



- Arbeitsbereich Wasserwirtschaft und Wasserversorgung -

Hydraulisches, thermisches und mechanisches Verhalten geothermisch
genutzter Aquifere:

**Entwicklung und Anwendung eines benutzerfreundlichen
geochemisch-hydrothermodynamischen Modells**

- Endbericht -

Förderkennzeichen: **0326995 B**

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Wilfried Schneider

Bearbeiter: Dr. Michael Kühn
Prof. Dr.-Ing. Wilfried Schneider

Bearbeitungszeitraum: 1. 1. 1997 – 31. 10. 2001

Hamburg, den 31. Oktober 2001

Hausanschrift:
Schwarzenbergstr. 95
D-21073 Hamburg

Postanschrift:
D-21071 Hamburg

Telefon: 040 / 42878 - 3094
Telefax: 040 / 42878 - 2999
e-mail: w.schneider@tu-harburg.de

Zusammenfassung

Die geothermische Nutzung geeigneter Aquifere stellt einen Eingriff in das eng gekoppelte System von Gesteinsmatrix und strömendem Wasserkörper sowie der zugehörigen Stoff- und Energiebilanz dar. Die Intensität dieser Nutzung verursacht entsprechend rasche physikalische und chemische Systemveränderungen.

Die in diesem Projekt bearbeiteten Fragestellungen sind Bestandteil des Gesamtkonzepts des aus insgesamt vier Einzelprojekten bestehenden Verbundvorhabens „Hydraulisches, thermisches und mechanisches Verhalten geothermisch genutzter Aquifere“ und eng mit den Themen der anderen Projekte verflochten. Das Gesamtprojekt wurde vom Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben in Hannover koordiniert. Die Hauptbeiträge dieses Projektes sind:

- die Entwicklung eines geochemischen Moduls für das Computerprogramm SHEMAT zur Berechnung von Mineralgleichgewichten in hochsalinaren Lösungen für in-situ Temperaturen und Drucke bei der hydrogeothermalen Energiegewinnung,
- die Entwicklung einer benutzerfreundlichen grafisch basierten WINDOWS Oberfläche zur schnellen und sicheren Erstellung von Modellen (inklusive Dokumentation und Tutorial),
- die exemplarische Anwendung des Programmpaketes Processing SHEMAT / SHEMAT zur Simulation von Strömung, Wärmeausbreitung, Stofftransport und chemischen Reaktionen in typischen Modellaquiferen:
 - in Abhängigkeit von förderbedingten Änderungen des Druck- und Temperaturfeldes im Umfeld eines idealisierten Injektionsbrunnen,
 - zur Simulation der geothermischen Langzeitnutzung des potentiellen Standortes Stralsund,
 - zur Evaluierung des Programms SHEMAT durch eine umfangreiche dreidimensionale Simulation des geothermischen Reservoirs von Waiwera (Neuseeland).
- die Abschätzung von Subsidenz an der Erdoberfläche als Folge von Druckabbau in einem „typischen“ Modellaquifer,

Erstes Projektziel war es, ein geochemisch-hydrothermodynamisches Modul für das Simulationsprogramm SHEMAT zu entwickeln, um mögliche Mineralfällungen prognostizieren zu können. Die notwendigen thermodynamischen Gleichgewichtsberechnungen müssen für Wässer mit hohen Ionenstärken und hohen Temperaturen durchgeführt werden, um die geologischen und physikalischen Randbedingungen der in Norddeutschland potentiell nutzbaren Reservoirs adäquat nachbilden zu können.

Ausgangspunkt ist eine Auswahl potentieller Mineralreaktionen, die aus der Literatur bekannt sind. Die Fällungsprodukte haben in Laborexperimenten und auch in geothermischen Systemen selbst zu Permeabilitätsveränderungen geführt. Es handelt sich dabei u.a. um Eisenhydroxid (FeOH_3), Kieselsäure (SiO_2), Schwermetallsulfide (MS_x), Calcit (CaCO_3), Anhydrit (CaSO_4), Eisensulfid (FeS) und auch noch Baryt (BaSO_4). Es wird angenommen, dass den Fällungsreaktionen aufgrund der daraus resultierenden Porenraumverringerungen eine größere Bedeutung zukommt als möglichen Lösungsreaktionen. Aus den aufgeführten Fällungsprodukten lässt sich das Spektrum von Elementen ableiten, die innerhalb des chemischen Moduls Berücksichtigung finden sollten.

Ein ideales Modell für die Berechnung von Aktivitätskoeffizienten in geochemischen oder technischen Simulationsprogrammen müsste folgende Eigenschaften besitzen: Konsistenz mit den Hauptsätzen der Thermodynamik; kompakte mathematische Form; hohe Genauigkeit über einen weiten Bereich der Randbedingungen Druck, Temperatur und Ionenstärke der Lösungen; Anwendbarkeit auf das möglichst komplette System der Elemente des Periodensystems. Zur Zeit existiert kein Modell, das diese Voraussetzungen komplett erfüllt.

Die quantitative Abschätzung möglicher Fällungsreaktionen erfolgt mit Hilfe der Sättigungsindizes. Der Sättigungsindex spiegelt den Sättigungszustand einer Lösung bezüglich eines Minerals wieder und kann mit den Modellvorstellungen von Pitzer oder Debye-Hückel ermittelt werden. Aufgrund der hohen internen Konsistenz und Genauigkeit der Berechnungen mit den Pitzer-Gleichungen bieten diese den erfolversprechendsten Ansatz zur Berechnung der Speziesaktivitäten und Minerallöslichkeiten in hochsalinaren Lösungen. Aus diesem Grund wurde das Programm SHEMAT mit einem geochemischen Speziationsmodul ausgestattet, das auf dem Programm PHRQPITZ basiert.

In der folgenden Zusammenstellung der erarbeiteten Systemvoraussetzungen des chemischen Moduls ist das zur Zeit abgedeckte Spektrum an Spezies, Mineralen, Salzgehalten, Temperaturen und Drucken durch die rote Farbe gekennzeichnet. Durch die zur Zeit verfügbaren thermodynamischen Basisdaten ist der Umfang begrenzt.

- **Spezies:** Na-K-Ca-Mg-Ba-Sr-H-Cl-SO₄-OH-HCO₃-CO₃-CO₂-H₂O-Fe-Si-M-S
- **Minerale:** Carbonate, Sulfate, Chloride, Fe-Hydroxid, Kieselsäure, Sulfide
- **Salzgehalte:** 0 – 300 g/L
- **Temperaturen:** 0 – 150°C
- **Drucke:** 1 – 250 bar

Zweites Projektziel war die Erstellung einer benutzerfreundlichen WINDOWS-Oberfläche. Diese Oberfläche ermöglicht eine komfortable Handhabung des Simulationsmodells, dient als Eingabehilfe beim Modellaufbau und unterstützt die Visualisierung der Simulationsergebnisse.

Die Entwicklung der grafisch gesteuerten Benutzerschnittstelle wurde durchgeführt auf Grundlage des Quellcodes des Programms Processing MODFLOW. Das Programm wurde u.a. erweitert, um die notwendigen Eingabeparameter für den Wärme- und Stofftransport sowie für die chemischen Reaktionen zu erfassen.

Die Einarbeitung in die Bedienung der grafischen Benutzeroberfläche ist in einem „Tutorial“ ausführlich anhand einer Schritt für Schritt Anweisung beschrieben. Dort wird am Beispiel des potentiellen Geothermiestandortes Stralsund im Detail gezeigt, wie ein Simulationsmodell in „Processing SHEMAT“ aufgebaut wird und wie, nach erfolgter Berechnung mit SHEMAT, die Ergebnisse mit Hilfe der Visualisierungswerkzeuge bearbeitet werden können. Zusätzlich ist eine umfangreiche Hilfefunktion in die grafische Benutzeroberfläche integriert, die zu jeder Zeit an jeder Stelle des Programms Informationen zur Bedienung liefert.

Zentrales Entwicklungsergebnis des Verbundvorhabens ist das Simulationswerkzeug „Processing SHEMAT / SHEMAT“. Mit seiner Hilfe ist das experimentell und aus Betriebs-erfahrungen bisher noch nicht zugängliche Langzeitverhalten der Speichereigenschaften eines geothermisch genutzten Sandsteinaquifers zuverlässiger quantifizierbar.

Drittes Projektziel war es, mit dem Programmpaket Processing SHEMAT / SHEMAT Anwendungsrechnungen für Modellaquifere durchzuführen, um das hydraulische, thermische und mechanische Verhalten geothermisch genutzter Aquifere zu untersuchen. Zunächst wurden Prozesse im Nahbereich einer Injektionsbohrung simuliert. Dieses System wurde dann auf den potentiellen Geothermiestandort Stralsund erweitert, um die dortigen Möglichkeiten der geothermischen Wärmegewinnung abzuschätzen und das Langzeitverhalten des bereits erbohrten Reservoirs zu untersuchen. Zur Evaluierung des Programms SHEMAT wurde eine umfangreiche dreidimensionale Simulation des geologisch gut untersuchten geothermischen Reservoirs von Waiwera (Neuseeland) durchgeführt.

Aufgrund der geologischen Voraussetzungen in Deutschland ist die Nutzung hydrogeothermaler Wärme vor allem an tiefe Aquifere und die Installation eines Dublettensystems aus Produktions- und Injektionsbohrung gebunden. Aufgrund der Tatsache, dass die Injektivität eines Reservoirs sehr sensibel auf Veränderungen im Nahbereich der Injektionsbohrung reagiert, wurde das Verhalten einer Injektionsbohrung als erstes Anwendungsbeispiel konzeptionell untersucht. Für die Studie wurde ein hypothetischer Aquifer ausgewählt, der typische Eigenschaften von in Norddeutschland geothermisch genutzten Reservoiren aufweist.

Die Wässer in den Reservoiren des Norddeutschen Beckens sind zum größten Teil hochsalinär und bezüglich der Mineralgleichgewichte zu den Carbonaten und Sulfaten der Erdalkalien in Sättigung oder nahe dem thermodynamischen Lösungsgleichgewicht. Die Minerale Anhydrit (CaSO_4) und Baryt (BaSO_4) sind hinsichtlich ihrer potentiellen Lösung bzw. Fällung für den Reinjektionsprozess von Bedeutung. Durch die Reinjektion des abgekühlten Wassers kommt es zur Störung des Gleichgewichts zwischen dem Reservoirgestein und dem Formationswasser. Die Lösung und Fällung von Mineralen verändert die Permeabilität des Gesteins. Um die Permeabilitätsentwicklung im Reservoir vorhersagen zu können, braucht man ein detailliertes Verständnis der komplexen Wechselwirkungen zwischen der Strömung, der Wärmeausbreitung, dem Stofftransport und den chemischen Reaktionen. Es müssen Voraussagen für den vollen Betriebszeitraum einer GHZ getroffen werden, was einzig und allein durch numerische Simulationen möglich ist.

Die Modellrechnungen haben gezeigt, dass die Temperatur des verpressten Wassers einen bedeutenden Einfluss auf die hydraulischen und chemischen Prozesse im Umfeld einer Injektionsbohrung hat. Außerdem kommt es zur Überlagerung der physikalischen und chemischen Prozesse. Die Lösung von Anhydrit im Umfeld der Bohrung führt dort zu einer Permeabilitätserhöhung, welche die Permeabilitätsverringering im Bereich der Temperaturfront dominiert. Es kommt insgesamt zu einer Abschwächung der thermisch ausgelösten Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit des Aquifers. Im Gegensatz zum Anhydrit, das eine retrograde Löslichkeit zeigt, führt das prograde Löslichkeitsverhalten des Baryts zu einer Übersättigung im Wasser und zu einer Fällung im Bereich um die Bohrung. Aufgrund der geringen Mengen kommt es in diesem Fall aber zu keiner Veränderung der Permeabilität.

Zweites Anwendungsbeispiel ist der Standort Stralsund (Nord-Ost-Deutschland an der Ostsee). Aus geologischer Sicht repräsentiert dieser Standort den nördlichen Rand des Nordostdeutschen Beckens. Hier wurde mit 3 Bohrungen im Mittleren Buntsandstein der Detfurth-Sandstein als geothermisch nutzbarer Aquifer nachgewiesen.

Aus den vorhandenen geologischen, physikalischen und chemischen Daten wurde das numerische Modell aufgebaut, um das Langzeitverhalten des Reservoirs zu quantifizieren. Wie in der Fallstudie des Injektionsbrunnens hat sich auch hier gezeigt, dass die Entwicklung der hydraulischen Leitfähigkeit des Aquifers vor allem von der Injektionstemperatur abhängig ist. Die aufgrund der Temperaturerniedrigung in der Umgebung der Injektionsbohrung auftretende Lösung von Calcit und Anhydrit führt zu einer Erhöhung der Permeabilität, wodurch der Temperatureffekt abgeschwächt wird. Die Porenraumstruktur bestimmt die Größe der Permeabilitätsveränderung. Mit dieser Studie konnte gezeigt werden, dass die Lokation Stralsund auch über einen Zeitraum von 80 Jahren ohne permeabilitätsbedingte Reinjektions-schwierigkeiten betrieben werden kann.