



Originally published as:

Milch, H., Regenspurg, S. (2018): Geothermische Fluide als Energieträger und Rohstoffquelle – Herausforderungen und Chancen. - *bbr - Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau*, 11, pp. 64—69.

**Titel:**

Geothermische Fluide als Energieträger und Rohstoffquelle - Herausforderungen und Chancen

**Autorendaten:**

Harald Milsch und Simona Regenspurg

Helmholtz Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ  
Sektion 6.2 - Geothermische Energiesysteme

Telegrafenberg  
14473 Potsdam

Tel.: 0331-288-1527 (H. Milsch)  
0331-288-1437 (S. Regenspurg)

milsch@gfz-potsdam.de  
regens@gfz-potsdam.de

**Einleitungstext:**

Geothermische Fluide sind einerseits ein nahezu unerschöpflicher Energieträger, andererseits eine mögliche Quelle strategisch wichtiger Rohstoffe. Als komplex zusammengesetzte Stoffgemische stellen sie eine große Herausforderung für den sicheren und nachhaltigen Betrieb geothermischer Energieanlagen dar, bieten aber auch die Chance, durch gezielte technische Maßnahmen wertvolle Feststoffe und Gase zu extrahieren.

***Einleitungsbild***

**Die Arbeitsgruppe *Geothermische Fluide*** am Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) in Potsdam erarbeitet in nationalen und internationalen Projekten ein integriertes und standortspezifisches Verständnis des Fluidverhaltens entlang tiefeingeothermischer Kreisläufe, leitet daraus Empfehlungen zur Betriebsführung ab und bewertet das Rohstoffpotenzial geothermischer Fluide.

Die Sektion *Geothermische Energiesysteme* am GFZ betreibt am Standort Groß Schönebeck eine tiefeingeothermische Forschungsplattform. Die nachfolgend beispielhaft beschriebenen aktuellen Forschungsarbeiten der Arbeitsgruppe *Geothermische Fluide* basieren auf den an dieser Anlage im Verlauf der vergangenen Jahre gesammelten Forschungs-, Entwicklungs- und Betriebserfahrungen (Blöcher et al., 2016).

Dieser Beitrag gibt einen Gesamtüberblick über den Themenkomplex *Fluidchemie und Scaling, Fluid-Gesteins-Wechselwirkungen und Korrosion, Fluidphysik, Fluid-Monitoring* sowie *Geothermische Fluide als Rohstoffquelle* und zeigt in einem kurzen Ausblick abschließend den weiteren Forschungsbedarf auf.

## Fluidchemie und Scaling

Die chemische Zusammensetzung geothermischer Fluide variiert in Abhängigkeit der regionalen Geologie und der individuellen Fluidgenese. Während in Deutschland im Molassebecken die Tiefenwässer praktisch Trinkwasserqualität besitzen, sind diese im Oberrheingraben aber insbesondere im Norddeutschen Becken durchweg hochsalinär mit einem Gehalt an gelösten Feststoffen von bis zu 300 g/L. Neben den Hauptsalzen NaCl und CaCl<sub>2</sub> sind diese Fluide auch Träger einer Vielzahl unterschiedlichster Spezies in geringeren Konzentrationen. Während die Hauptsalze die thermophysikalischen Eigenschaften des Fluids bestimmen, führen insbesondere die Nebenbestandteile durch Feststoffausfällungen (Scaling) zu möglichen Betriebsrisiken. Letztere bestehen z.B. hinsichtlich Verengungen in Rohrleitungen und Wärmeübertragern sowie Abrieb in der Tiefenpumpe aber auch in den Anforderungen an die Entsorgung der Feststoffe nach Reinigungsmaßnahmen, insbesondere wenn diese radioaktive Isotope enthalten. Ausfällungen im Reservoirgestein selbst können besonders schwerwiegend sein, da sie die Produktivität oder Injektivität verringern und meist irreversibel sind.

Abb. 1 zeigt die Zusammensetzung des Fluids an der Forschungsplattform Groß Schönebeck für die Haupt- und Nebenbestandteile an gelösten Feststoffen (insgesamt 265 g/L). Darüber hinaus führt dieses Fluid mit einer gewissen Variabilität etwa 1 bis 2 Nm<sup>3</sup> an gelösten Gasen mit sich, hauptsächlich Stickstoff (N<sub>2</sub>, ca. 85 Vol%) und Methan (CH<sub>4</sub>, ca. 14 %), aber auch, in geringen Mengen, Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Helium (He) (Regenspurg et al., 2010).

### *Abb. 1*

Die Bildung von Scalingprodukten erfolgt, wenn sich der thermodynamische (Druck und Temperatur) und/oder physiko-chemische (z.B. pH-Wert) Zustand des Fluids während des Anlagenbetriebs verändert und einige der gelösten Nebenbestandteile übersättigen. Am Standort Groß Schönebeck betrifft dies in Wesentlichen die Minerale Baryt (BaSO<sub>4</sub>), Laurionit (PbOHCl), gediegen Kupfer (Cu) und Magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). Während Baryt bei einer Temperaturabnahme ausfällt, bildet sich Laurionit bei einer Erhöhung des pH-Werts. Kupfer und Magnetit hingegen entstehen als Resultat einer Redoxreaktion zwischen Fluid (enthält gelöstes Kupfer) und Casing (Eisen) beim Fluideintritt in die Bohrung (Regenspurg et al., 2017a). Da Kupfer, Laurionit und Magnetit eine vergleichsweise hohe Dichte haben, sedimentieren sie bevorzugt in der Bohrung ab, während Baryt mit dem Fluid über Tage transportiert wird. Dies erklärt Unterschiede in der jeweils angetroffenen Feststoffzusammensetzung in Bailer-Proben im Vergleich zu Filtrerrückständen (Abb. 2).

### *Abb. 2*

Der für Rotliegend-Fluide typische Gehalt an Schwermetallen, z.B. gelöstem Kupfer, kann, als Folge der o.g. Reaktion, auch auf den bohrlochnahen Reservoirbereich rückwirken und durch Kupferausfällungen im Porenraum des Gesteins zu einer signifikanten Permeabilitätsreduktion an der Produktionsbohrung führen. Diese Hypothese wird durch aktuelle Laboruntersuchungen gestützt (Regenspurg et al., 2017b).

Die Bildung von Scalingprodukten ist für einen verlässlichen Anlagenbetrieb nach Möglichkeit zu verhindern. Dies setzt einerseits eine genaue Kenntnis des Fluidchemismus und andererseits ein Verständnis der jeweils ablaufenden Prozesse voraus. Möglichkeiten der Einflussnahme bestehen sowohl während der Projektierung, als auch während des Betriebs der Anlage durch eine Kombination von Werkstoffauswahl (z.B. gegen Kupferausfällungen) und angepasster Betriebsführung (Druck- und Temperaturabsenkung). Geeignete Scalinginhibitoren können zusätzlich eingesetzt werden, um die selektive Ausfällung spezifischer Feststoffe zu

verhindern. Hierbei sind jedoch, neben Fragen der Wirksamkeit, auch ökonomische und ökologische Aspekte zu beachten.

In der Arbeitsgruppe *Geothermische Fluide* werden die chemische Zusammensetzung der Fluide, der Gase und der Scalingprodukte über die Zeit analysiert und daraus die zugrundeliegenden chemischen Prozesse (z.B. Regenspurg et al., 2014; 2015; 2016a) sowie die Herkunft der jeweiligen Bestandteile abgeleitet (Feldbusch et al., 2018; Regenspurg et al., 2016b).

### **Fluid-Gesteins-Wechselwirkungen und Korrosion**

Je nach geologischen Rahmenbedingungen und den damit verbundenen chemischen Fluideigenschaften wechselwirken geothermische Fluide mannigfaltig sowohl mit dem Reservoirgestein, als auch mit (metallischen) Anlagenkomponenten. Betriebsrisiken sind daher immer standortspezifisch zu bewerten, wobei neben einer chemischen Fluidanalytik und der Kenntnis der eingesetzten Werkstoffe auch eine präzise mineralogische Charakterisierung des Reservoirgesteins zwingend erforderlich ist.

Produktionsseitig sind dabei der Gasgehalt des Fluids sowie der Gehalt an Tonmineralen im Gestein und deren Art von besonderem Interesse. Hohe Gasgehalte im Fluid können bereits im Reservoir zu einer Gasentlösung führen und damit eine Zweiphasenströmung mit stark verminderter relativer Permeabilität bezüglich der flüssigen Phase induzieren (Abb. 3; Blöcher et al., 2016).

#### **Abb. 3**

Tonminerale besitzen, je nach Art, die Fähigkeit zu quellen, d.h. unter Wasseraufnahme ihr Volumen stark zu vergrößern, und, je nach Morphologie, die Möglichkeit als Feinpartikel hydrodynamisch mobilisiert zu werden (Abb. 4). Ersteres ist insbesondere bei Stimulationsmaßnahmen zu beachten, letzteres hat unmittelbar Auswirkungen auf die Betriebsführung.

#### **Abb. 4**

Injektionsseitig ist, neben der Vermeidung des Eintrags von Scalingprodukten aus der Anlage bei ungenügender Filterung, insbesondere das thermodynamische Gleichgewicht zwischen (abgekühltem) Fluid und (wärmerem) Gestein zu beachten. Je nach Temperaturdifferenz, Fluidchemismus und Gesteinszusammensetzung können Lösungs-Fällungs-Reaktionen induziert werden, die zu einer Materialumlagerung führen und damit die Gesteinspermeabilität ggf. negativ beeinflussen (Milsch et al., 2009; Schepers und Milsch, 2013a; b).

Zur Vermeidung oder Minimierung von Betriebsrisiken welche auf Korrosionsprozesse zurückzuführen sind, ist bereits bei der Projektierung der Anlage auf eine geeignete Werkstoffauswahl zu achten. Dies betrifft alle Anlagenteile, welche sich in direktem Kontakt mit dem Fluid befinden, z.B. Casing, Tiefenpumpe, Rohrleitungen, Schieber und Wärmeübertrager. Korrosionserscheinungen können dabei als gleichmäßige -, Loch-, Spalt- und Spannungsrissskorrosion auftreten und sind abhängig von der Salinität des Fluids (Konzentration gelöster Chlorid-Ionen) sowie dem Gehalt an Spezies, welche spezifische Fluid-Material-Reaktionen auslösen können (z.B. Kupfer). Die Materialauswahl muss daher immer fluidspezifisch erfolgen, wobei Kompromisse bezüglich Kosten, Materialverfügbarkeit und Festigkeitsanforderungen unvermeidbar sind. Hierbei bestehen Möglichkeiten der Werkstoffplattierung oder -beschichtung, des Einsatzes von Korrosionsinhibitoren sowie der

Komponentenauslegung (Wandstärken) die diesen Rahmenbedingungen Rechnung tragen, jedoch immer im Einzelfall hinsichtlich ihrer Eignung geprüft werden müssen. Die Frage, ob Scalingprodukte eine natürliche, korrosionsinhibierende Materialbeschichtung darstellen können ist Gegenstand aktueller Forschung.

## Fluidphysik

Die Kenntnis der thermophysikalischen Eigenschaften des Fluids an einem jeweiligen Standort ist für die gesamte Wertschöpfungskette geothermischer Technologie von herausragender Bedeutung. Beispiele sind die geophysikalische Exploration, die Prognose der hydraulischen Reservoireigenschaften sowie die Auslegung von Tiefenpumpen und der obertägigen Anlage selbst. Hierbei spielen die Parameter Dichte, Viskosität, Schallgeschwindigkeit, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit die zentrale Rolle. Zur Illustration werden in der nachfolgenden Tabelle 1 diese sechs Parameter für das Fluid am Standort Groß Schönebeck bei Referenzbedingungen (298,15 K und 0,1 MPa) aufgelistet und als prozentuale Abweichung mit den jeweiligen Werten von reinem Wasser verglichen.

Tabelle 1: Thermophysikalische Eigenschaften des Fluids am Standort Groß Schönebeck bei 298,15 K und 0,1 MPa verglichen mit reinem Wasser.

Parameter	Wert	Abweichung zu reinem Wasser (VE)
Viskosität	1,74 mPa s	+ 94 %
Dichte	1,187 g/cm <sup>3</sup>	+ 19 %
Schallgeschwindigkeit	1.715 m/s	+ 14 %
Elektrische Leitfähigkeit	217 mS/cm	(x 10.000)
Wärmeleitfähigkeit	0,56 W/(m K)	- 10 %
Wärmekapazität	3,19 kJ/(kg K)	- 24 %

Die frei zugängliche Datenbasis wird umso schlechter, je extremer die Druck und Temperaturbedingungen, je höher die Salinität und je komplexer die Zusammensetzung des Fluids sind (Milsch et al., 2015a). Die Zugrundelegung eines binären Fluids (z.B. NaCl + Wasser) reicht für eine sinnvolle Parametrisierung geothermischer Fluide oftmals nicht aus, da die zusätzliche Präsenz zweiwertiger Ionen (insbesondere CaCl<sub>2</sub>) einen wesentlichen Effekt, z.B. auf die Viskosität, hat.

In Ergänzung der gesteinsphysikalischen Expertise wurde am GFZ ein Labor zur Bestimmung thermophysikalischer Fluideigenschaften eingerichtet (Hoffert und Milsch, 2015). Seit Ende 2012 wurden in umfangreichen Messreihen über 2.500 neue Datenpunkte für die o.g. Parameter und binäre sowie ternäre NaCl-CaCl<sub>2</sub>-(MgCl<sub>2</sub>) Fluide als Funktion der Temperatur generiert. Gegenwärtig werden die Messungen zu höheren Temperaturen und Drücken erweitert. Hierbei kommen auch eigene technologische Entwicklungen zum Einsatz, z.B. ein Hochdruck-Hochtemperatur-Viskosimeter (Hoffert und Milsch, 2018), welches zukünftig auch die Messung der elektrischen Fluidleitfähigkeit sowie der Schallgeschwindigkeit ermöglichen wird.

## Fluid-Monitoring

Das obertägige Monitoring physiko-chemischer Fluidparameter (z.B. pH-Wert, Eh-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Dichte) während des Betriebs einer tiefegeothermischen Anlage liefert zusätzliche und wichtige Betriebsparameter, welche möglicherweise zeitlich veränderliche Fluideigenschaften anzeigen und damit zu einer optimierten Betriebsführung beitragen. Für die Forschungsplattform Groß Schönebeck wurde ein solches System (*FluMo-1*) entwickelt (Milsch et al., 2013) und erfolgreich eingesetzt (Feldbusch et al., 2013). Das System (Abb. 5) ist mobil und ermöglicht damit auch den Einsatz an anderen Geothermieanlagen. Konzeptionell kann Fluid an bis zu sechs Punkten entlang des Hauptstrangs der Anlage (z.B. vor und nach dem Gasabscheider, den Filtern und dem Wärmeübertrager) abgegriffen, unter Anlagenbedingungen parametrisiert und schließlich in den Hauptstrang zurückgepumpt werden. Ebenfalls unter Anlagenbedingungen ist die Fluidprobenahme für eine spätere chemische Analytik des Fluids möglich.

### Abb. 5

Am GFZ wurde darüber hinaus ein zweites, ebenfalls mobiles Monitoring-System (*FluMo-2*) aufgebaut (Milsch et al., 2015b), mit der Möglichkeit, weitere Fluideigenschaften (z.B. Schallgeschwindigkeit und Trübe) an Anlagen zu parametrisieren, aber auch, im Technikumsmaßstab als Durchflussapparatur, aktiv Korrosions- und Scalinguntersuchungen durchzuführen (Abb. 6). In einem aktuellen Forschungsprojekt werden mit diesem Gerät beispielsweise unterschiedliche Technologien zur Filterung von Schwermetallen aus dem Fluid untersucht.

### Abb. 6

## Geothermische Fluide als Rohstoffquelle

Tiefegeothermische Projekte werden bislang fast ausschließlich unter dem Aspekt einer energetischen Nutzung des Fluids durchgeführt. Je nach Standort sind die gefördert Fluiden aber auch Träger einer Vielzahl wichtiger Rohstoffe und können damit einen möglicherweise erheblichen Beitrag zu ihrer zukünftigen Verfügbarkeit leisten. In vulkanischen Geothermieregionen mit hoher Fluidenthalpie (z.B. Indonesien, Neuseeland) betrifft dies insbesondere Silizium. In Rotliegend-Sedimenten (z.B. im Norddeutschen Becken) treten beispielsweise Lithium und Kupfer als Festphasen sowie Methan und Helium als Gase auf.

Am Standort Groß Schönebeck könnten bei Zugrundlegung der aktuell bekannten Fluidzusammensetzung (ca. 200 mg/L Lithium, ca. 10 mg/L Kupfer, 225 NL/m<sup>3</sup> Methan und 20 NL/m<sup>3</sup> Helium) und einer angenommenen Förderrate von 50 m<sup>3</sup>/h bis zu 80 t Lithium, 4 t Kupfer, 100.000 Nm<sup>3</sup> Methan und 9.000 Nm<sup>3</sup> Helium pro Jahr koproduziert werden.

Das (ökonomische) Potential der stofflichen Nutzung eines geothermischen Fluids muss selbstverständlich individuell und standortspezifisch bewertet werden. Auch bedarf es geeigneter und energieeffizienter Abscheidungstechnologien, welche für den jeweiligen Anlagenstandort adaptiert oder ggf. neu entwickelt werden müssen.

## Zusammenfassung und Ausblick

Ausschlaggebend für einen nachhaltigen Erfolg aktueller und zukünftiger tiefegeothermischer Projekte in hochsalinaren Reservoiren, z.B. dem Norddeutschen Becken, und damit einer

stärkeren Marktdurchdringung dieser Technologie, ist der technisch-operativ richtige Umgang mit dem zu nutzenden Fluid. Dies setzt eine genaue Kenntnis oder zumindest Prognose des an einem Standort anzutreffenden Fluidchemismus und der damit während der Erschließung des Reservoirs und dem Betrieb der Anlage zu erwartenden Prozesse voraus. Hieraus leiten sich direkt Empfehlungen zur Erschließung, Anlagenauslegung und Betriebsführung ab.

In der Vergangenheit und durch öffentliche Projektförderung konnten zu diesem Themenkomplex eine Vielzahl neuer und signifikanter Erkenntnisse gewonnen werden. Aktueller Forschungsbedarf besteht, u.a., bei der Entwicklung einer verbesserten thermodynamischen Datenbasis für reaktive Modellierungen hochsalinärer Tiefenwässer, dem Prozessverständnis von Zweiphasenströmungen und Feinpartikeltransport im Reservoir, der thermophysikalischen Parametrisierung von Fluiden mit komplexer Zusammensetzung bei hohen Drücken und Temperaturen sowie der standortspezifischen Entwicklung geeigneter Strategien zur Vermeidung von Feststoffausfällungen (Werkstoffe, Inhibitoren, Betriebsregime, usw.). Eine stoffliche Nutzung geothermischer Fluide sollte zukünftig verstärkt in Betracht gezogen werden und Gegenstand ökonomischen Bewertungen und technologischer Methodenentwicklung sein.

## **Danksagung**

Unser Dank gilt dem BMU, dem BMWi und der EU für die langjährige finanzielle Unterstützung unserer Arbeiten sowie unseren Partnern aus Forschung und Industrie für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Eine vollständige Dokumentation abgeschlossener und aktueller Projekte findet sich auf der Internetpräsenz der Sektion 6.2 - Geothermische Energiesysteme unter:

<https://www.gfz-potsdam.de/sektion/geothermische-energiesysteme/projekte/>

## **Literatur**

Blöcher, G., Reinsch, T., Henniges, J., Milsch, H., Regenspurg, S., Kummerow, J., Francke, H., Kranz, S., Saadat, A., Zimmermann, G., Huenges, E. (2016): Hydraulic history and current state of the deep geothermal reservoir Groß Schönebeck. *Geothermics*, 63, pp. 27-43. DOI: 10.1016/j.geothermics.2015.07.008

Feldbusch, E., Regenspurg, S., Banks, J., Milsch, H., Saadat, A. (2013): Alteration of fluid properties during the initial operation of a geothermal plant: results from in situ measurements in Groß Schönebeck. *Environmental Earth Sciences*, 70, 8, pp. 3447-3458. DOI: 10.1007/s12665-013-2409-9

Feldbusch, E., Wiersberg, T., Zimmer, M., Regenspurg, S. (2018): Origin of gases from the geothermal reservoir Groß Schönebeck (North German Basin). *Geothermics*, 71, pp. 357-368. DOI: 10.1016/j.geothermics.2017.09.007

Hoffert, U., Milsch, H. (2015): Experimental Investigations on the Thermophysical Properties of Synthetic Geothermal Fluids, (Proceedings), World Geothermal Congress 2015 (Melbourne, Australia 2015), Paper 16030.

Hoffert, U., Milsch, H. (2018): A modified flow-through apparatus for high pressure viscosity measurements of salt solutions, (Proceedings), 17th International Conference on the Properties of Water and Steam (Prag 2018).

Milsch, H., Seibt, A., Spangenberg, E. (2009): Long-term petrophysical investigations on geothermal reservoir rocks at simulated in situ conditions. *Transport in Porous Media*, 77, 1, pp. 59-78. DOI: 10.1007/s11242-008-9261-5

Milsch, H., Giese, R., Poser, M., Kranz, S., Feldbusch, E., Regenspurg, S. (2013): Technical paper: FluMo - a mobile fluid - chemical monitoring unit for geothermal plants. *Environmental Earth Sciences*, 70, 8, pp. 3459-3463. DOI: 10.1007/s12665-013-2408-x

Milsch, H., Hoffert, U., Hofmann, H. (2015a): Data Gaps in Thermophysical Fluid Data for Geothermal Applications, (Proceedings), World Geothermal Congress 2015 (Melbourne, Australia 2015), Paper 16028.

Milsch, H., Giese, R., Poser, M., Regenspurg, S., Kranz, S. (2015b): Integrated Fluid-chemical Monitoring Systems for Geothermal Applications, (Proceedings), World Geothermal Congress 2015 (Melbourne, Australia 2015), Paper 14067.

Regenspurg, S., Wiersberg, T., Brandt, W., Huenges, E., Saadat, A., Schmidt, K., Zimmermann, G. (2010): Geochemical properties of saline geothermal fluids from the in-situ geothermal laboratory Groß Schönebeck (Germany). *Chemie der Erde - Geochemistry*, 70, pp. 3-12. DOI: 10.1016/j.chemer.2010.05.002

Regenspurg, S., Dilling, J., Mielcarek, J., Korte, F., Schkade, U. (2014): Naturally occurring radionuclides and their geochemical interactions at a geothermal site in the North German Basin. *Environmental Earth Sciences*, 72, 10, pp. 4131-4140. DOI: 10.1007/s12665-014-3306-6

Regenspurg, S., Feldbusch, E., Byrne, J., Deon, F., Driba, D. L., Henniges, J., Kappler, A., Naumann, R., Reinsch, T., Schubert, C. (2015): Mineral precipitation during production of geothermal fluid from a Permian Rotliegend reservoir. *Geothermics*, 54, pp. 122-135. DOI: 10.1016/j.geothermics.2015.01.003

Regenspurg, S., Feldbusch, E., Norden, B., Tichomirowa, M. (2016a): Fluid-rock interactions in a geothermal Rotliegend/Permo-Carboniferous reservoir (North German Basin). *Applied Geochemistry*, 69, pp. 12-27. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2016.03.010

Regenspurg, S., Driba, D. L., Zorn, C. (2016b): Formation and significance of laurionite in geothermal brine. *Environmental Earth Sciences*, 75, 865. DOI: 10.1007/s12665-016-5668-4

Regenspurg, S., Geigenmüller, I., Milsch, H., Kühn, M. (2017a): Copper precipitation as consequence of steel corrosion in a flow-through experiment mimicking a geothermal production well. *Geothermal Energy*, 5, 11. DOI: <http://doi.org/10.1186/s40517-017-0069-9>

Regenspurg, S., Geigenmüller, I., Rybacki, E., Milsch, H. (2017b): Redox Reactions During Sandstone Flow-through Experiments at Geothermal Conditions. *Procedia earth and planetary science*, 17, pp. 53-56. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.026>

Schepers, A., Milsch, H. (2013a): Dissolution-precipitation reactions in hydrothermal experiments with quartz-feldspar aggregates. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165, 1, pp. 83-101. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00410-012-0793-x>

Schepers, A., Milsch, H. (2013b): Relationships between fluid-rock interactions and the electrical conductivity of sandstones. *Journal of Geophysical Research*, 118, 7, pp. 3304-3317. DOI: <http://doi.org/10.1002/jgrb.50241>

**Einleitungsbild:**



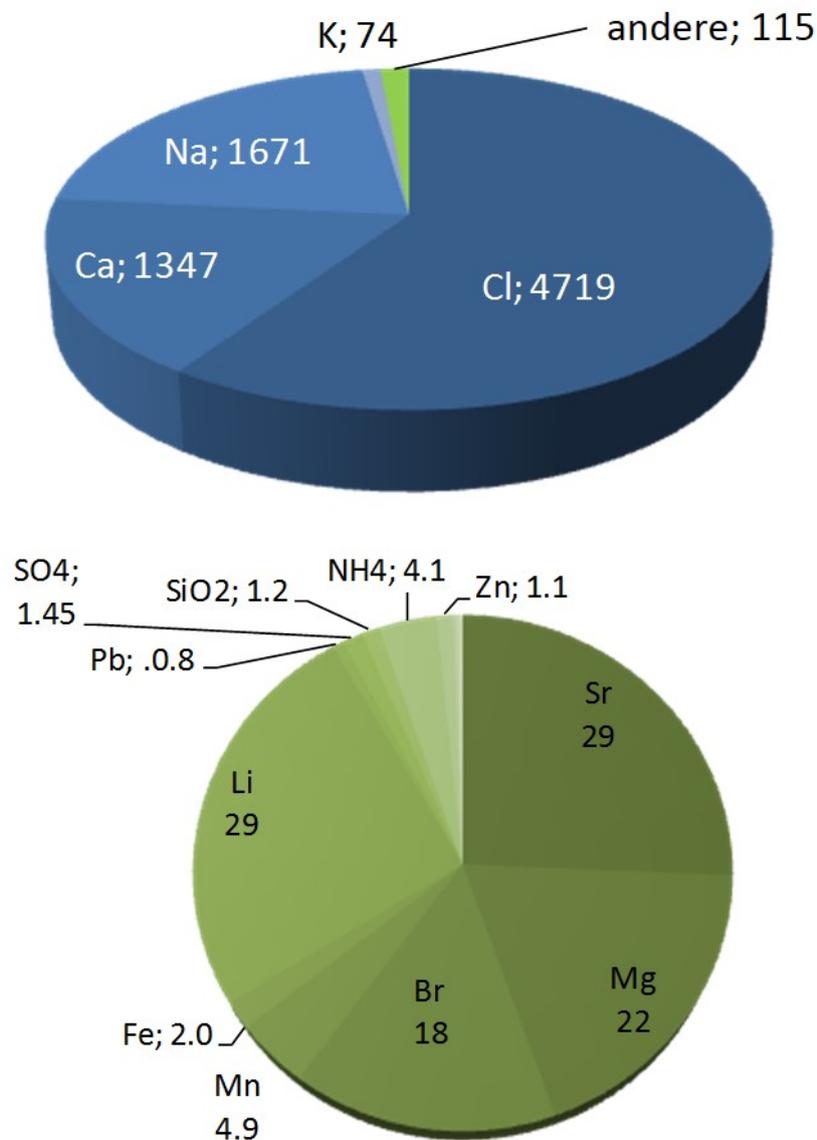
**Bildunterschrift:**

Feststoffausfällungen mit hohem Kupferanteil aus der Geothermiebohrung Groß Schönebeck Gt GrSk 4/05.

**Bildquelle:**

GFZ-Potsdam, Simona Regenspurg

**Abb. 1:**



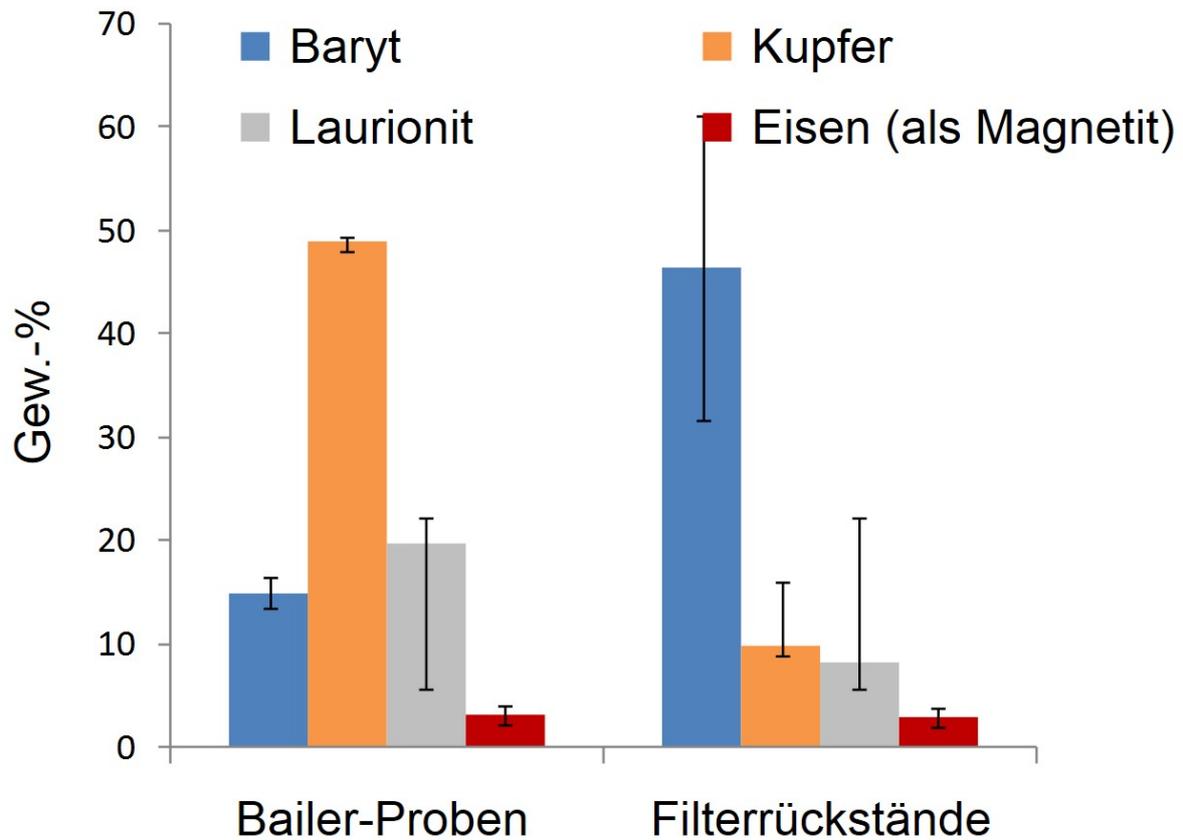
**Bildunterschrift:**

Chemische Zusammensetzung des Fluids an der Forschungsplattform Groß Schönebeck. Hauptsalze (oben) und Nebenbestandteile (unten; ohne Kupfer). Angaben in mM/L.

**Bildquelle:**

GFZ-Potsdam, Simona Regenspurg

Abb. 2:



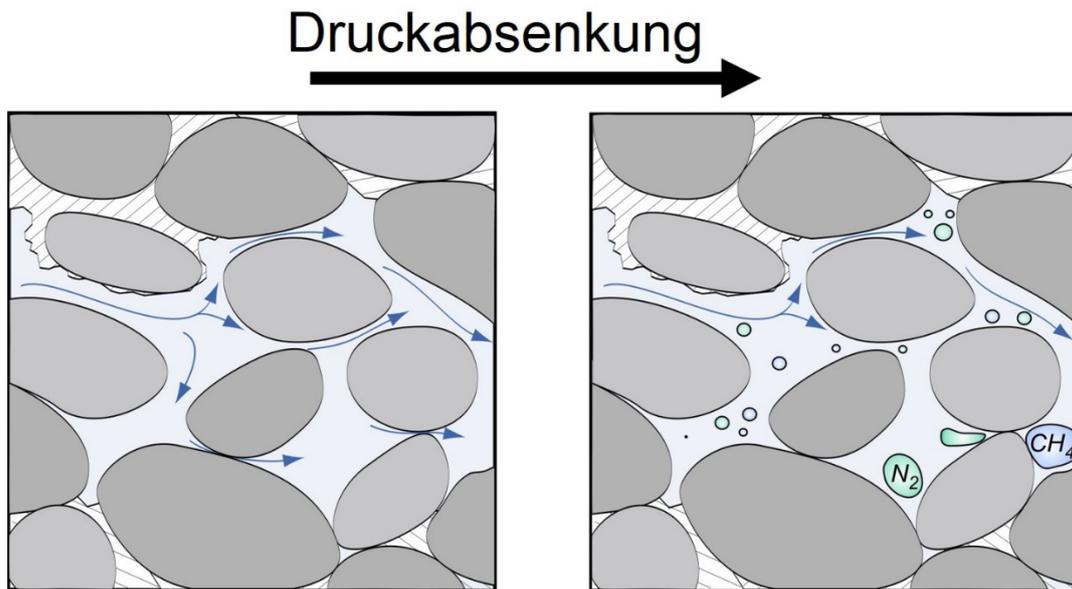
**Bildunterschrift:**

Massenanteile von Feststoffausfällungen an der Forschungsplattform Groß Schönebeck. Bailer-Proben aus der Produktionsbohrung Gt GrSk 4/05 (links) im Vergleich zu obertägigen Filterrückständen (rechts).

**Bildquelle:**

GFZ-Potsdam, Simona Regenspurg

Abb. 3:



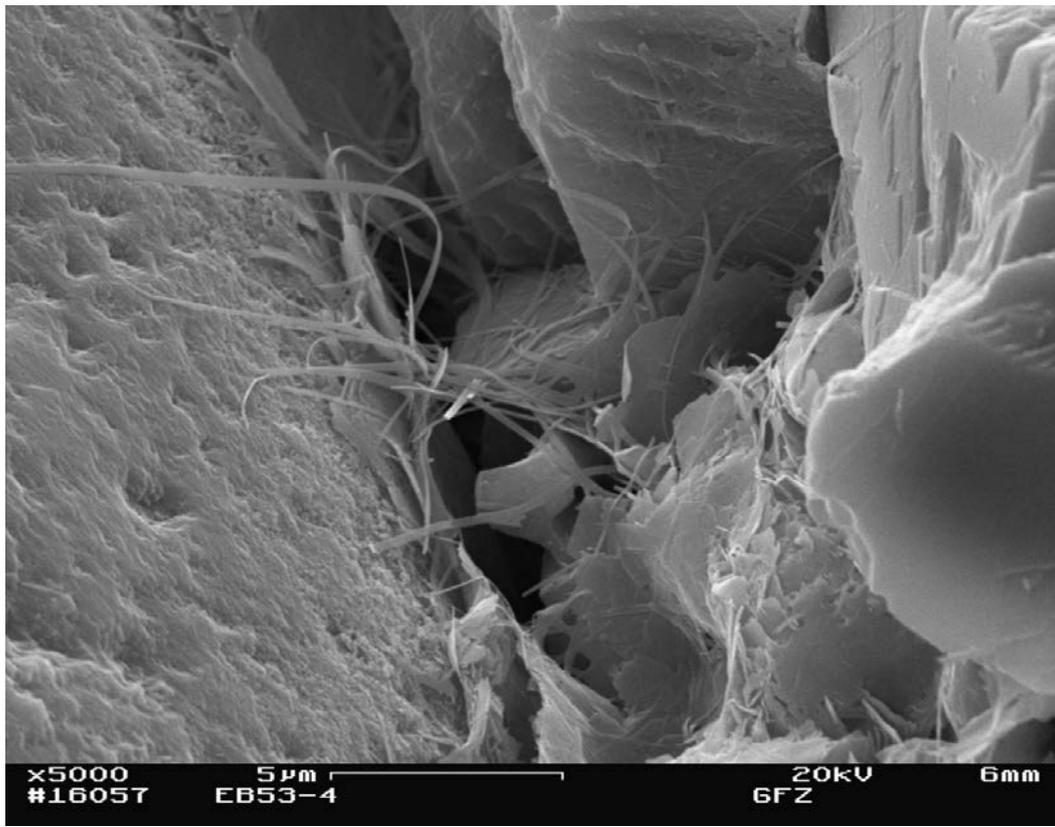
**Bildunterschrift:**

Schematische Darstellung der Wirkung einer Gasentlösung von Stickstoff und Methan im fluidgesättigten Gesteinsporenraum auf die hydraulisch wirksamen Fließwege.

**Bildquelle:**

GFZ-Potsdam, Harald Milsch

**Abb. 4:**



**Bildunterschrift:**

Elektronenmikroskopische Aufnahme des Porenraums einer Rotliegend-Sandsteinprobe mit potentiell mobilisierbaren Illit-Fasern.

**Bildquelle:**

GFZ-Potsdam, Harald Milsch

**Abb. 5:**



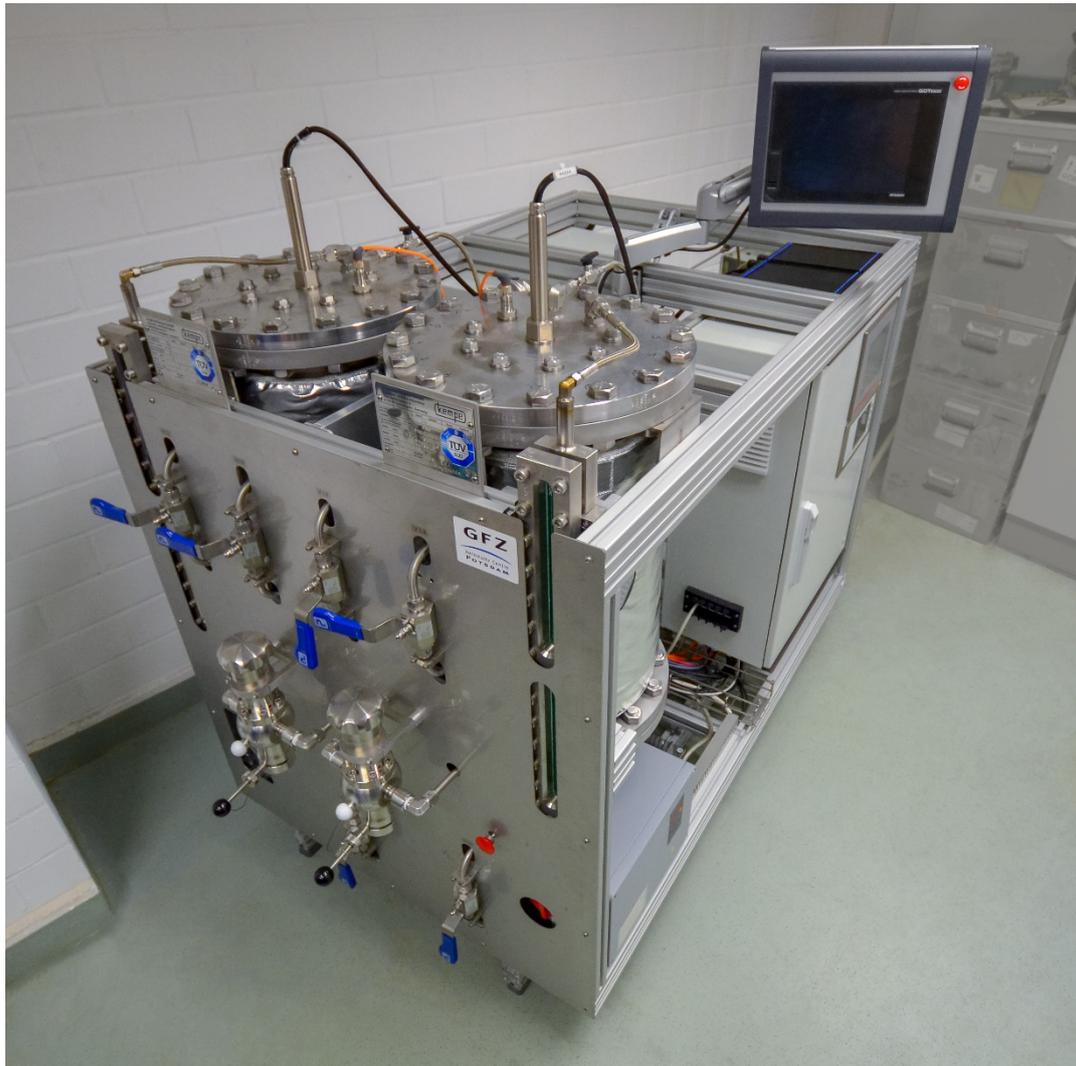
**Bildunterschrift:**

Das mobile Fluid-Monitoring-System *FluMo-1* an der Forschungsplattform Groß Schönebeck.

**Bildquelle:**

GFZ-Potsdam, Elvira Feldbusch

**Abb. 6:**



**Bildunterschrift:**

Das mobile Fluid-Monitoring-System *FluMo-2* am GFZ-Potsdam.

**Bildquelle:**

GFZ-Potsdam, Ronny Giese