeabilität bleibt weitestgehend konstant. Bei Durchströmung von Kern NG 2-9 wurde Luft in das Durchströmungsfluid eingetragen, was eine deutliche Permeabilitätsabnahme zur Folge hatte. Eine daraufhin veranlaßte  $\text{N}_2$ -Beaufschlagung auf das System bewirkte keine Veränderung.



**Abbildung 6-2:** Durchströmungsversuche mit Reservoirsandsteinen der Bohrungen Neustadt-Glewe 1 (obere Kurve) bzw. Neustadt-Glewe 2 (untere Kurve) mit hochsalinaren Lösungen unter erhöhtem Druck (Flußrate 25ml/min)

In Abbildung 6-3 ist der Permeabilitätsverlauf von geringer verfestigten Sandsteinproben mit erhöhtem Ton/Silt-Gehalt aus Geothermiebohrungen in Neubrandenburg dargestellt. Die Abnahme der Permeabilität ist hier vorwiegend auf Tonmineralreaktionen zurückzuführen. Weiterhin bewirkte das in den Versuchen angewandte Druckregime (bis 10 MPa Überlagerungsdruck) Veränderungen des durchströmbareren Porenraums durch Kompression der Einzelporen und eine Mobilisierung und erneute Ablagerung von amorphen  $\text{SiO}_2$ . Durch Änderung des Strömungsregimes (obere Kurve in Abbildung 6-3) kam es zusätzlich zu einer Partikelmobilisation. Daraufhin stieg die Permeabilität zunächst an und fiel dann wieder drastisch ab. Eine weitere Ursache für die gemessene niedrige Permeabilität an beiden untersuchten Kernen ist eine verstärkte Kristallbildung an bereits vorhandenen Kristallkeimen. Letztere sind durch Lagerung und Trocknung der Kerne gebildet worden.



**Abbildung 6-3:** Durchströmungsversuche mit Reservoirsandsteinen der Bohrung Neubrandenburg 2 mit hochsalinaren Lösungen unter erhöhtem Druck ( Flußrate 5ml/min)

### Schlußfolgerungen

- Die Labor-Durchströmungsversuche sind vor allem für den modellhaften Nachweis von Spezialeffekten in den Speichergesteinen (z. B. bei sekundärer Thermalwassernutzung, Reaktionen auf Reduktionsmittel und Bohrspülungen, Verpressung von "Fremdwässern") von Bedeutung. Spezielle Parameter von Kernuntersuchungen lassen sich zur Simulation möglicher Schädigungsmechanismen einsetzen. Deshalb sollte das zu durchströmende Kernmaterial möglichst im ursprünglichen Zustand vorliegen bzw. entsprechend vorbehandelt werden [Martin et al., 1996].
- Die untersuchten hochpermeablen und bindemittelarmen Reservoirsandsteine des Jura/Keuper zeigten nur geringe Permeabilitätsreduzierungen bei Durchströmungsversuchen mit hochsalinaren Lösungen unter lagerstättenähnlichen Bedingungen und N<sub>2</sub>-Beaufschlagung
- Bei wenig zementierten Probekörpern kann eine Schädigung des Porenraums besonders an den Einströmflächen und ihrer Umgebung infolge einer mechanischen Beanspruchung beim Ausbohren des Kernes beobachtet werden. Veränderungen sind bei gering verfestigten und stark absandenden Sandsteinen durch Partikelmobilisation besonders stark.
- Die in den Versuchen ermittelten Daten lassen sich nur unzureichend in Simulationsmodelle einbringen, da die zur Verfügung stehenden Modelle für Gesteinswechselwirkungen mit hochsalinaren Lösungen nur bedingt geeignet sind [Kühn, 1997]. Insbesondere eine Wertung des O<sub>2</sub>-Einflusses auf die Tonminerale ist nicht möglich. Auch in der Literatur sind nur Hinweise zu möglichen Beeinflussungen infolge der Tonmineral- sowie Grenzflächenreaktionen zu finden. Der Mechanismus der Oxidationsreaktion kann erst durch weitere Untersuchungen geklärt werden. Deshalb sind neben den Durchströmungsuntersuchungen weitere Untersuchungsmethoden wie z. B. die Bestimmung elektrischer und elektrokinetischer Eigenschaften der Speichergesteine zur Erfassung und zum besseren Verständnis der im Speichergestein ablaufender Vorgänge, die möglicherweise zu Permeabilitätsreduzierungen führen, anzustreben.

### **6.3 Untersuchungen zur Wasserqualität unter Berücksichtigung der balneologischen Nutzung**

*Birgit Rohstock und Herbert Schneider*

Untersuchungen zu den Anforderungen an die Qualität von genutzten Thermalwässern für die Reinjektion wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens „Geowissenschaftliche, geotechnologische und verfahrenstechnische Forschungsarbeiten zur Vervollkommnung des Verfahrens der Nutzung geothermischer Ressourcen im Hinblick auf das Langzeitverhalten“ ausgeführt [Schneider et al., 1997].

Mit der zunehmenden Tendenz einer Kombination von wärmetechnischer und stofflicher Thermalwassernutzung wurde die ursprünglich Aufgabenstellung erweitert. Diese Verknüpfung ist z. B. in den Objekten Rheinsberg, Templin, Göhren-Lebbin vorgesehen. Auch für Neustadt-Glewe existieren Vorstellungen zur balneologischen Verwendung der hochmineralisierten Thermalsole.

Die Versenkung der hochmineralisierten Thermalwässer nach dem Wärmeentzug über eine Injektionsbohrung ist für die nordostdeutschen Verhältnisse grundsätzlich geklärt und Praxis in den Geothermischen Heizzentralen Waren/Müritz, Neubrandenburg und seit 1995 auch in Neustadt-Glewe. Wird aber ein Teilstrom des Thermalwassers im Bäder- und medizinisch-therapeutischen Sektor verwendet und danach wieder in die Entnahmeschicht gemeinsam mit dem wärmetechnisch genutzten Hauptstrom injiziert, so sind zur Gewährleistung der Reinjektion im Filtrationsregime entsprechende Bedingungen zu schaffen.

Durch die balneologische Nutzung von Thermalwässern wird eine drastische Änderung des Chemismus hervorgerufen. Es entstehen salzhaltige Abwässer (abgebadete Solen), die umweltfreundlich zu entsorgen sind. Infolge der geographischen Situation der meisten Vorhaben in Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg ist eine obertägige Entsorgung durch Einleitung in die Vorflut nicht möglich. Die Technologie der Rückführung abgebadeter Thermalwässer zum wärmetechnisch genutzten Volumenstrom und die gemeinsame Reinjektion ist daher die zu verfolgende Lösung.

Die Voraussetzung für eine Reinjektion im Filtrationsregime ist die Anpassung der Eigenschaften der zu reinjizierenden Wässer an die Eigenschaften der Aufnahmeschicht. Eine herausragende Bedeutung kommt daher der Art und Weise der Aufbereitung der abgebadeten Wässer zu. Voraussetzung für die Ableitung der Aufbereitungsinhalte ist die Kenntnis der Schadstofftransport- und Sorptionsvorgänge im Speichergestein. Die Anpassung in Form eines effizienten Aufbereitungsprozesses setzt die Kenntnis der Eigenschaften

- des Thermalwassers vor und nach der Nutzung,
- der darin suspendierten Partikel,
- der Aufnahmeschicht

sowie die Kenntnis der Reaktionen beim Kontakt des genutzten Thermalwassers mit dem in-situ-Schichtwasser und dem Speichergestein voraus.

Neben umfangreichen Literaturlauswertungen, Modellierungen und Falldatenauswertungen mit dem Expertensystem FROCKI [Albertsen et al., 1993] wurden laborative und kleintechnische Untersuchungen ausgeführt. Folgende Aussagen können im Ergebnis der Untersuchungen getroffen werden:

### *Wärmetechnische Thermalwassernutzung*

Die erforderliche Wasserqualität für die Reinjektion im Filtrationsregime ist durch die verfahrenstechnischen Maßnahmen, d. h.

- Wahl der Bohrspülung beim Aufschluß
- Werkstoffauswahl des Thermalwasserkreislaufs
- Stickstoffbeaufschlagung der Anlagensysteme
- Filtration

u. a. gesichert. Eine der wesentlichen Voraussetzungen dafür ist, daß der Chemismus der Thermalwässer durch die wärmetechnische Nutzung unverändert bleibt (geschlossenes System).

Für alle schwerlöslichen Salze, die sich theoretisch im Thermalwasser bilden können, wird die Löslichkeitsschwelle nicht oder nur gering überschritten (s. auch Beitrag Kellner). Durch die hohen NaCl-Gehalte wird die Löslichkeit von Karbonaten und schwerlöslichen Sulfaten um den Faktor 4 - 10 erhöht. Daneben ist die Verweilzeit möglicher Kristallkeime im System gering.

Eine negative Wirkung auf die Reinjektion haben Eisenhydroxide, die durch den Zutritt von Luftsauerstoff entstehen. Permeabilitätsreduzierungen im Speichergestein infolge Tonmineralveränderungen durch Quellung können bei der Reinjektion chemisch stark veränderter Schichtwässer oder bei Fremdwässern mit abweichender chemischer Zusammensetzung auftreten. Diese Fälle sind konsequent zu vermeiden.

### *Rückführung abgebadeter Thermalwässer zum wärmetechnisch genutzten Volumenstrom und gemeinsame Reinjektion*

Die Aufbereitung der abgebadeten Sole ist zwingend notwendig. Dazu erfolgte eine Auswahl von Aufbereitungsverfahren auf der Grundlage der Untersuchungen zum Ausfällungs- und Verträglichkeitsverhalten und unter Einbeziehung der Erkenntnisse über mikrobiologische Aktivitäten sowie des Stofftransport- und Sorptionsverhaltens. Sie berücksichtigen folgende Anforderungen:

- Vermeidung des Eintrages von partikulären Substanzen, weder organischer noch anorganischer Herkunft; sie führen zu Blockierungen im Sandsteinspeicher.
- Vermeidung des Eintrages von gelösten organischen Substanzen, die den im geologischen Speicher lebensfähigen Mikroorganismen als Nahrungsgrundlage dienen können.
- Rückführung der Reinjektionswässer in das reduzierende Milieu, d. h. kein Eintrag von Substanzen oder Verbindungen (wie z. B. Sauerstoff), die mit dem in situ Schichtwasser bzw. Speichergestein reagieren und damit eine Schädigung des Speichers bewirken können.
- Durch Desinfektion ist der Eintrag von Mikroorganismen, die unter den geologischen Speicherbedingungen lebensfähig sind, zu vermeiden.
- Der Eintrag von Substanzen und Verbindungen wie z. B. von halogenierten Kohlenwasserstoffen (THM), die bei der Wiederverförderung der Thermalwässer, auch im Abstand von vielen Jahren, eine Anerkennung dieser Wässer als Heilwasser in Frage stellen können, ist zu vermeiden.

Die ausgeführten Untersuchungen und deren Ergebnisse zeigen die grundsätzliche Machbarkeit einer kombinierten Thermalwassernutzung auf.