

## 7 Untersuchungen im Thermalwasserkreislauf<sup>1</sup>

*Andrea Seibt und Peer Hoth*

Aus den vorangegangenen Abschnitten wird deutlich, daß bei einer energetischen Nutzung von Thermalwässern der postsalinaren Schichtwässer vom Na-Cl-Typ lediglich Eisenhydroxidausfällungen infolge eines Sauerstoffkontaktes technologische Bedeutung besitzen. Andere Mineralneubildungen sulfatischer, karbonatischer und silikatischer Art im obertägigen Thermalwasserkreislauf und im Speichergestein sind demnach nicht zu erwarten. Im obertägigen Thermalwasserkreislaufsystem ist ein Sauerstoffzutritt möglich. Dieser Sauerstoffkontakt der Thermalwässer ist nicht nur hinsichtlich der obertägigen Eisenausfällungen, sondern auch im Hinblick auf das Einbringen von Sauerstoff in die Speicherhorizonte kritisch zu bewerten. Bei einer Vermischung der sauerstoffhaltigen Wässer mit den im Speicher vorliegenden Lösungen können Permeabilitätsverringerungen in Folge von Fällungsprozessen auftreten. Dies kann permanente Speicherschädigungen hervorrufen. In zwei geothermischen Heizzentralen (mit und ohne Stickstoffbeaufschlagung) wurde der gelöste Sauerstoff im Thermalwasser bei unterschiedlichen Betriebsregimen bestimmt und die entsprechenden Filterrückstände analysiert.

Im Mittelpunkt der Sauerstoffmessungen stand, wo und unter welchen Betriebszuständen Sauerstoff in den Thermalwasserstrom gelangen kann. Von besonderem Interesse war es festzustellen, ob und wieviel gelöster Sauerstoff im Thermalwasser noch nach den vor der Injektionsbohrung installierten Filtern nachzuweisen ist. Bislang ging man davon aus, daß der Sauerstoff - gelangt er obertägig in den Thermalwasserkreislauf - schnell genug mit der äquivalenten Menge gelöster Eisenionen reagiert, so daß der Sauerstoff im untertägigen Bereich als Reaktionspartner nicht zur Verfügung steht und sämtliche Fällungsprodukte durch die Filter zurückgehalten werden.

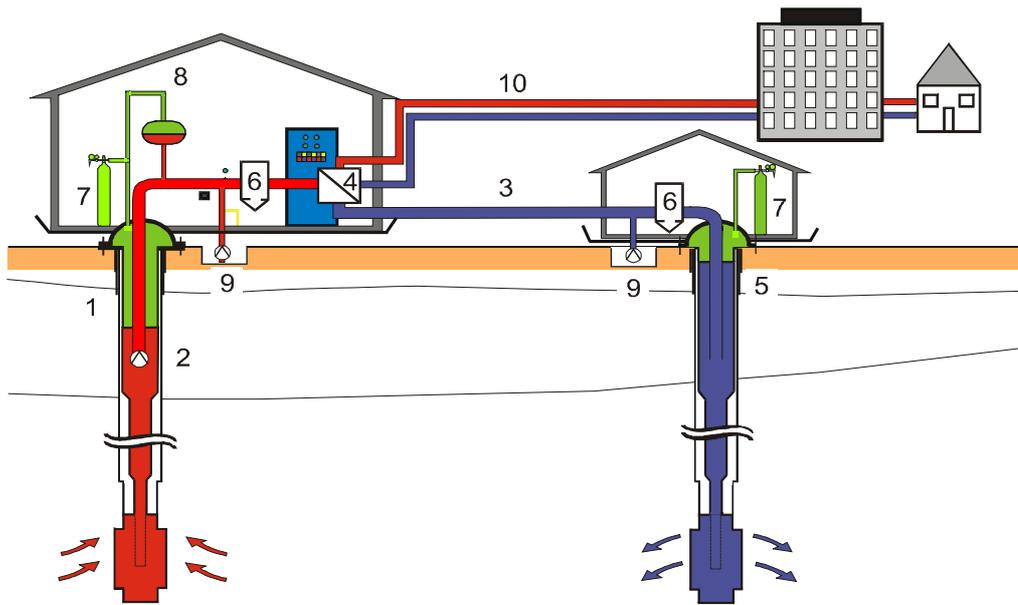
### 7.1 Thermalwasserkreislauf

Der Thermalwasserkreislauf bildet das Bindeglied zwischen dem im Untergrund vorhandenen thermischen Potential und der Abnehmeranlage, d. h. der zeitlich und örtlich variablen Wärmenachfrage. Er sichert, daß der Wärmeträger Thermalwasser in der geforderten Menge und Qualität bis zum Nutzer gelangt und nach der Wärmeübertragung von dort abgeleitet wird [Kabus, 1991].

Der Thermalwasserkreislauf besteht unabhängig von der Art der Lagerstätte und der Thermalwasserzusammensetzung mindestens aus den Komponenten Förderbohrung, Förderpumpe, Förderleitung und Wärmeüberträger. Muß das ausgekühlte Thermalwasser aufgrund seiner hohen Salinität wieder in den Untergrund verbracht werden, ist eine 2. Bohrung erforderlich. In diesem Fall müssen weitere Komponenten wie in Abbildung 7-1 dargestellt, in den Thermalwasserkreislauf eingefügt werden. Dieses Schema zeigt einen geschlossenen Thermalwasserkreislauf zur hydrothermalen Nutzung hochsalinärer Wässer, wie er dem derzeitigen Stand der Technik entspricht [Seibt, A. et al., 1997].

---

<sup>1</sup> Unser Dank gilt den Betreibern der geothermischen Heizzentralen Neubrandenburg und Neustadt-Glewe für die freundliche Unterstützung bei den Meßarbeiten.



**Abbildung 7-1:** Aufbau eines Thermalwasserkreislaufs für hochsalinare Wässer mit den Komponenten Förderbohrung(1), Förderpumpe(2), Förderleitung(3) und Wärmeübertrager(4), Injektionsbohrung(5), Filtereinrichtungen(6), Inertgas-(7) und Druckhaltungssystem(8), Slopgruben(9) sowie Heiznetz (10).

Das Thermalwasser muß mittels Pumpen aus der Lagerstätte gefördert werden. Aufgrund des hohen Salzgehaltes der Thermalwässer im norddeutschen Raum kommen hier spezielle Unterwasser-Motorpumpen zum Einsatz. Entsprechend den geologischen Bedingungen, der Bohrungskompletterung und dem Förderstrom sind Einbautiefen von 100 bis 400 m typisch. Obwohl Geothermieanlagen ganzjährig mit hoher Leistungsausnutzung betrieben werden sollten, ist eine Anpassung des Fördervolumenstroms in engen Bereichen möglich.

Für die Thermalwasserleitungen kommen Kunststoffe, Verbundmaterialien (Kunststoff/Glasfaser), beschichtete und gummierte Metalle sowie hochlegierte Stähle in verschiedenen Kombinationen zur Anwendung [Kellner und Möllmann, 1996].

Der oder die Wärmeübertrager sind das Zentrum des gesamten Systems. In den üblicherweise verwendeten Plattenwärmeübertragern werden geringste Temperaturdifferenzen zwischen Thermalwasser und Heizsystem realisiert, um dem Thermalwasser ein Maximum an Wärme zu entziehen.

Im Thermalwasserkreis sind Filtersysteme integriert. Durch die nach der Förderbohrung installierten Grobfilter werden mobilisierte Partikel aus dem Speicher sowie Spuren von Ölen und Fetten, die zum Teil aus der Unterwassermotorpumpe herrühren, zurückgehalten. Die Feinfilter vor der Injektionsbohrung verhindern den Eintrag möglicher Ausfällungsprodukte (vor allem Fe-Verbindungen) in den Speicherhorizont.

Die obertägigen Behältersysteme und die Sondenringräume sind in Neustadt-Glewe (s. Abbildung 7-1) mit Stickstoff beaufschlagt, um einen Sauerstoffeintrag zu vermeiden. Ein Stickstoffbeaufschlagungssystem wurde in der Warener GHZ 1995 nachgerüstet. In der Neubrandenburger Heizzentrale werden nur die Sondenköpfe mit Stickstoff gespült.

Das Slopssystem mit einem Hauptslopbehälter an der Injektionsbohrung und mehreren lokalen Slopgruben nimmt die außerhalb der Rohrleitungen anfallenden Thermalwässer auf. Hier wird das beim Spülen der Förderbohrung und des thermalwasserführenden Rohrleitungssystems, bei der Erstinbetriebnahme sowie nach längeren Stillständen, beim Filterwechsel, bei Reparaturen, bei der Entleerung des Leitungssystems und bei Undichtheiten im System anfallende Thermalwasser gesammelt.

## 7.2 Sauerstoffmessungen

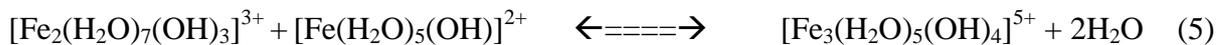
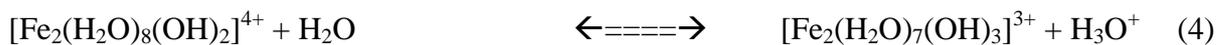
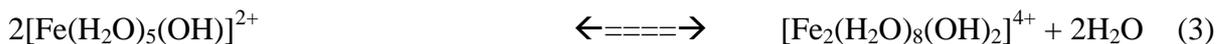
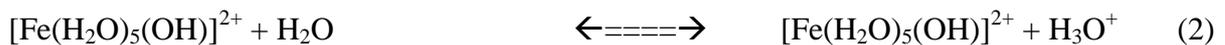
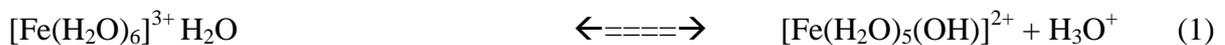
### 7.2.1 Theoretische Vorbetrachtungen

#### *Ausfällungsreaktionen*

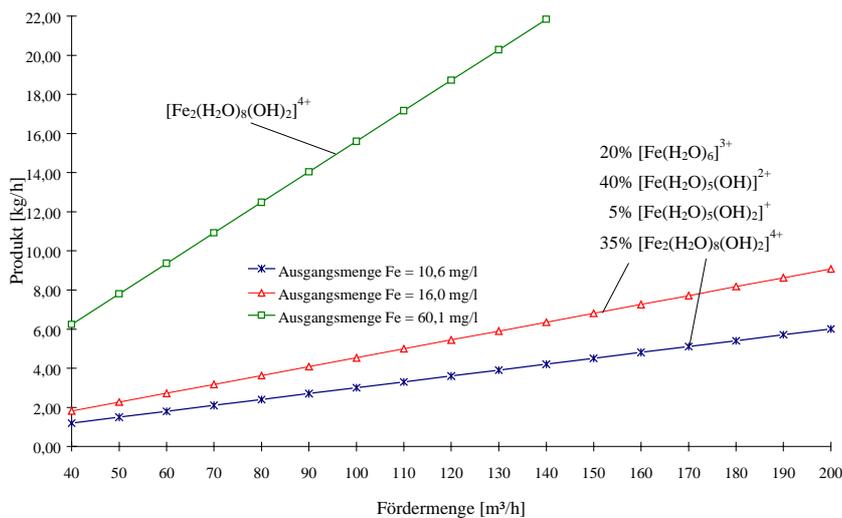
Das Verhalten von Eisen wird in aquatischer Umgebung wechselseitig durch seine Löslichkeit und Komplexbildungs-, Hydrolyse- und Redoxreaktionen beeinflusst. Neben einer Vielzahl von Komplexgleichgewichten sind vor allem Oxydations-/Reduktionsprozesse und deren pH-Abhängigkeit für die Zusammensetzung der Fällprodukte entscheidend. Generell kann von einer Bildung von  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  und  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ausgegangen werden, wobei beide Hydroxide in der Lage sind,  $\text{Fe}^{3+}$ - bzw.  $\text{Fe}^{2+}$ -Ionen einzuschließen.

Die Säure-Base-Theorie von Ussanowitsch gestattet, ausgehend vom elektrostatischen Modell, eine Abschätzung der Säuren- und Basenstärke von Ionen. Die Acidität ist um so größer, je höher die Ionenladung und je kleiner der Ionenradius ist. Im Vergleich zu  $\text{Fe}^{2+}$  (Ionenradius 0,74Å) zeigt  $\text{Fe}^{3+}$  (Ionenradius 0,64Å) eine ausgeprägte Präferenz für über Sauerstoff koordinierende Liganden. Dieser Unterschied spiegelt sich auch im hydrolytischen Habitus wider. Während zweiwertiges Eisen erst im neutralen Bereich merkliche Solvolyse erfährt, hydrolysiert dreiwertiges Eisen bereits bei pH 1 und fällt schon im schwach sauren Bereich (pH ca. 4) als amorphes Hydroxid aus. Die Gleichgewichtsquotienten der Gesamtkonzentrationen von zwei und dreiwertigem Eisen sind durch die involvierten Hydrolysereaktionen pH-abhängig, ergeben theoretisch bei Vorliegen eines Überschusses an Sauerstoff jedoch stets die nahezu vollständigen Oxidation von Fe(II) [Falcke, 1990].

Wesentliche Teilreaktionen, die letzten Endes zur Ausbildung von  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  führen, sind in den folgenden Gleichungen zusammengefaßt [Ziegenbalg und Holldorf, 1994].



In einer  $10^{-3}$  molaren  $\text{Fe}^{3+}$  Lösung liegen nach Stumm (1962) 20%  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ -, 40%  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})]^{2+}$ -, 5%  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})_2]^{+}$ - und 35%  $[\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_2]^{4+}$ - Ionen vor. In konzentrierteren Lösungen überwiegt das dimere Hydrolyseprodukt. Bei einem ständigem Eintrag von Sauerstoff in den Thermalwasserkreislauf würden demnach enorme Mengen voluminöser Eisenhydroxide anfallen (Abbildung 7-2).



**Abbildung 7-2:** Anfallendes Eisen- Hydrolyseprodukt bei Überschuß an Sauerstoff in Abhängigkeit vom gelösten Fe(II) im Thermalwasser bei unterschiedlichem Thermalwassermengenstrom

### Löslichkeit von Gasen in mineralisierten Wässern

Die Löslichkeit der Gase ist abhängig von der Temperatur, dem Druck und der Mineralisation. Für den Einfluß des Salzgehaltes ergeben sich zwei generelle Regeln[Harting et al., 1981]:

1. Sauerstoff ist ebenso wie andere Gase in salzhaltigen Medien weniger gut löslich als in Süßwasser.
2. Kleine oder mehrfach geladene Ionen bewirken eine größere Löslichkeitserniedrigung als große und einfach geladene Ionen.

Daraus folgt, daß eine korrekte Konzentrationsmessung von Sauerstoff in salzhaltigem Wasser mit einer Sonde nur dann möglich ist, wenn eine entsprechend veränderte Sättigungstabelle der Meßwertverarbeitung zugrunde gelegt wird.

### 7.2.2 Meßmethodik

Die Sauerstoffmessungen wurden mit einem Sauerstoffmeßgerät Modell 2713 bestehend aus Anzeigegerät, Sonde und Durchflußkammer der Firma ORBISPHERE Laboratories durchgeführt. Eine Erfassung von gelöstem Sauerstoff ist im Bereich von 0,01 ppb - 199,9 ppm bei Temperaturen von 0 - 100 °C möglich. Bezüglich der hohen Salinität des zu untersuchenden Thermalwassers bestehen vom Hersteller keinerlei Einschränkungen. Die Durchflußkammer wurde allerdings in Sonderanfertigung aus Edelstahl hergestellt. Als optimale Durchflußgeschwindigkeit wird vom Hersteller 180 ml/l empfohlen. Die Meßgenauigkeit innerhalb  $\pm 5$  °C der Kalibrierungstemperatur beträgt  $\pm 1$  %.

#### Meßprinzip Sauerstoffelektrode

Der Sauerstoff dringt durch die Membran (Teflon) ein und löst sich in dem zwischen Anode (Silber) und Kathode (reines Gold) befindlichen Elektrolyten (Kaliumchlorid).

An der Kathode läuft folgende Reaktion ab:  $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4 OH^-$ .

An der Anode werden die 4 Elektronen kompensiert:  $4Ag \rightarrow 4Ag^+ + 4e^-$ .

Silber geht unter Bildung von Silberionen und Elektronen in Lösung. Die Silberionen reagieren mit den in der wäßrigen Kaliumchloridlösung vorliegenden Chloridionen zu schwerlösli-

chem Silberchlorid. Das bei diesen Redoxvorgängen hervorgerufene elektrische Potential ist proportional zur in die Zelle eingedrungenen Menge an Sauerstoff.

### Meßwerterfassung

Die gemessenen Sauerstoffkonzentrationen wurden folgenden Korrekturen unterzogen:

- Berücksichtigung unterschiedlicher Temperatur  
Eine Temperaturkompensation bis 70 °C erfolgt automatisch.

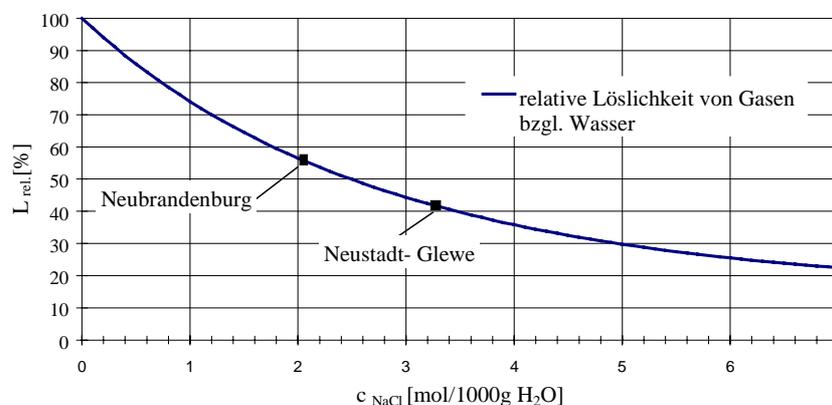
- Salzgehalt des Thermalwassers

Folgende Abhängigkeit wurde in Auswertung experimenteller Ergebnissen zur Löslichkeit von Gasen in NaCl- Lösungen nachgewiesen [Harting et al., 1981]:

$$L_{rel.} = 100^{(-0,315c+0,01452c^2)}$$

$L_{rel.}$  (c) relative Löslichkeit in Abhängigkeit vom Salzgehalt der Lösung

Weiterhin ist bekannt, daß 1 mol  $CaCl_2$  die gleiche Löslichkeitserniedrigung verursacht wie 1,8 mol NaCl. Für praktische Umrechnungen mit der Vorherrschaft von NaCl und  $CaCl_2$  in Schichtwässern ist es ausreichend, wenn die Salze einwertiger Kationen wie NaCl und die Salze zweiwertiger Kationen wie  $CaCl_2$  behandelt werden. Auf diese Weise erhält man die Konzentration c einer „NaCl- Lösung“, die eine gleiche Löslichkeitserniedrigung hervorruft wie das vorliegende Schichtwasser [Harting et al., 1981].



**Abbildung 7-3:** Relative Löslichkeit von Gasen in Abhängigkeit von der NaCl- Konzentration der Lösung

Zunächst wurden die Analysenwerte, deren Konzentrationsangabe üblicherweise in mg NaCl/l Lösung erfolgt, in mol NaCl/ 1000 g H<sub>2</sub>O umgerechnet und entsprechend wie oben beschrieben die Konzentration c einer NaCl - Lösung ermittelt. Nach (1) ergab sich für das Thermalwasser in Neubrandenburg eine relative Löslichkeit im Vergleich zu reinem Wasser von 56,0 % und in Neustadt-Glewe von 42,9 % (s. Abbildung 7-3).

- Eintrag von Luftsauerstoff an der Meßstelle

Auf Leckagen im Meßsystem wurde geprüft, indem bei unterschiedlichen Durchströmungsgeschwindigkeiten gemessen wurde.

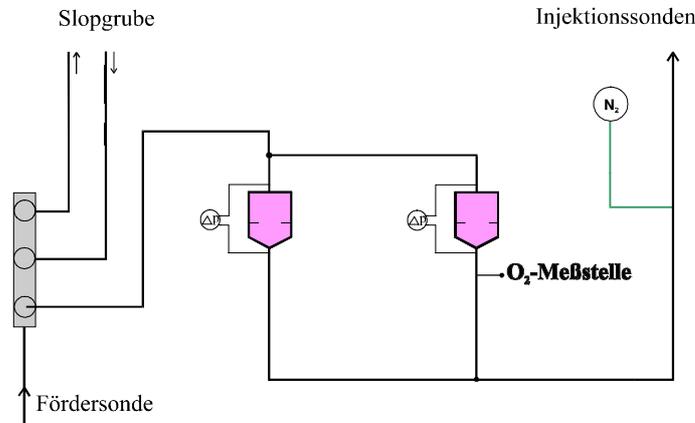
Bei einem Sauerstoffzutritt dringt dieser in einem konstanten Verhältnis in das sauerstoffärmere Medium ein. Das Thermalwasser wird also eine konstante Menge an Sauerstoff pro Zeiteinheit aufnehmen, so daß die gemessene Sauerstoffkonzentration umgekehrt proportional zur Durchflußgeschwindigkeit  $V$  der Probe ist.

$$c = c_0 + \frac{F}{V}$$

$c$	gemessene Sauerstoffkonzentration in [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ ]
$c_0$	wahre Sauerstoffkonzentration in [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ ]
$F$	Sauerstoffdiffusion in [ $\mu\text{g}/\text{min}$ ]
$V$	Durchflußgeschwindigkeit in [ $\text{kg}/\text{min}$ ]

### Versuchsanordnung

Probenahmestutzen sind jeweils nur nach den Filtern an den beiden Bohrungen installiert, so daß eine Kontrolle des Sauerstoffeintrages über die gesamte obertägige Anlage derzeit nicht möglich ist. Bei den durchgeführten Messung wurde ein kleiner Teil des Meßmediums aus der Rohrleitung nach dem Filter entnommen und über eine Durchflußkammer am Sensor vorbeigeleitet. In der Abbildung 7-4 ist die Meßstelle nach einem Filter vor der Injektionsbohrung dargestellt.



**Abbildung 7-4:** Vereinfachtes Fließschema - Filterhaus vor den Injektionsbohrungen mit Probenahmestelle

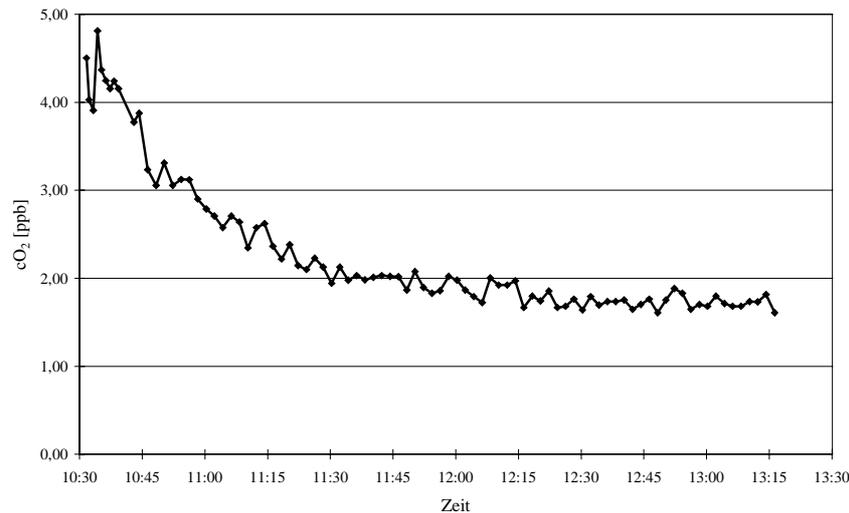
### 7.2.3 Ergebnisse der Sauerstoffmessungen in geothermischen Anlagen

#### *Sauerstoffmessungen im Normalbetrieb (GHZ mit und ohne Stickstoffbeaufschlagung)*

In zwei geothermischen Heizzentralen (mit und ohne Stickstoffbeaufschlagung) wurde der gelöste Sauerstoff im Thermalwasser während des Betriebes sowohl am Filter nach der Förderbohrung als auch am Filter vor der Injektionsbohrung gemessen.

Der mittlere Wert des Sauerstoffgehaltes im Thermalwasser, gemessen im kontinuierlichen Durchfluß von 180 ml/min, betrug 1,7 ppb O<sub>2</sub>. Diese Werte weisen auf ein nahezu sauerstofffreies Betriebssystem hin. Für beide geothermische Heizzentralen konnte im kontinuierlichen Betrieb unabhängig von einer Inertgasbeaufschlagung an allen Meßpunkten das gleiche Ergebnis registriert werden. Ein Sauerstoffeintrag findet während des Normalbetriebes somit nicht statt.

In der Abbildung 7-5 ist der Verlauf einer Sauerstoffmessung beispielhaft dargestellt.



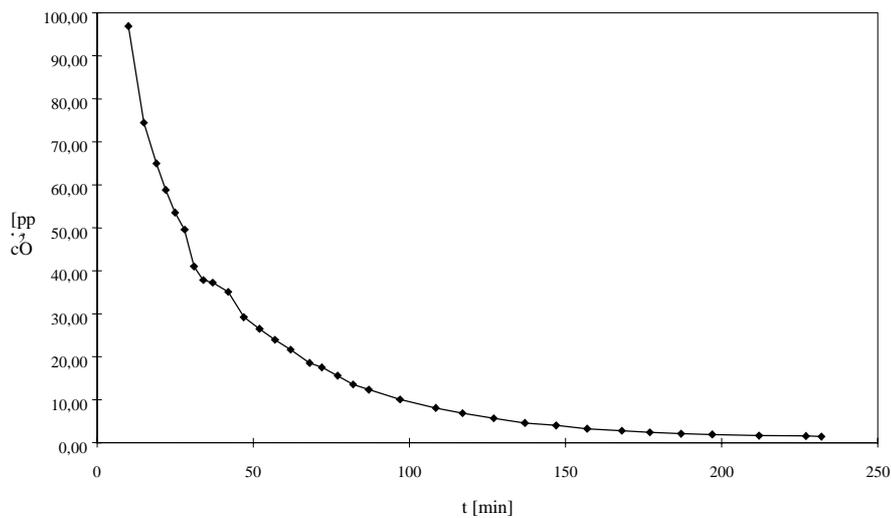
**Abbildung 7-5:** Gelöster Sauerstoff im Thermalwasser; Messung bei Normalbetrieb ohne Stickstoffbeaufschlagung

Die Kurve zeigt, daß zu Beginn der Messung die höchsten Werte registriert werden. Im Verlauf nehmen diese kontinuierlich ab und erreichen nach ca. 1,5 Stunden einen konstanten durchschnittlichen Wert von 1,7 ppb. Dieser Kurvenverlauf ist für alle Messungen typisch und erklärt sich aus der Tatsache, daß der in den Schlauchverbindungen gelöste Sauerstoff bestrebt ist, in das sauerstoffärmere Medium zu diffundieren. Obwohl die Schlauchverbindung zwischen Probenahmestutzen und Durchflußkammer so gering wie möglich (10 cm) gewählt wurde, sind jeweils die ersten Werte einer Messung mit diesem Fehler behaftet.

*Sauerstoffmessungen im Normalbetrieb nach einem Filterwechsel (GHZ ohne Stickstoffbeaufschlagung)*

Ein Filterwechsel erfolgt in den geothermischen Heizzentralen in Abhängigkeit von der Betriebsführung, bei kontinuierlichem Betrieb in der Regel alle drei Monate. Inwieweit sich das kurzzeitige Öffnen des Kreislaufs auf den Sauerstoffgehalt im Thermalwasser, insbesondere nach den Filtern vor der Injektionsbohrung auswirkt, sollten die Messungen zeigen.

Nach Wiederinbetriebnahme und nach einem Vorlauf von 10 min wurde ein Ausgangswert von nahezu 100 ppb gemessen. Nach ca. 2,5 Stunden pegelte sich der im Thermalwasser gelöste Sauerstoff auf den ursprünglichen im Normalbetrieb festgestellten Wert ein (s. Abbildung 7-6).

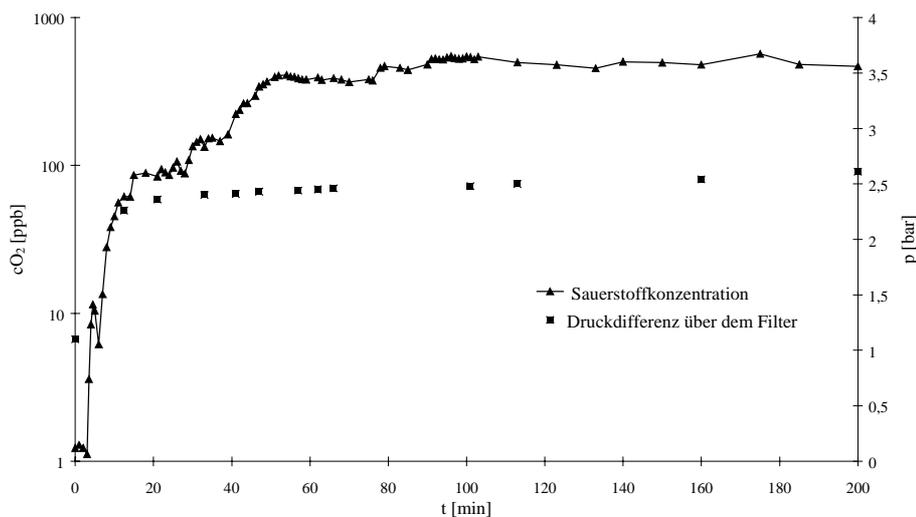


**Abbildung 7-6:** Gelöster Sauerstoff im Thermalwasser; Messung nach Filterwechsel

*Sauerstoffmessungen nach Slopwasserverpumpung*

Wie im Kapitel 7.1 beschrieben, wird anfallendes Thermalwasser zunächst in den sogenannten Slopbehältern gesammelt, damit sich Schwebstoffe im Thermalwasser absetzen können. Da die Behälter offen sind, reichert sich dieses Wasser mit Sauerstoff an. Eine kostengünstige Entsorgung dieser Wässer erfolgt, indem ein Teilstrom in den Thermalwasserstrom geleitet und mit reinjiziert wird.

Bei der in Abbildung 7-7 dargestellten Messung wurde das Slopwasser dem Thermalwasser in einem Verhältnis von ca. 1 : 55 zugeführt. Nach ungefähr 4 Minuten begann der Anstieg der Sauerstoffkonzentration. Mit dem Anstieg der Sauerstoffkonzentration erfolgte eine sprunghafte Erhöhung des Differenzdruckes über dem Filter von 1 bar Ausgangsdruck auf 2,3 bar.



**Abbildung 7-7:** Gelöster Sauerstoff im Thermalwasser und Druckentwicklung über den Filtern; Messung während der Slopwasserverpumpung

Nach der 22stündigen Slopwasserverpressung mußte der Filter aufgrund der erreichten möglichen Maximalbelastung gewechselt werden (s. Abbildung 7-8; vgl. Teil B, Kapitel 7.3).



**Abbildung 7-8:** Filter vor und nach der Slopwasserverpressung

#### *Sauerstoffmessungen nach Wartungsarbeiten*

Mit den Sauerstoffmessungen nach wartungs- und reparaturbedingtem Abschalten der Anlage, sollte analysiert werden, inwieweit sich dieses Eingreifen in den Thermalwasserkreislauf auf den Sauerstoffgehalt des Thermalwassers auswirkt.

- **Pumpentests (GHZ ohne Stickstoffbeaufschlagung)**

Nach einer Pumpenreparatur wurde ein Pumpentest durchgeführt, indem bei unterschiedlichen Fördervolumenströmen gefahren wurde. Die Anlage lief vor der Messung aufgrund geringer Wärmenachfrage in der Grundlast, was bedeutet, daß der Fördervolumenstrom auf das geringst mögliche Maß (35-40 m<sup>3</sup>/h) reduziert wurde. Die Sauerstoffmessung erfolgte nach den Filtern hinter der Förderbohrung.

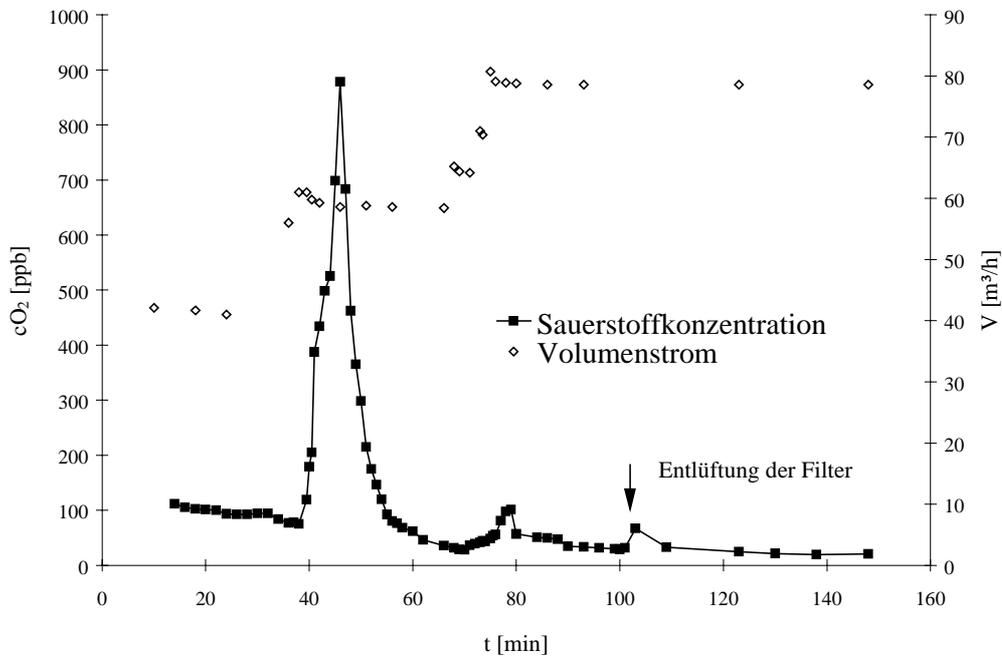
Aus der Abbildung 7-9 ist ersichtlich, daß bei der ersten Erhöhung des Fördervolumenstromes von 40 m<sup>3</sup>/h auf 60 m<sup>3</sup>/h die Sauerstoffkonzentration sprunghaft auf einen Maximalwert von ca. 900 ppb anstieg. Bei gleichbleibendem Volumenstrom sank dieser innerhalb weniger Minuten auf Ausgangswerte zurück. Eine Steigerung des Volumenstromes um weitere 20 m<sup>3</sup>/h bewirkte eine erkennbare, jedoch nur geringe Zunahme des gelösten Sauerstoffs im Thermalwasser.

Diese beobachteten Unterschiede lassen sich wie folgt erklären:

Die Erhöhung der Fördermenge bewirkte eine Absenkung des dynamischen Wasserspiegels, wodurch zum einen möglicherweise Sauerstoff in die Anlage gezogen und zum anderen vermehrt das Wasser, das sich während des Öffnens des Sondenkopfes mit Sauerstoff anreichern konnte, gefördert wurde. Beim zweiten Anheben des Förderstromes wirkte sich nur der erste Effekt auf die Sauerstoffkonzentration aus, da zu diesem Zeitpunkt nur noch in-situ-Schichtwasser gefördert wurde.

Während des Pumpentests wurden vermehrt Partikel im Thermalwasser gefördert, was sich in der Zunahme des Druckes über den Filtern widerspiegelte. Offensichtlich bewirkte die durch

die schnelle Zunahme des Thermalwasserstromes hervorgerufene, starke mechanische Beanspruchung ein „Abplatzen“ der Partikel, die sich an der Oberfläche der Verrohrung gebildet hatten (s. Teil B, Kapitel 7.3).



**Abbildung 7-9:** Gelöster Sauerstoff im Thermalwasser, Messung bei unterschiedlichen Fördervolumenströmen und nach Filterwechsel

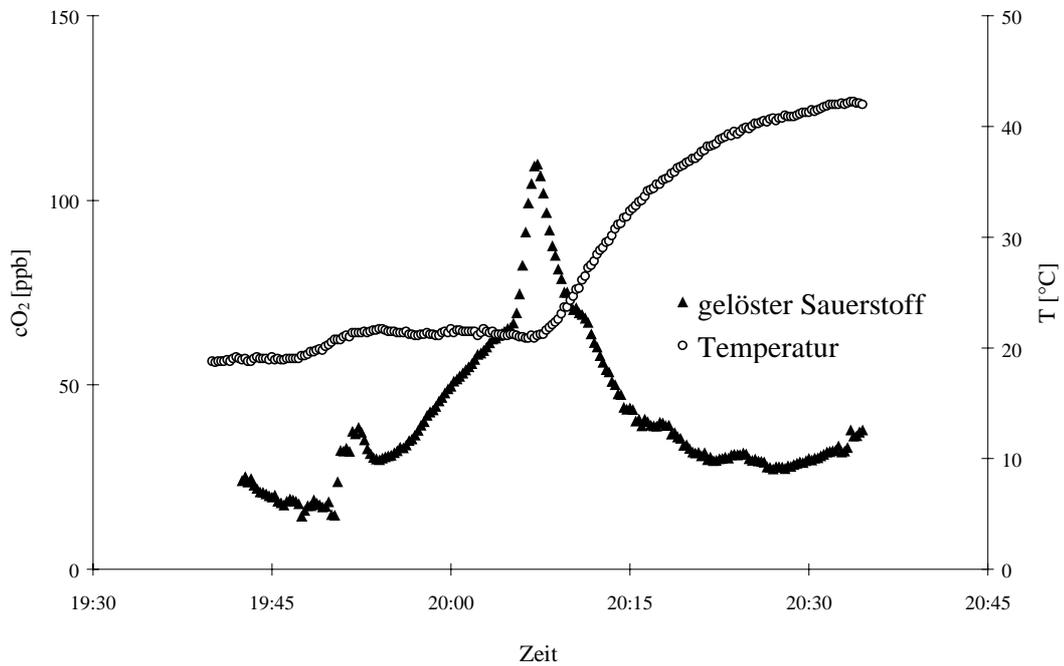
- Anfahren nach Stillstand (GHZ mit Stickstoffbeaufschlagung)

Die GHZ wurde, bevor sie außer Betrieb ging, mit Stickstoff frei gespült und während des Stillstandes unter Stickstoffbeaufschlagung gehalten. In Abbildung 7-10 ist die Sauerstoffkonzentrationsmessung während des Förderns von einem Bohrlochvolumen an Thermalwasser (ca. 70 m<sup>3</sup>) nach dreiwöchiger Betriebspause dokumentiert. Gemessen wurde nach den Filtern vor der Injektionsbohrung.

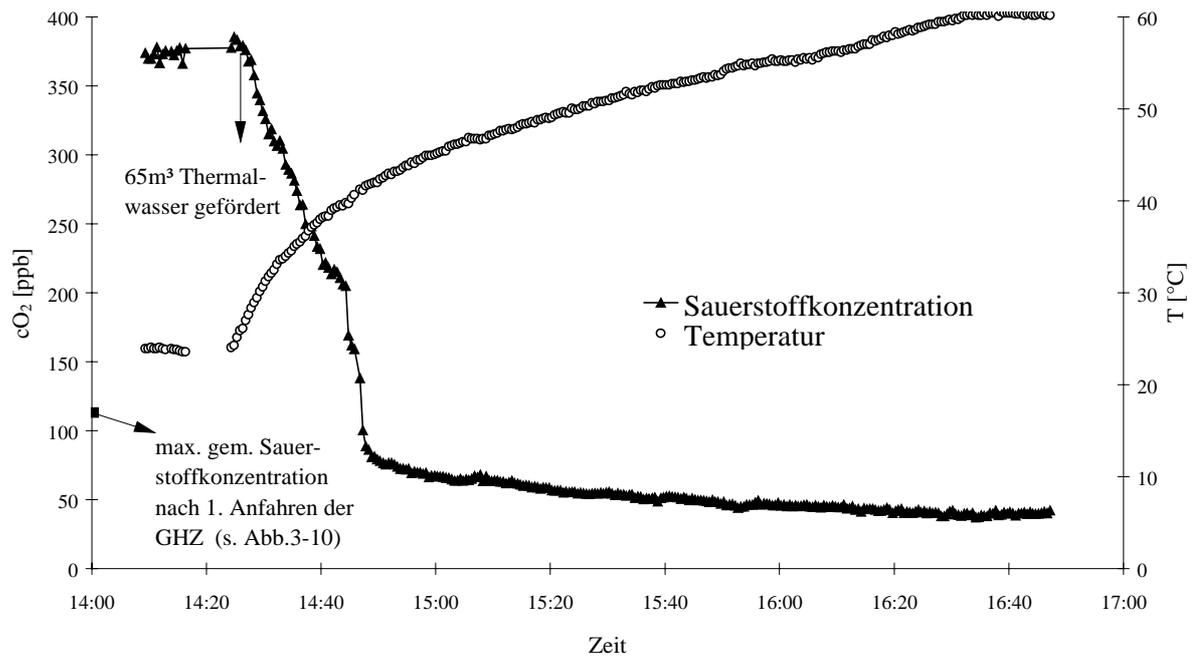
Während der Messung wurde mit konstantem Fördervolumenstrom von 43 m<sup>3</sup>/h gefahren. Bis zum Meßbeginn waren bereits ca. 30 m<sup>3</sup> Thermalwasser gefördert worden. Wie aus Abbildung 7-10 ersichtlich, wurde gegen 19.50 Uhr ein leichter Anstieg der Sauerstoffkonzentration registriert, der wahrscheinlich auf einen Sauerstoffeintrag während des Auswechslens einzelner Anlagenteile zurückzuführen ist. Der gelöste Sauerstoff im Thermalwasser erreicht einen Maximalwert von 110 ppb, nachdem 50 m<sup>3</sup> Wasser gefördert wurden. Mit zunehmender Förderung von Schichtwasser, die sich in der Temperaturzunahme widerspiegelt, nimmt auch der Sauerstoffgehalt im Thermalwasser ab.

Nach einem weiteren Stillstand von einer Woche wurde erneut die Sauerstoffkonzentration im Thermalwasser während der Anfahrphase gemessen (Abbildung 7-11). Aufgrund technischer Schwierigkeiten (automatisches Umschalten des Thermalwasserstromes auf die andere Filtereinrichtung) lieferte die Sauerstoffmessung erst nach einer Stunde gesicherte Werte. Beobachtet wurden im Vergleich zu den Untersuchungen nach dem ersten Anfahren höhere Ausgangswerte (ca. 380 ppb). Nach dem Fördern von 65 m<sup>3</sup> Wasser fallen die Sauerstoffwerte ab. Diese Abnahme der Sauerstoffkonzentration korreliert mit der Erhöhung der Temperatur, was

darauf schließen läßt, daß ab diesem Zeitpunkt Schichtwasser aus der Förderbohrung reinji-  
ziert wurde.



**Abbildung 7-10:** Gelöster Sauerstoff im Thermalwasser; Messung nach 3wöchiger Stillstandszeit



**Abbildung 7-11:** Gelöster Sauerstoff im Thermalwasser; erneutes Anfahren der GHZ nach einwöchiger Pause

## *Schlußfolgerungen*

- Unabhängig von einem Stickstoffbeaufschlagungssystem konnte während eines kontinuierlichen Normalbetriebes Sauerstoff nur in geringer Konzentration im Thermalwasser nachgewiesen werden.
- In den Thermalwasserkreislauf eingetragener Sauerstoff wird nicht quantitativ in der oberflächigen Anlage umgesetzt, was bedeutet, daß Sauerstoff als Reaktionspartner während des Reinjizierens vorliegt und somit mit Ausfällungsprodukten noch nach den Filtern zu rechnen ist.
- Besondere Aufmerksamkeit erfordert ein Anfahren der Anlagen nach längeren Betriebspausen. Mit geringster Sauerstoffbelastung ist zu rechnen, wenn während des Stillstandes die Anlage einer Stickstoffbeaufschlagung unterzogen wird. Die ermittelten Sauerstoffwerte während des Anfahrens, sind so niedrig, daß auch wenn der Thermalwasserkreislauf geöffnet wurde ohne Gefahr reinjiziert werden könnte. In diesem Fall wird ein Abfahren der Wässer in die Slopgruben als nicht notwendig erachtet. Die Sauerstoffmessungen haben weiterhin gezeigt, daß in das in der Anlage stehende Thermalwasser, selbst wenn dieses unter Druck gehalten wird, beträchtliche Mengen Sauerstoff diffundieren. Deshalb ist es empfehlenswert, den Thermalwasserkreislauf auf Undichtheiten regelmäßig zu kontrollieren. Kontinuierliche Sauerstoffmessungen würden helfen, Schwachstellen zu erkennen.
- Weiterhin sollte eine schnelle und abrupte Erhöhung der Förderrate weitestgehend vermieden werden, da hier insbesondere bei Anlagen ohne Stickstoffbeaufschlagung die Gefahr des verstärkten Partikeleintrages gegeben ist. Ein Sammeln der Wässer in den Slopgruben ist anzuraten, damit Schwebstoffe sedimentieren können. Beim Verpumpen der Slopwässer sollten diese nochmals filtriert werden, um den Partikelgehalt zu minimieren. Mit einem Sauerstoffeintrag in den Aquifer ist jedoch in jedem Fall zu rechnen.
- Weiterführende Untersuchungen sind notwendig, um das durch einen Sauerstoffeintrag hervorgerufenen Schädigungspotential quantifizieren zu können.

## **7.3 Filteruntersuchungen**

### **7.3.1 Aufbereitungsanlagen**

Unter Aufbereitungsanlagen werden bei der hydrogeothermalen Erdwärmenutzung die Filteranlagen verstanden, über die eine Reinigung des Thermalwassers durchgeführt wird. Mittels einer Tiefenfiltration, wo eine Ablagerung der Feststoffe im Inneren des Filters erfolgt, werden gute bis sehr gute Abscheideergebnisse und somit eine gute Klärwirkung erreicht. Zur Sicherung einer Abtrennung der Partikel nach der Größe werden Filtrationsverfahren eingesetzt, die eine Oberflächenfiltration (Abscheidung des Feststoffes an der Filteroberfläche) realisieren. Für geothermische Anwendungen wird eine Kombination beider Filtrationsprozesse gewählt, um sowohl eine gute Klärwirkung als auch eine Klassierung zu gewährleisten.

Das Thermalwasser wird unmittelbar nach der Entnahme aus der Förderbohrung einer Grobfiltration unterzogen. Sie dient zum einen dem Schutz der nachgeschalteten Anlagenteile und zum anderen als Vorfiltrationsstufe für die Reinjektion des ausgekühlten Thermalwassers. Für die Grobfiltration kommen zwei austauschbare Beutelfilter mit einer Porengröße von 10 µm (GHZ Neubrandenburg) bzw. 3 µm (GHZ Neustadt-Glewe) zum Einsatz. Direkt vor der Reinjektion des Thermalwassers in die Injektionsbohrung erfolgt die Feinfiltration mit einer Porengröße von 2,5 µm (GHZ Neubrandenburg) bzw. 1 µm (GHZ Neustadt-Glewe). Eingesetzt werden ebenfalls Beutelfilter. Die Filter sind in zwei Gruppen zu je zwei Filtereinheiten

angeordnet. Die Filtration muß als ein kontinuierlicher Prozeß erfolgen, d. h. beim Erreichen der maximalen Beladung der Filter wird auf die parallel angeordneten Redundanz-Filter umgeschaltet.

### 7.3.2 Filterinhaltsstoffe

Im Verhältnis zum durchgesetzten Volumen an Thermalwasser ist die Menge der abgeschiedenen Feststoffpartikel während des Normalbetriebes sehr gering. Nach technischen Wartungsarbeiten an der Förderbohrung (z. B. Pumpenwechsel), nach längeren Stillstandszeiten der Anlagen und bei der Slopwasserverpressung steigt die Menge der zurückgehaltenen Partikel jedoch deutlich an. Die mineralogisch-geochemischen Untersuchungen der Filterrückstände aus den Filteranlagen der Förder- und Injektionsbohrungen der geothermischen Heizzentralen Neubrandenburg und Neustadt-Glewe wurden sowohl am unbehandelten als auch am mehrmals mit destilliertem Wasser gespülten Filtermaterial durchgeführt. Diese Arbeiten erfolgten am GFZ Potsdam.

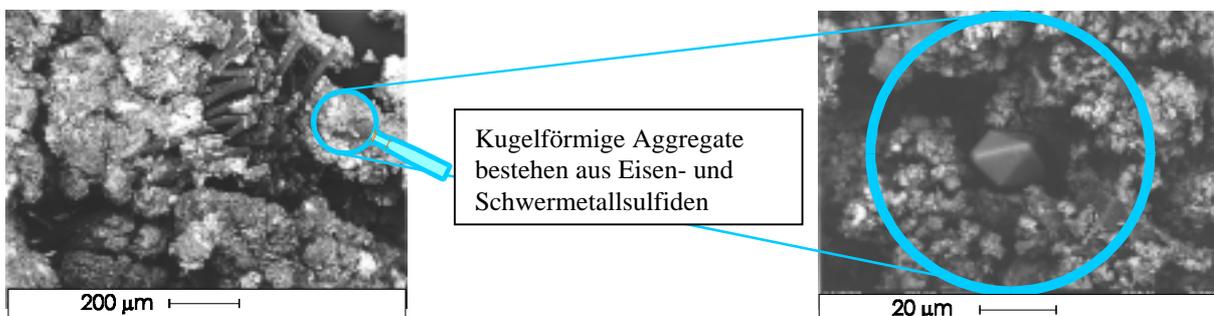
#### *Filterrückstände im Normalbetrieb*

- Filter der Förderbohrungen - Beutelfilter: Filterfeinheit von 10 µm (GHZ Neubrandenburg) bzw. 3 µm (GHZ Neustadt-Glewe)

In den Filterrückständen der Förderbohrungsfilter treten sowohl aus dem Speicher (z. T. auch aus den Filtersanden) mobilisierte Partikel als auch Ausfällungs-, Korrosions-, und trocknungsbedingte Rückstände auf.

Bei den Partikeln, die aus dem Speicher selbst stammen, handelt es sich um Quarz, Feldspat und Schichtsilikate (Kaolinit und Illit/Smektit-Wechsellagerungen). Das Korngrößenspektrum der Quarze und Feldspäte reicht von etwa 10 µm bis zu maximal 300 µm. Die überwiegend sehr feinen (<5µm großen) Schichtsilikate bilden in den Filtern meistens größere, aus einer Vielzahl von Partikeln bestehende Aggregate. In wesentlich geringeren Mengen treten weitere aus den Speichersandsteinen mobilisierte Karbonate auf.

Den größten Anteil an den Filterrückständen nehmen neben den trocknungsbedingten Rückständen (vorwiegend NaCl-Kristalle) Metallabscheidungen ein. Dabei handelt es sich überwiegend um Magnetit sowie um Eisen-, Blei- und Zinksulfide; untergeordnet treten auch Cu-Sulfide auf. Die Hauptmasse dieser Ausfällungen bildet z. T. kugelförmige Aggregate, die aus feinen und < 5 µm großen Partikeln bestehen. Einzelkristalle von Sulfiden erreichen maximale Korngrößen von ca. 10 µm (Abbildung 7-12).



**Abbildung 7-12:** Elektronenmikroskopische Aufnahmen der Filterrückstände der Injektionsbohrung in Neustadt-Glewe.

Zwischen den beiden untersuchten Standorten existieren deutliche Unterschiede. Während die Sulfide in Neustadt-Glewe dominieren und Magnetit meist nur untergeordnet und in Spuren auftritt, überwiegt letzterer in den Neubrandenburger Filtern. In Neustadt-Glewe übertrifft die Menge an PbS-Abscheidungen die ZnS-Rückstände deutlich. In Neubrandenburg ist der Anteil an ZnS-Ausfällungen deutlich größer als der in Neustadt-Glewe.

Weitere Phasen in den Filtern sind Goethit, gediegen Schwefel,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MnCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$  und  $\text{BaSO}_4$ . Ihr Anteil am Gesamtfiltrerrückstand ist allerdings sehr gering.

Die trocknungsbedingten Abscheidungen bestehen zu über 90 % aus NaCl, daneben treten jedoch auch  $\text{CaCl}_2$  und Laurionite ( $\text{PbClOH}$ ) auf (s. Abbildung 7-13).

- Feinfilter vor der Injektionsbohrung:

Filterfeinheit von 2,5  $\mu\text{m}$  (GHZ Neubrandenburg) bzw. 1  $\mu\text{m}$  (GHZ Neustadt-Glewe)

Generell sind die Gehalte der Filtrerrückstände in den Feinfiltern der Injektionsbohrungen wesentlich geringer als die der Filter der Förderbohrungen. Von den aus den Speichern selbst mobilisierten Partikeln sind nur noch Schichtsilikate mit sehr geringer Korngröße nachzuweisen. Als weitere Filterbestandteile treten die oben beschriebenen Sulfidphasen auf, wobei nachgewiesen werden konnte, daß die Akkumulation dieser Sulfide sehr oft von einer Kristallisation an den Filtermaschen ausgeht.

Magnetit,  $\text{CaSO}_4$  und  $\text{BaSO}_4$  stellen weitere, allerdings mit geringen bis sehr geringen Gehalten auftretende, Rückstandskomponenten dar (s. Abbildung 7-13).

Die trocknungsbedingten Abscheidungen gleichen den obigen.

#### *Filtrerrückstände während technischer Wartungsarbeiten (GHZ Neubrandenburg)*

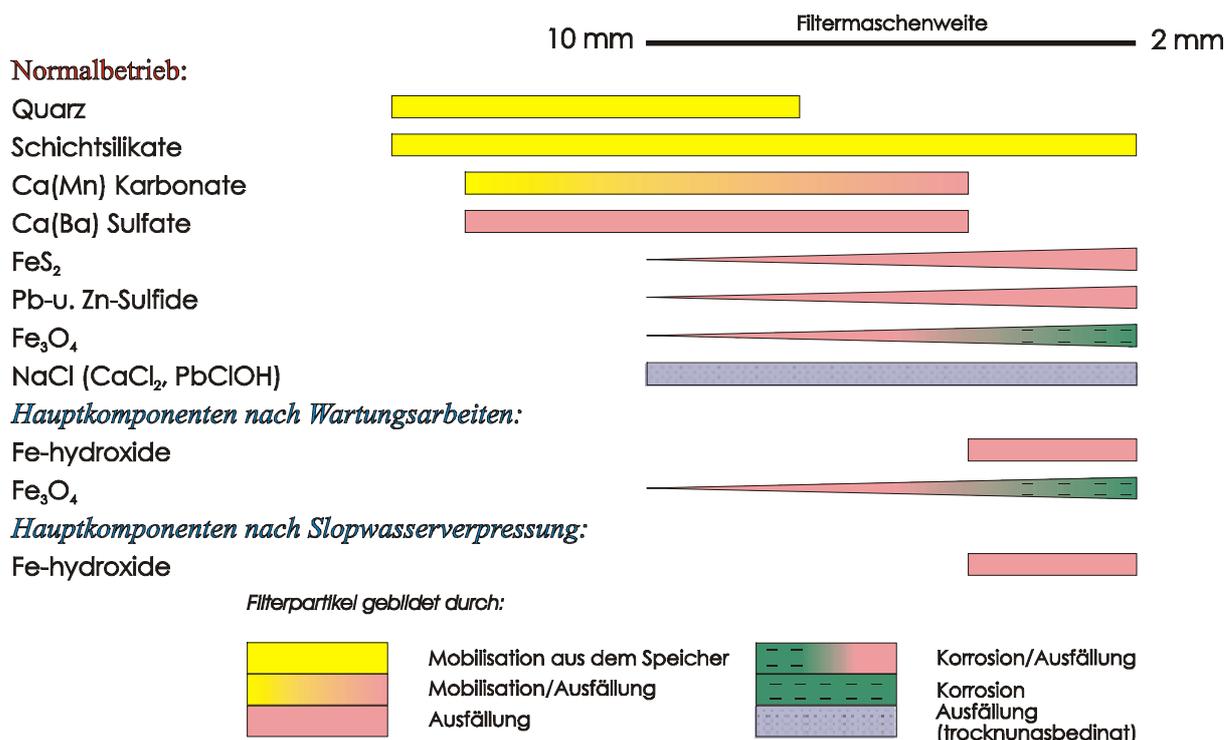
Die an der Förderbohrung in Neubrandenburg während der Frequenzeinstellung der Pumpe (unterschiedliche Förderraten, teilweise Stillstand) gebildeten Filtrerrückstände zeigen im Vergleich zu obigen Filtern einen sehr starken Anstieg im Magnetitgehalt.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  stellt hierbei die dominierende Komponente in den Filtern überhaupt dar. Die elektronenmikroskopischen Untersuchungen ergaben, daß die Magnetitpartikel Spuren von Cr, Ni, Ti aufweisen.

Die Filtrerrückstände während der Slopwasserverpressung bestehen zu über 90 % aus Eisenhydroxiden und trocknungsbedingten Ausfällungen von NaCl (Abbildung 7-13).

#### *Schlußfolgerung*

Zur Bildung der Metallsulfide kommt es durch Reaktion der entsprechenden im Thermalwasser gelösten Metallionen mit Schwefelwasserstoff. Im Neubrandenburger Thermalwasser ist dieser gelöste Schwefelwasserstoff nachweisbar. Zusätzlich bilden Bakterien, die an den Filtern zurückgehalten werden und sich dort vermehren, Schwefelwasserstoff (s. Teil A, Kapitel 4.5).

Thermodynamische Modellierungen zum Sulfid-Ausfällungspotential der Thermalwässer sind von Kühn (1997) durchgeführt worden. Diese beschränken sich durch das Fehlen von thermodynamischen Daten für amorphe Bleisulfide auf die Betrachtung der Ausfällungsmöglichkeiten der Zinksulfide. Da im Thermalwasserkreislauf in Neustadt-Glewe kein Sulfid nachweisbar war, erfolgten die entsprechenden Modellierungen nur für den Standort Neubrandenburg. Aus Berechnungen [Kühn, 1997] mit den Ausgangsdaten für  $\text{Zn} = 6,8 \mu\text{g/l}$  und  $\text{S}^{2-} = 23 \mu\text{g/l}$  folgt, daß das Wasser in Neubrandenburg bei einer Injektionstemperatur von  $40^\circ\text{C}$  mit amorphem ZnS im Gleichgewicht steht. Eine Abkühlung unter  $40^\circ\text{C}$  bedingt eine Übersättigung der Lösung und kann damit zur ZnS-Ausfällung führen. Aus diesen Berechnungen folgt, daß für Neubrandenburg eine rein thermodynamisch verursachte Ausfällung von Sulfiden in Betracht kommt. Generell gilt jedoch, daß der überwiegende Anteil der Sulfidfällung wahrscheinlich bakteriell bedingt ist.



**Abbildung 7-13:** Filterrückstände der Förder- und Injektionsbohrung in Neubrandenburg und Neustadt-Glewe

Die Ursachen für den teilweise auftretende hohe Anteil an Magnetit sind derzeit noch nicht geklärt. Wie schon von Fietz et al. (1992) dargestellt, kann zur Zeit nur auf die folgenden möglichen Gründe verwiesen werden:

- Ausfällung aus dem Thermalwasser aufgrund mikrobieller Tätigkeit; einige Bakterien sind nach Aller und Rude (1988) in der Lage, Sulfide bei Anwesenheit von Mangan unter anaeroben Bedingungen zu oxidieren.
- chemischer Umsatz,
- Korrosion von Anlagenteilen im Förderbereich.

#### 7.4 Zusammenfassung und Ausblick

Ein in Neustadt-Glewe durchgeführter modifizierter Injektionstest mit aufeinanderfolgender Förderung und Reinjektion zeigte im Vergleich zu den an anderen Geothermiebohrungen durchgeführten Testen, daß dieser Speicher auf mit Luft kontaminierte Schichtwässern sehr sensibel reagiert [Seibt et al., 1996]. Um die Gefahr eines Sauerstoffeintrages so gering wie möglich zu halten, wurde deshalb ein Druckhaltungs- und ein Stickstoffbeaufschlagungssystem installiert. Erfahrungen aus den beiden anderen in Nordostdeutschland über mehrere Jahre erfolgreich betriebenen Anlagen in Waren/Müritz und Neubrandenburg zeigen, daß die mesozoischen Sandsteinspeicher auf die Reinjektion von O<sub>2</sub>-haltigen Thermalwässern unterschiedlich reagieren.

Um eine Minimierung der spezifischen Aufbereitungskosten zu ermöglichen, muß die Wasserqualität also auf die Erfordernisse der jeweiligen Lagerstätte eingestellt werden. Ziel muß es sein, zwischen Investitionskosten- und Betriebskosten für eine GHZ und den damit erreichbaren Wasserqualitäten ein Optimum zu finden.

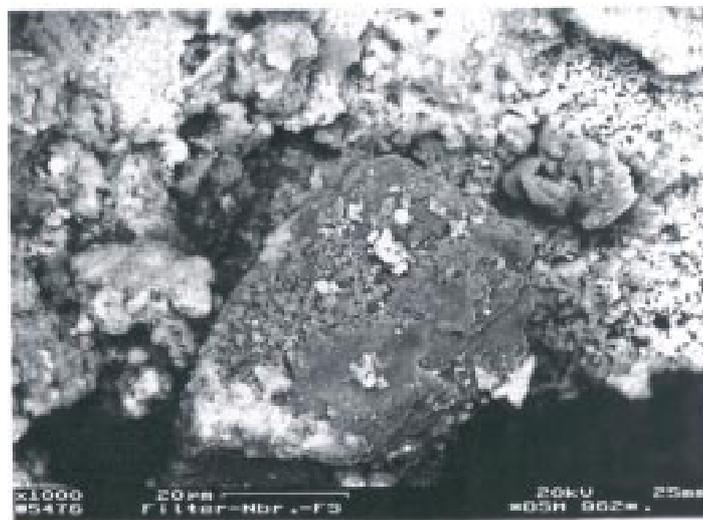
Deshalb sind folgende Fragen zu klären:

- Wo und wann ist mit einem Sauerstoffeintrag zu rechnen?
- Welchen Einfluß hat Sauerstoff auf das Reinjektionsverhalten?
- Ist eine Reinjektion von sauerstoffhaltigen Wässern möglich?

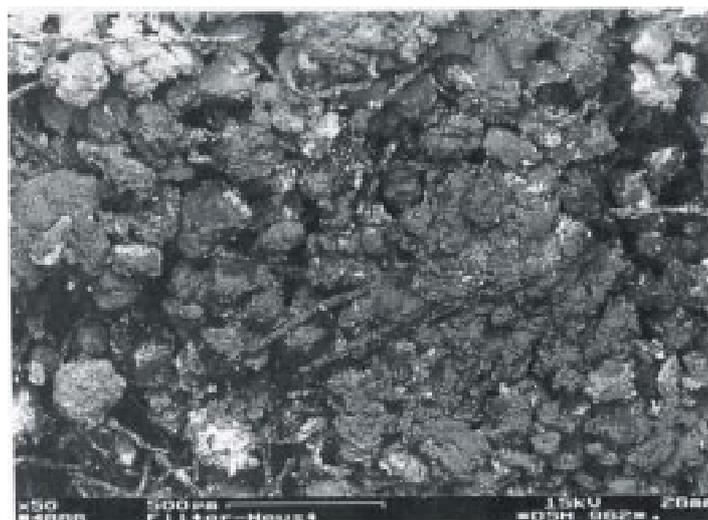
Mittels der erstmalig durchgeführten Sauerstoffmessungen während unterschiedlicher Betriebszustände einer GHZ und der Analyse der entsprechenden Filtrückstände konnte gezeigt werden, daß bei Kontrolle des Sauerstoffgehaltes im Thermalwasser besonders nach Stillstandzeiten und während des Anfahrprozesses Entscheidungen getroffen werden können, die zur Minimierung laufender Betriebskosten beitragen. Um eine quantitative Aussage hinsichtlich der im Zusammenhang mit einem Sauerstoffeintrag stehenden Vorgänge im Speichergestein und daraus schlußfolgernd eine genaue Bestimmung der Speicherschädigung in Abhängigkeit von der Zeit treffen zu können, sind weiterführende Untersuchungen wie z.B. Durchströmungsuntersuchungen und Bestimmung der elektrischen und elektrokinetischen Eigenschaften der Speichergesteine notwendig. Bei diesen Untersuchungen sollte die physiologische Aktivität von fakultativen Anaerobern, die bei minimalem Sauerstoffangebot im Thermalwasser lebens- und vermehrungsfähig sind, Berücksichtigung finden.



a



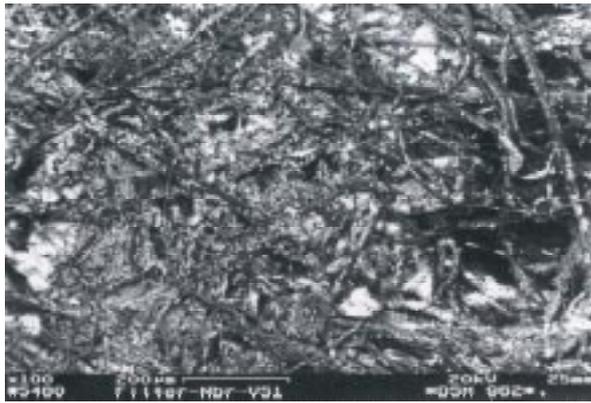
b



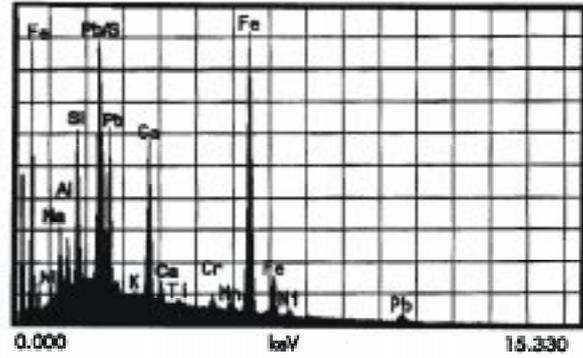
c

**Tafel 7-1:** Charakteristische Filterinhaltsstoffe der Filteranlagen der Produktionsbohrungen in Neubrandenburg und Neustadt-Glewe.

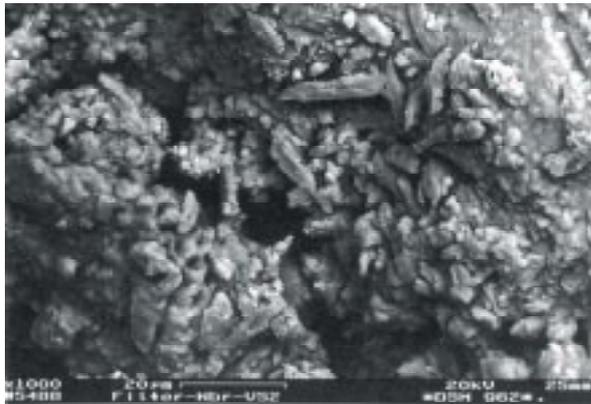
- a = Karbonatpartikel in einer feinen Matrix, welche aus Sulfiden, Schichtsilikaten, Magnetit und Trocknungsrückständen besteht,
- b = Feldspatpartikel in einer ähnlichen Matrix wie A,
- c = überwiegend Quarzpartikel.



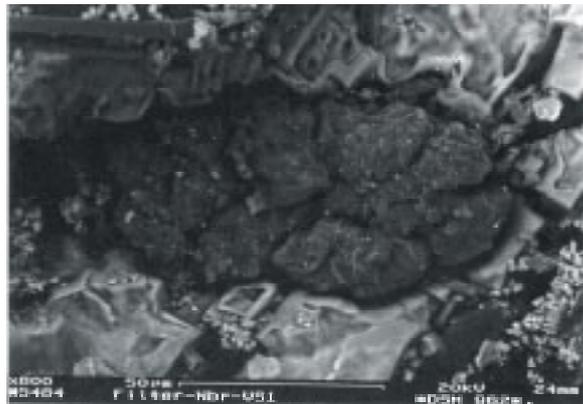
a



b



c



d

Tafel 7-2: Charakteristische Filterrückstände in den Filteranlagen der Verpreßbohrungen in Neubrandenburg (Nb) und Neustadt-Glewe (NG).

a = überwiegend Sulfidrückstände (NG),

b = analysierte Blei- und Eisensulfidrückstände (NG),

c = Eisenhydroxidrückstände nach Slopwasserverpressung (Nb),

d = Barytabscheidung (Nb).