

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

**Machbarkeitsstudie zum Einsatz von Eisenkolloiden zur
Sanierung von CKW-Kontaminationen
Teil 2**

G. Butschek, R. Köster
Forschungszentrum Karlsruhe, ITC-WGT

Förderkennzeichen: BWR 25002

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit
Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Januar 2007

Abstract

Der Einsatz von Eisenkolloiden zur Reinigung von Grundwässern, die mit reduktions-sensiblen Kontaminanten verunreinigt sind, ist ein neues, innovatives Sanierungskonzept. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der definierten Synthese und Charakterisierung von Fe(0)-Kolloiden mit kolloidchemischen Methoden. Ausgewählte Kolloide wurden oberflächenmodifiziert; hergestellt wurden Partikel mit einem anorganischen SiO₂-Coating sowie Partikel mit einem organischen Coating in Form eines Tensids. Auch von diesen Partikeln wurde die Reaktionskinetik bezüglich der Zielkontaminanten Tri- und Tetrachlorethen (TCE) quantifiziert und wesentliche Partikeleigenschaften mit kolloidchemischen Methoden charakterisiert. Abbaukinetiken ließen sich mit Reaktionen 1. Ordnung beschreiben sowie erste Informationen zu Reaktionsfolgen gewinnen. Zur Beschreibung des Transportverhaltens wurde ein Mikrosäulen-Aufbau errichtet und in Betrieb genommen. Die Eindringtiefe der Partikel in den ersten Versuchen war sehr gering. Daher stehen quantitative Transport- und Depositionsexperimente noch aus. Basierend auf den Ergebnissen wurde eine erste Wirtschaftlichkeitsbetrachtung am Beispiel von TCE durchgeführt. Nach deren Ergebnis erscheint eine Verwendung von kommerziell erhältlichen Fe(0)- bzw. weiterentwickelten Materialien bei weiterführenden Versuchen sinnvoll, jedoch müssen eine adaptierte kolloidchemische Vorkonditionierung (zur Steuerung von Stabilität, Reaktivität, Mobilitätsverhalten) vor Ort und ggf. eine kolloidchemische Adaption (Oberflächenmodifizierung) an die Bodenmatrix entwickelt werden.

The use of zerovalent nano iron as a reduction agent for the remediation of contaminated aquifers is a new and innovative concept. This paper focuses on the defined synthesis and characterization of Fe(0) with colloid chemical methods.

Selected colloids have been surface modified. Both particles with an inorganic SiO₂ coating as well as particles with organic coatings using a surfactant were produced.

The reaction kinetics of different kinds of particles with TCE and PCE were measured as well as particle characteristics. The reduction kinetics was attributed to a first order reaction, consecutive reactions were studied. To follow the transport behaviour a set up of micro columns was installed and tested. The migration pathway was very limited in preliminary experiments, thus extended experiments are required. Based on TCE a first approach was done to assess the economical aspects taking into account the material costs only. In conclusion it seems to be reasonable to rely on commercial zerovalent nano iron or well developed materials, which have to be reconditioned at the site before use with respect to stability, reactivity, mobility. This may also include a suitable surface adaption on the particles taking into account different soil matrices.

1. Einleitung

CKW-Altlasten stellen, sowohl was die Zahl der Fälle wie auch die Schwere der Auswirkungen angeht, nach wie vor die größten Probleme für die Schutzgüter Mensch, Grundwasser und Boden dar. In Baden-Württemberg sind CKW für ca. ein Drittel aller Altlasten als beurteilungsrelevante Substanzen verantwortlich [LfU Baden Württemberg (1998)]. Da diese Stoffe wegen ihrer hohen Dichte als Phase in den Grundwasserkörper eindringen können, sind derartige Altlasten häufig nur mit größtem Aufwand zu sanieren. Bei vielen dieser Standorte ist eine Herd-Sanierung gescheitert oder von vorne herein als unmöglich erkannt worden, da sich die exakte Lage des Phasenkörpers den Bemühungen einer Erkundung oder wegen der großen Tiefe klassischen Sanierungsverfahren entzogen haben.

Die heute oft einzige Möglichkeit, derartige Fälle anzugehen, liegt in pump-and-treat-Maßnahmen (P&T-Maßnahmen). Dabei wird Grundwasser aus dem Abstrom einer Schadstoffquelle über Sanierungsbrunnen abgepumpt, mittels Aktivkohlefiltern oder über Strippverfahren gereinigt und schließlich einem Vorfluter zugeführt oder auch wieder reinfiltriert. Nachteil dieser Vorgehensweise ist es, dass diese Sanierungsverfahren auf unbestimmte Zeit (dies können viele Jahrzehnte sein bis die Emission natürlicherweise auf ein akzeptables Niveau zurückgeht) betrieben werden müssen. Dies ist natürlich auf die gesamte Sanierungszeit gerechnet mit extrem hohen Kosten verbunden.

Ein Ansatz, bei derartigen Fällen die Kosten erheblich zu reduzieren, könnte die Einbringung von Eisenkolloiden in den Fahnenkörper sein. Elementares Eisen reagiert mit CKW-Verbindungen zu Eisen(II), Chlorid und Alkanen oder Alkenen. Diese Reaktionen sind gut untersucht und unter bestimmten Bedingungen sehr effektiv [Dahmke (1997)]. Mit dieser Alternative zu pump-and-treat-Maßnahmen könnten die Kosten für Fahnen-sanierungen erheblich gesenkt werden, wenn es gelingt, die Kolloide im Untergrund ausreichend gleichmäßig über den Querschnitt der Fahne zu verteilen. Dazu müsste in regelmäßigen Abständen die Einbringung wiederholt werden.

2. Ziel: Entwicklung und Optimierung neuartiger Fe-Kolloide

Kolloidale Suspensionen von Eisenpartikeln können durch die Reduktion von Eisensalzen mit Natriumborhydrid hergestellt werden [Zhang 2003]. Es entsteht elementares Eisen, Borsäure und Wasserstoff. Das Ergebnis ist eine Partikelsuspension mit einer breiten Partikelgrößenverteilung im Submikrometerbereich, die aufgrund des hohen Salzgehaltes nicht stabil ist. Durch die katalytische Zersetzung des NaBH_4 während der Synthese an den Eisenpartikeln entsteht Wasserstoff, was einen großen Überschuss von NaBH_4 erforderlich macht. Die Gasentwicklung destabilisiert die Suspension zusätzlich aufgrund eines Flotationseffektes. Das agglomerierte Eisen ist nur bedingt in der Lage, in einen Aquifer einzudringen.

Um die Migrationsfähigkeit des Eisens im Aquifer zu erhöhen, ist es notwendig, eine kolloidale Suspension herzustellen. Der erste Ansatz dazu ist eine elektrostatische Stabilisierung durch eine Erhöhung der Oberflächenladung der Partikel durch ein anorganisches Coating. Dadurch kann eine Agglomeration der Partikel während der Synthese vermieden werden.

In einem zweiten Schritt bzw. alternativ könnte auf den Primärpartikeln ein Coating mit bioabbaubaren Tensiden oder Polymeren erfolgen. Dies optimiert die Partikeleigenschaften in mehrerer Hinsicht:

Zum einen wird die Stabilisierung durch eine sterische Komponente ergänzt. Die Abscheidung der Partikel an geladenen Oberflächen im Aquifer wird dadurch erschwert. Zusätzlich zur elektrostatischen Stabilisierung kann eine sterische Komponente die Stabilität der Partikelsuspension besonders bei höheren Salzkonzentrationen verbessern. Wird zum Coating eine Verbindung mit hydrophoben Zonen verwendet, könnte die chemische Stabilität des Eisens im Wasser und damit die Selektivität der Reduktion erhöht werden. Ein hydrophobes Coating bewirkt zudem eine erhöhte Adsorption der CKW an der Partikeloberfläche, die dar-

aus resultierende lokale Konzentrationserhöhung bewirkt eine Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit [Alessi 2001]. Auf die Verwendung von Palladium zur Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit wird verzichtet, da das Einbringen von Palladium (neben den Kosten) in den Boden umweltpolitisch bedenklich ist [Kopinke 2004].

3. Ergebnisse

3.1 Stabilität und Reaktivität der Kolloide

Zur Synthese von Eisenkolloiden wird im Allgemeinen eine Reduktion von Eisensalzen wie FeCl_3 , FeCl_2 oder FeSO_4 durch Natriumborhydrid angewandt. Es entsteht eine Eisensuspension mit breiter Partikelgrößenverteilung, die aufgrund der geringen Oberflächenladung der Partikel und der hohen Ionenstärke in der Suspension nicht stabil ist. Da anwesender Sauerstoff das Eisen oxidiert, muss die Reduktion unter Schutzatmosphäre, zum Beispiel in einer Glove-Box, durchgeführt werden.

Um die notwendige Menge an kolloidalem Eisen für Reaktions- und Migrationsversuche zu gewinnen, wurde am ITC-WGT eine Syntheseapparatur in Betrieb genommen, die es erlaubt, die Kolloide unter definierten, reproduzierbaren Bedingungen, wie zum Beispiel Sauerstoffausschluss, herzustellen.

Durch eine Zugabe eines speziellen Tensids bei der Synthese in der wässrigen Phase wurde die Morphologie der Partikel gezielt beeinflusst. In Abbildung 1 sind die unterschiedlichen Partikelformen dargestellt. Ohne Verwendung von Tensiden entsteht ein Geflecht aus zusammengewachsenen Primärpartikeln, die Größe des Aggregates beträgt einige Mikrometer. Der Tensidzusatz führt zur Bildung von separaten Partikeln in der Größenordnung von 100 nm, was durch ESEM-Aufnahmen (environmental scanning electron microscope) ermittelt wurde.

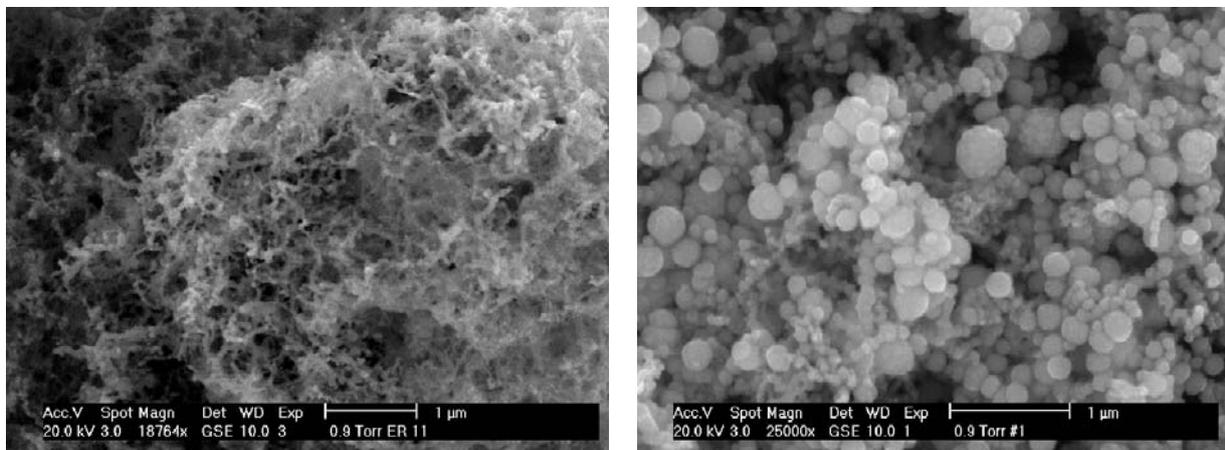


Abb. 1: Auswirkung von Tensiden auf die Partikelmorphologie

Die mit Tensidzusatz hergestellten Partikel zeigen in Modellversuchen ein besseres Migrationsverhalten als die Partikel, deren Synthese ohne Tensidzusatz erfolgte.

Problematisch ist weiterhin die Stabilität der Suspension. In einem auf die Synthese folgenden Reinigungsschritt werden die Begleitsalze der Reduktion entfernt. Dabei desorbiert auch ein großer Teil der Tenside, so dass eine sterische Stabilisierung der Suspension verringert wird. In sauerstoffhaltigem Wasser sind die Partikel nicht stabil, sie werden schnell oxidiert. Eine Passivierung der Partikel durch eine Eisenoxidschicht erhöht zwar die Stabilität gegenüber Sauerstoff, senkt aber die Reduktionskapazität der Partikel.

3.2 Entwickelte Syntheseanlage

Die Syntheseanlage besteht aus einem temperierten 3L-Planschiffgefäß mit einem dreiflügeligen Propellerrührer. Um die Oxidation der Eisenkolloide zu verhindern, wird der Reaktor mit Argon gespült. Die Edukte werden über Schlauchpumpen oder Schwerkraft in den Reaktor eingebracht. Zum Zerstören von Agglomeraten werden die Kolloide aus dem Reaktor durch eine Durchfluss-Ultraschallzelle gepumpt und wieder zurückgeführt. Zur Reinigung der Kolloide kann ein Dialyse- oder Ultrafiltrationsmodul in die Schlaufe geschaltet werden. Im Reaktor können Temperatur, pH-Wert, Leitfähigkeit und der Sauerstoffgehalt gemessen werden, offline zusätzlich die Eisenkonzentration im Reaktor. Versuchsparameter sind die Reaktionsführung, Reaktionstemperatur, die Rührerdrehzahl, Ultraschalleinsatz, Eduktkonzentration und die Verwendung von Tensiden. Letztere beschränkt die Ansatzgröße aufgrund der Schaumbildung im Reaktor auf 2L.

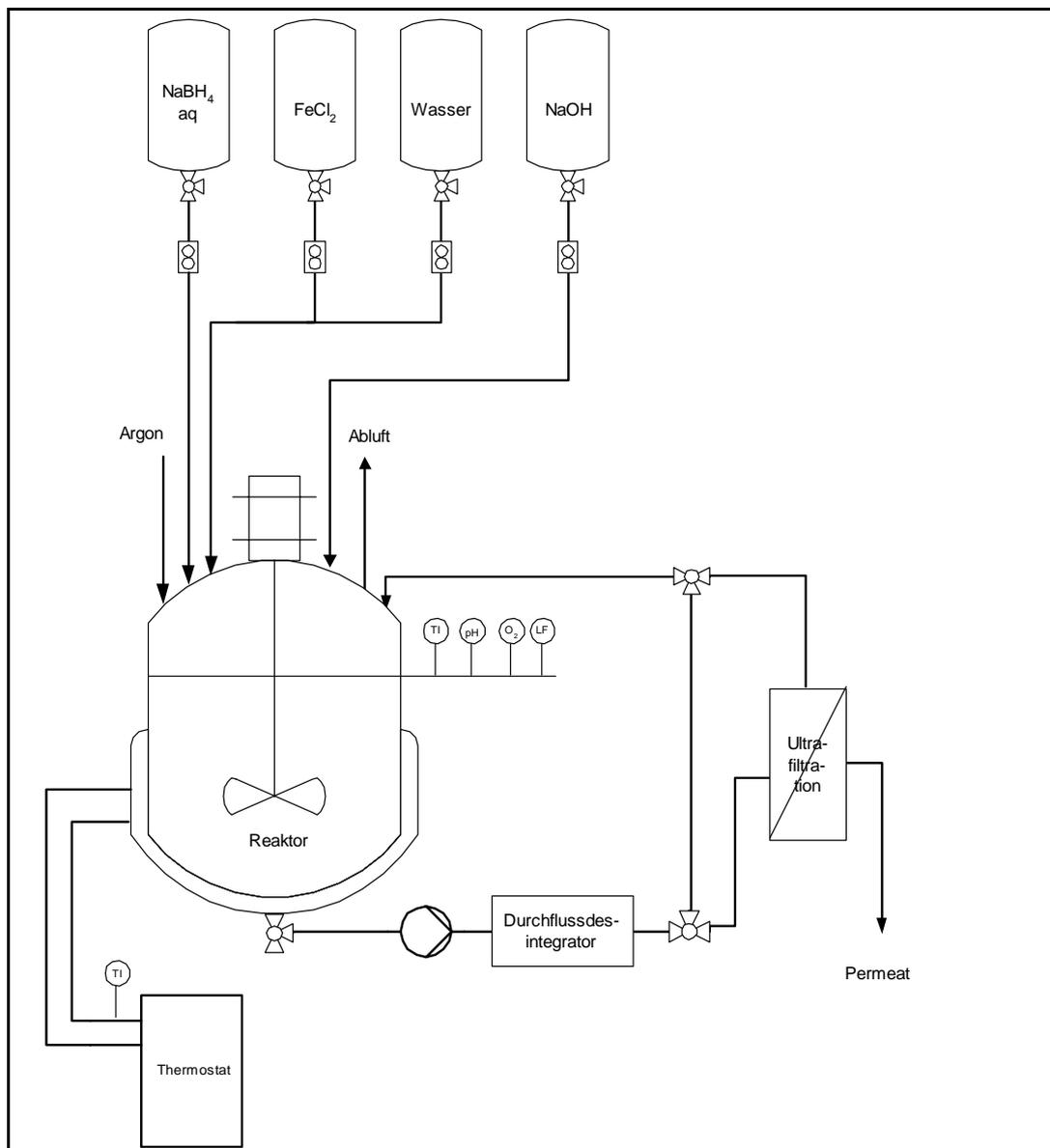
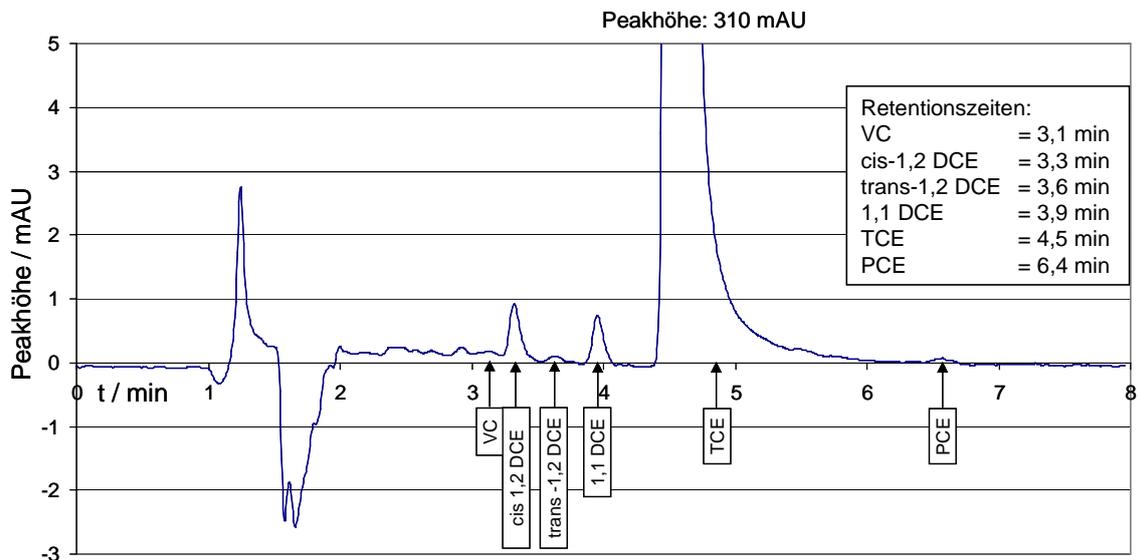


Abb. 2: Anlagenschema für die Kolloidsynthese

3.3 Nachweis der CKW

Zur Analytik der chlorierten Ethene wurde eine HPLC-Methode benutzt und jegliche Gasphasenanteile bei der Probenahme und -vorbereitung vermieden, um Verluste durch die Flüchtigkeit der Chlorkohlenwasserstoffe zu reduzieren. Als Eluent wurde eine Acetonitril (ACN)-Wasser-Mischung mit 70% ACN verwendet. Der Volumenstrom beträgt 1mL/min. Bei dieser Methode werden die Isomere des Dichlorethens bei kurzer Gesamtelutionszeit aufgetrennt, siehe Abb. 3.



Eluent: ACN/H₂O 70/30 $\dot{V} = 1\text{ ml/min}$

Abb. 3: Kalibrierung der HPLC Methode zur Erfassung der CKW.

Die Methode wurde mit Standards der Einzelkomponenten kalibriert, siehe Abb. 4.

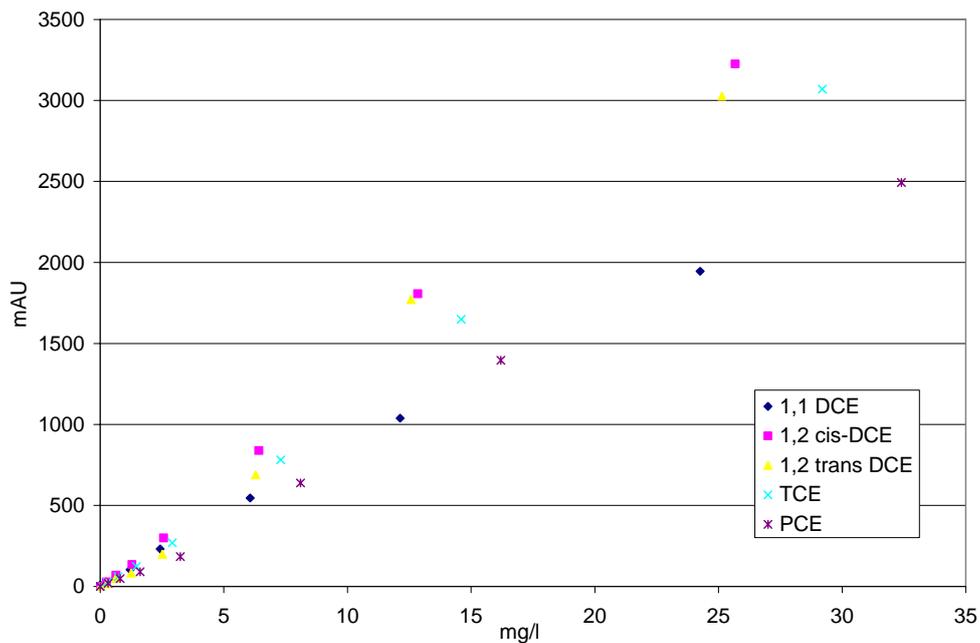


Abb. 4: 8 Punkt Kalibrierung im Konzentrationsbereich von 0,25-30 mg/L.

3.4 Chlorbilanz der Reduktion

Die Qualität der Versuche wurde durch das Aufstellen einer Chlorbilanz überprüft. In die Bilanz gehen das organisch gebundene Chlor ein, das zu Chlorid reduzierte Chlor und ein Flüchtigkeitsterm, der durch einen Blindversuch ermittelt wurde. Die Wiederfindungsrate liegt über 90, meist über 95%. Die Probe Fe112 wurde aus FeCl_2 hergestellt, der erhöhte Chloridwert resultiert aus einer unvollständigen Reinigung des Produkts.

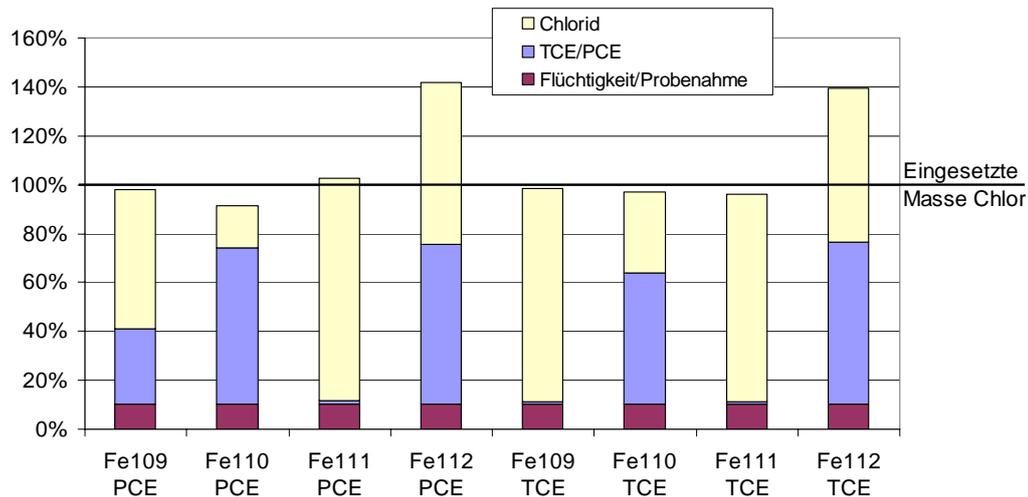


Abb. 5: Chlorbilanz der Reduktion von PCE und TCE.

3.5 Synthesevarianten der Kolloide, Einfluss auf die spez. Oberfläche und Reaktivität

Die Produkte der Synthesevariationen wurden auf ihre Reaktivität gegenüber Trichlorethen (TCE) getestet. Am besten reduzierte das Produkt aus Eisensulfat und Wasser den Schadstoff, das Produkt aus FeCl_3 mit der größten Oberfläche (siehe Abb. 6) war entweder schon abreagiert oder wurde nicht zu elementarem Eisen reduziert.

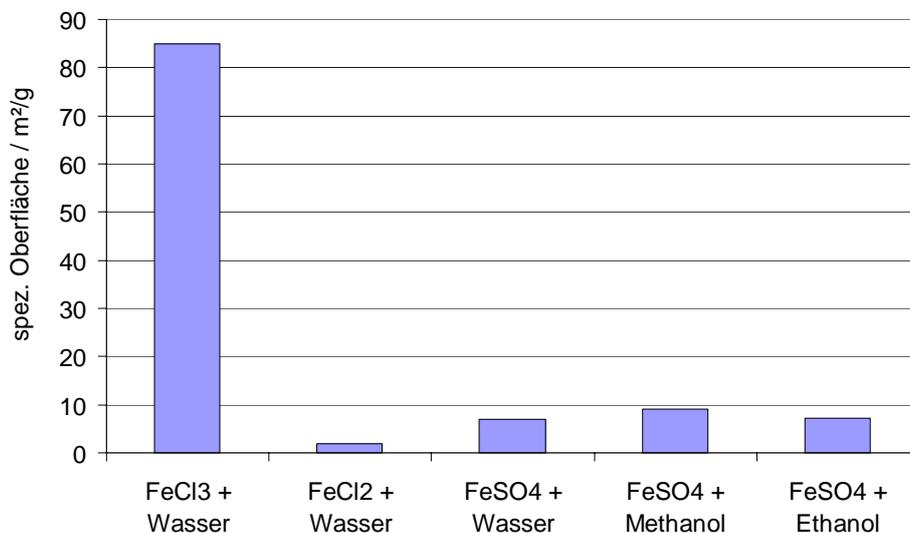


Abb. 6: Einfluss der Syntheseparameter auf die spez. Oberfläche der Kolloide

Mit Eisen(II)sulfat wurden daraufhin nachfolgende Versuche durchgeführt.

Die Reaktionskonstanten aus der Reaktion pseudo-erster Ordnung wurden nach folgender Gleichung ermittelt:

$$-\frac{dC}{dt} = k_{obs} \cdot C \quad C = C_0 \cdot e^{-k_{obs}t}$$

Dabei werden die unten aufgelisteten Geschwindigkeitskonstanten k auf die eingesezte Fe-Konzentration bezogen, mit der Dimension $Lg^{-1}h^{-1}$

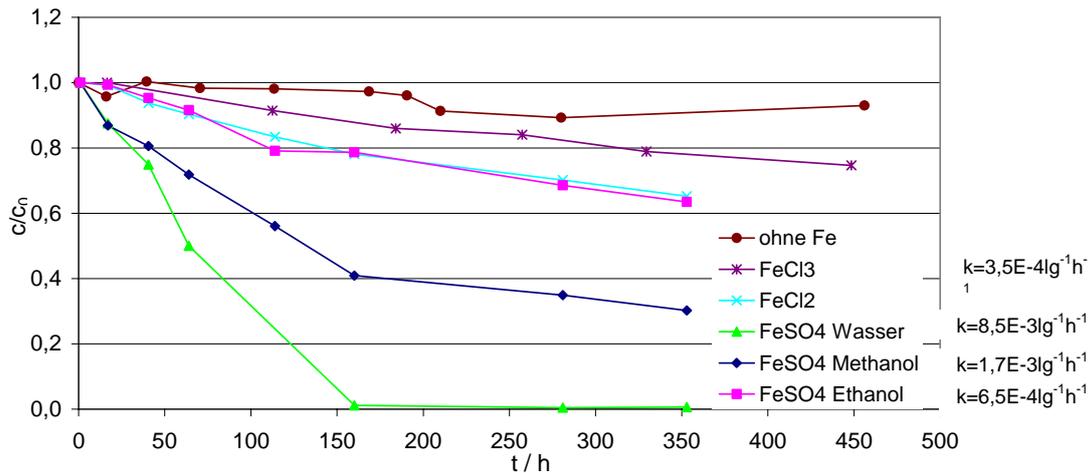


Abb. 7: TCE-Abbau durch Fe(0)-Partikel aus verschiedenen Synthesewegen

Die braune Kurve (ohne Fe) zeigt die Blindwerte, am reaktivsten ist das Produkt aus der Synthese mit dem FeSO₄/Wasser-Gemisch.

3.6 Entstehung von Folgeprodukten

Bei der Reduktion von Tetrachlorethen entsteht in geringem Maße Trichlorethen als Zwischenprodukt. Die Konzentrationen sind um ca. zwei Zehnerpotenzen niedriger, siehe Abb. 8.

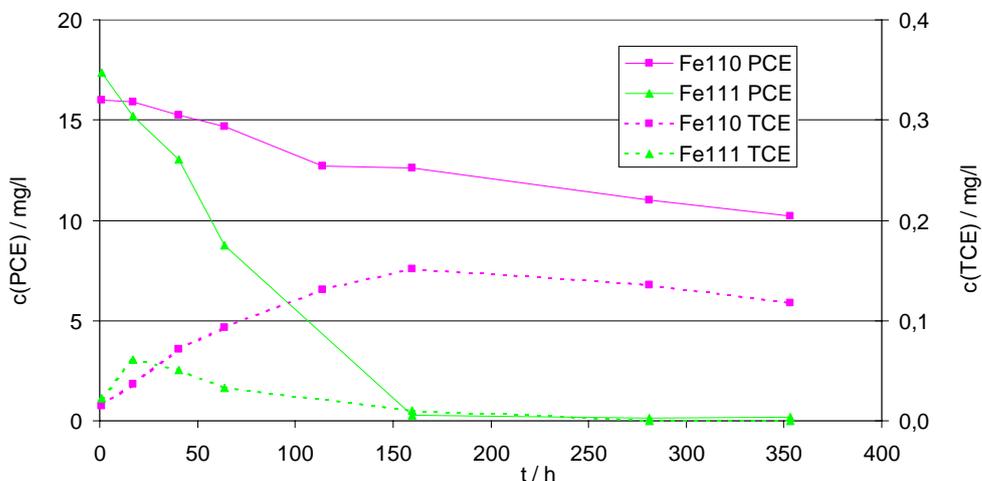


Abb. 8: Entstehung von TCE beim PCE-Abbau.

3.7 Vergleich der Reaktionsgeschwindigkeiten von Tri- und Tetrachlorethen

Trichlorethen reagiert wesentlich schneller mit den Fe-Kolloiden als Tetrachlorethen/PER, sowohl bei reaktiveren als auch bei weniger reaktiven Kolloiden, siehe Abb. 9.

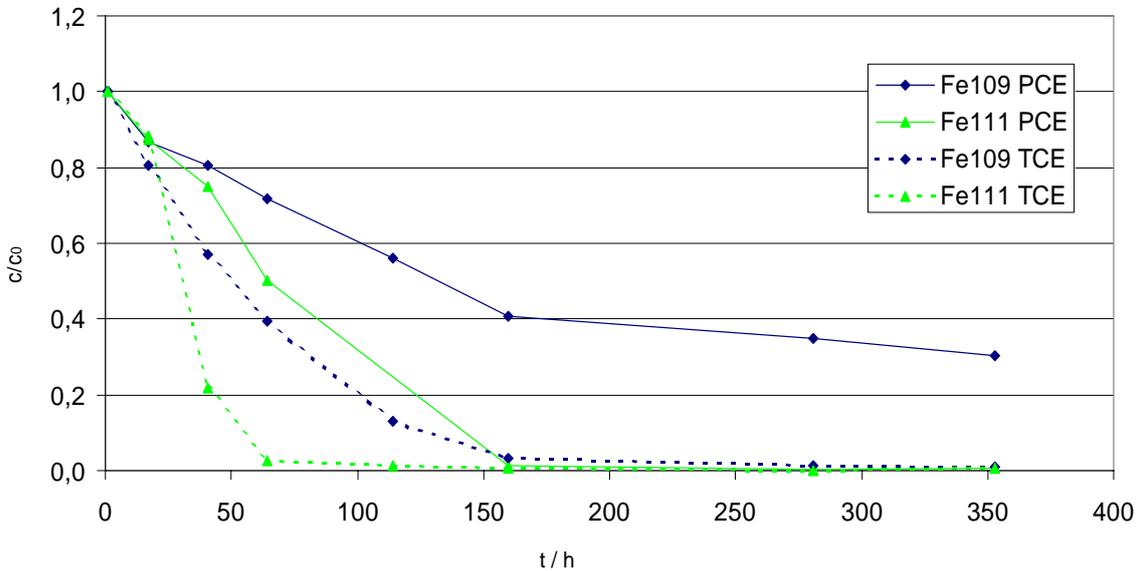


Abb. 9: Vergleich der Reaktionsgeschwindigkeit von TCE und PCE.

3.8 Wasserstoffbildung als Parallelreaktion.

Während der Schadstoffreduktion entsteht als Nebenprodukt Wasserstoff aus der Reduktion des Wassers mit den Fe-Kolloiden, siehe Abb. 10. Das Gasvolumen wurde mit einer gasdichten Glasspritze bestimmt. Am Versuchsende ist keine Gasentwicklung mehr festzustellen.

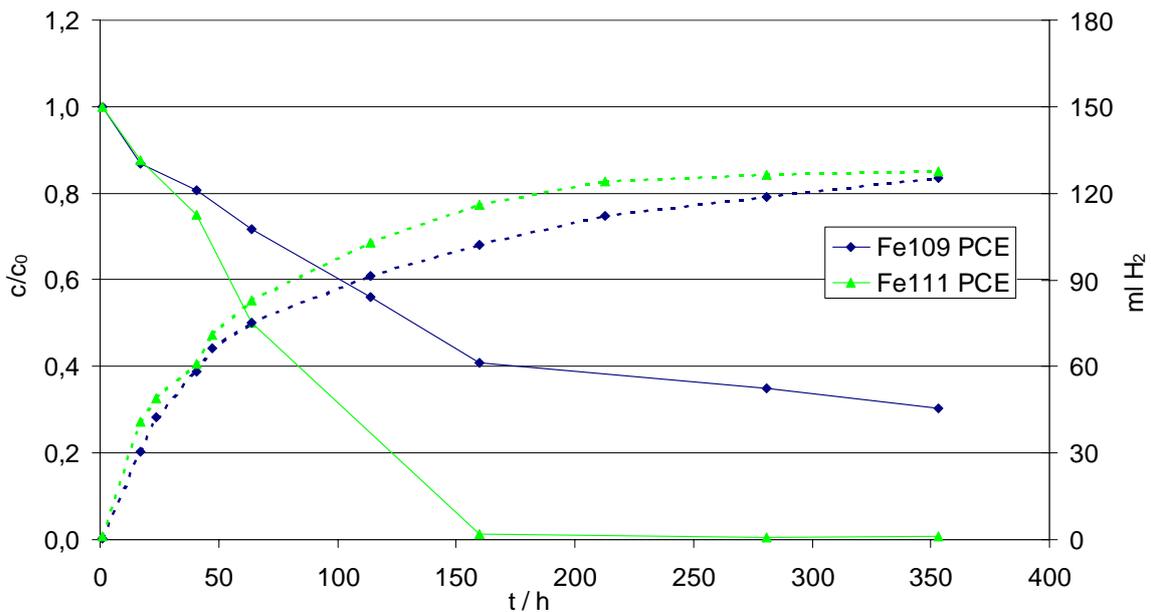


Abb. 10: Wasserstoffentwicklung als Nebenreaktion aus der Reduktion des Wassers.

3.9. Variation der Oberflächenmodifizierung

3.9.1 Hydrophobes Coating

Die Reaktivität der Ansätze mit verschiedenen Arten der Oberflächenmodifizierung wurde ermittelt. Bezogen auf die Masse an eingesetzten Kolloiden ist erwartungsgemäß der Ansatz mit der größten Oberfläche der reaktivste. Bezieht man die Reaktionskonstante pseudoerster Ordnung auf die Oberfläche, so zeigt sich, dass die Kombination von Ultraschall und dem Coatingmaterial TWEEN 20 (Polyoxyethylen(20)-sorbitanmonolaureat) eine deutliche Steigerung der Reaktivität der Oberfläche bewirkt. Abb. 11.

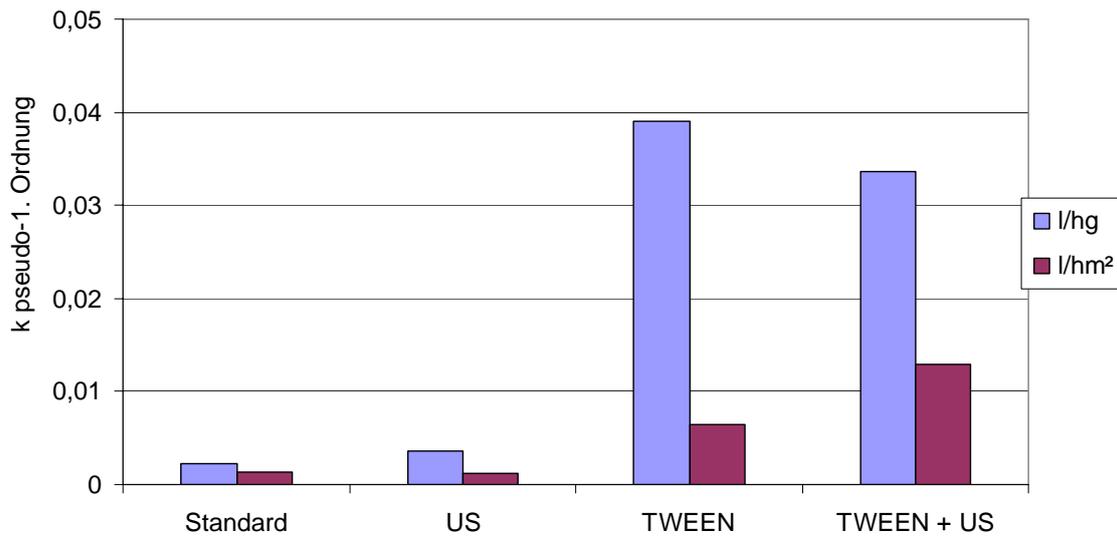


Abb. 11: Variation der Dispergierbedingungen bei der Synthese, Einfluss auf die Kinetik.

Den Einfluss auf die spezifische Oberfläche zeigt die Abb. 12. Die Standardsynthese lieferte eine spezifische Oberfläche von 7 m²/g, zusätzlicher Ultraschalleinsatz verbesserte sie auf 13 m²/g, während die Zugabe von TWEEN 20 eine spezifische Oberfläche von 24 m²/g zur Folge hatte. Die Kombination bewirkte keine weitere Vergrößerung der spezifischen Oberfläche.

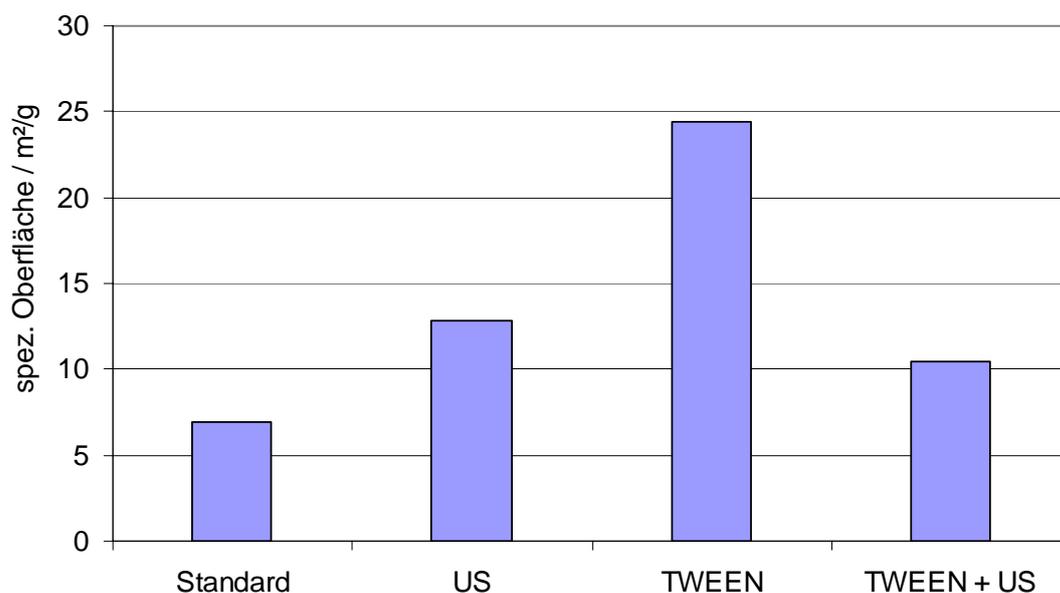


Abb. 12: Variation der Dispergierbedingungen, Einfluss auf die Oberfläche

3.9.2 Elektrostatistische Stabilisierung

Um die Reaktivität der Partikel zu steuern, wurde ein Coating aus amorphem SiO₂ durch eine Stöber-Reaktion aufgebracht. Das Verhältnis SiO₂:Fe wurde variiert. Dazu wurde die Suspension aufgeteilt und mit verschiedenen Mengen frisch durch Ionenaustausch hergestellte Kieselsäure versetzt. Die Kondensation wurde durch eine Absenkung des pH-Wertes mittels 1M HCl eingeleitet. Das SiO₂ beeinflusst die elektrophoretische Mobilität der Partikel und damit den Isoelektrischen Punkt (IEP). Dieser wurde mittels Titration mit einem Zetasizer 5000 der Firma Malvern bestimmt. Mit fallendem isoelektrischen Punkt der Partikel steigt die Reaktionsgeschwindigkeit mit TCE an, siehe Abb. 13.

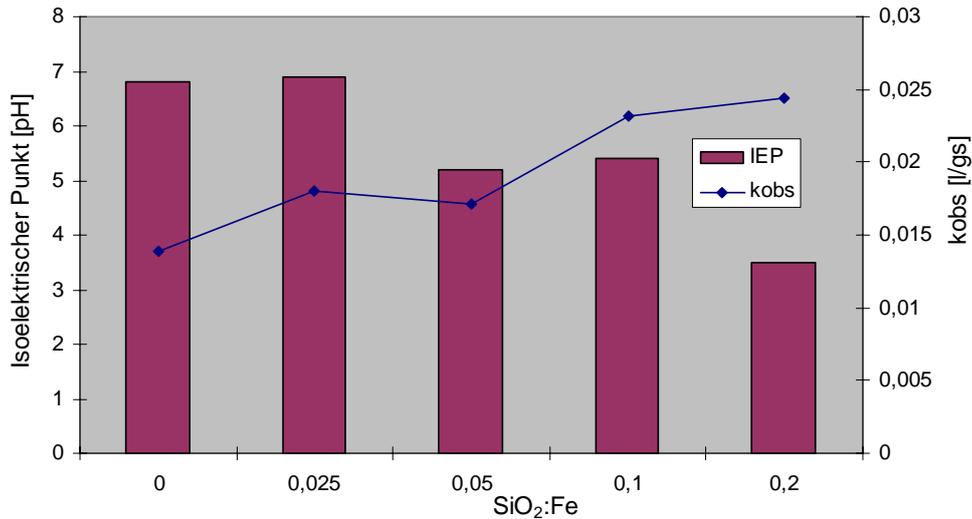


Abb. 13: IEP und Reaktionskonstante in Abhängigkeit vom SiO₂:Fe-Verhältnis

3.10. Zetapotentiale verschiedener Fe-Kolloide

Es wurden mit dem Zetasizer aufgenommene Zetapotentialkurven modifizierter und unmodifizierter Eisenkolloide verglichen. Die Partikel mit der Bezeichnung RNIP wurden von der Firma Alstom bezogen. Die modifizierten RNIP-Partikel besitzen einen isoelektrischen Punkt von 3, die unmodifizierten Proben (AP) liegen deutlich darüber, siehe Abb. 14. Da die Messung nicht absolut unter Sauerstoffausschluss durchgeführt werden konnte, könnte der IEP durch Oxidation der Partikel zu höheren pH-Werten hin verschoben worden sein.

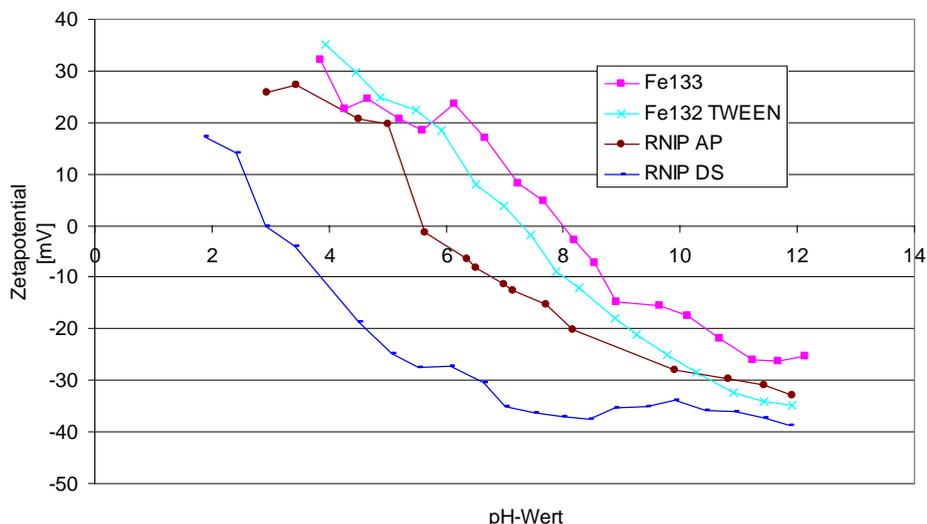


Abb. 14: Zetapotentialkurven verschiedener Fe-Kolloide.

3.11 Säulenversuchsanlage zur Charakterisierung des Partikeltransports

Um eine erste Einschätzung der Mobilität der hergestellten Fe(0)-Nanopartikel im Aquifer zu erhalten, wurden Versuche mit kleinen, mit Sand befüllten Säulen geplant. Dazu wurde eine Säulen-Elutionsanlage in Betrieb genommen, die die Aufzeichnung von Durchbruchkurven für Fe(0)-Kolloide durch eine Kopplung mit der im Institut weiterentwickelten höchstempfindlichen Laser-induzierten Breakdown Detektion (LIBD) von Kolloiden ermöglicht, siehe Abb. 15.

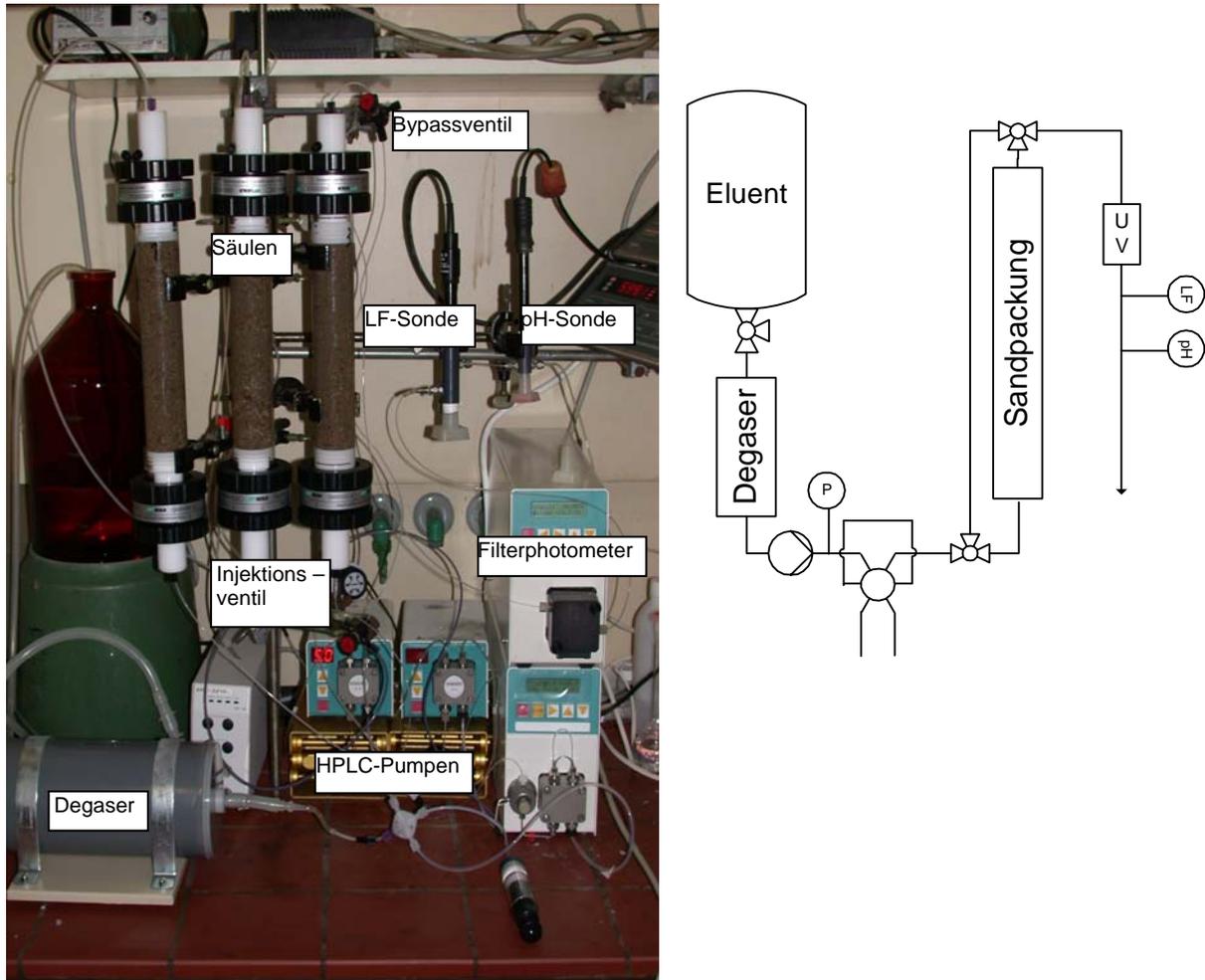


Abb. 15: Säulen – Elutionsanlage: Versuchsaufbau und Fließbild.

Zusätzlich kann die Reaktivität des immobilen Anteils der Fe(0)-Kolloide mittels einer Durchströmung mit TCE-haltigem Wasser untersucht werden. Hier sollten erste Anhaltspunkte dafür gefunden werden, in wie weit der Stabilisator die Mobilität der Partikel und ihre Reaktivität im Aquifer beeinflusst. Die Anlage erlaubt durch Entgasung des Eluenten Versuche unter anaeroben Bedingungen. Zwei Säulen können konditioniert werden, in einer läuft der Versuch unter Drucküberwachung ab. Die Partikelsuspension wird durch ein Injektionsventil ohne Unterbrechung des Eluentenstroms injiziert. Die Wiederfindung von TCE nach Durchströmung der Sandpackung ist >95%.

Aktuelle Säulendaten:

Säulendurchmesser: 35 mm

Bettlänge 125 mm bis 250 mm

Maximaldruck: 20 bar

Volumenstrom: 0,1 bis 50 ml/min

Die Reproduzierbarkeit der Sandpackungsexperimente wurde durch Tracerversuche mit Uranin überprüft, wie Abb. 16 zeigt, war sie gegeben. Auch die Wiederfindung des TCE war zufriedenstellend, siehe Abb. 17.

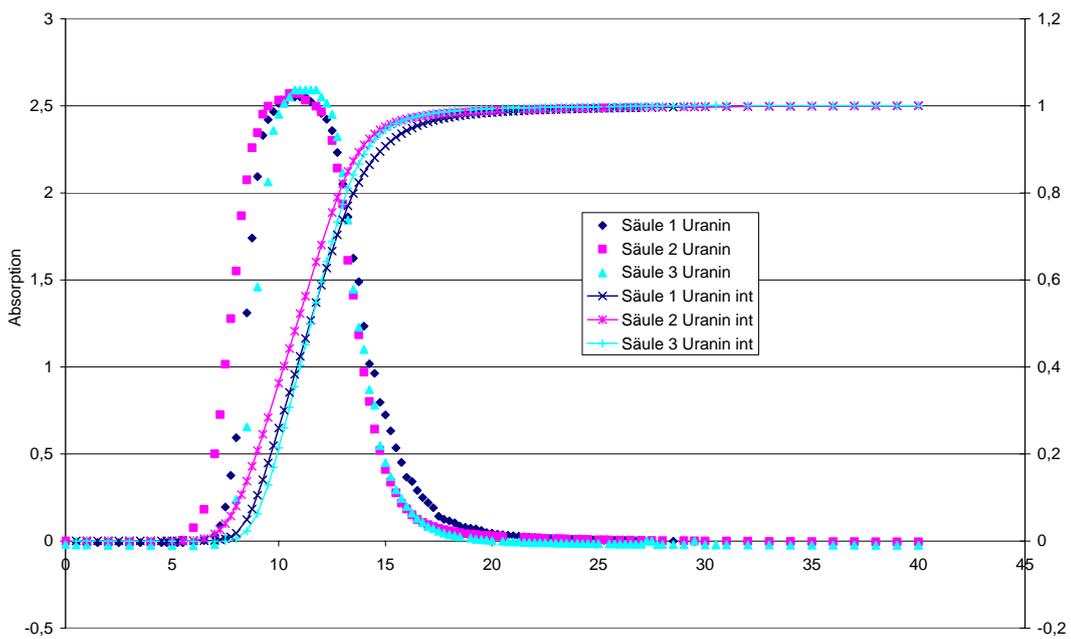


Abb. 16: Reproduzierbarkeit der Säulenexperimente mit Uranintracer.

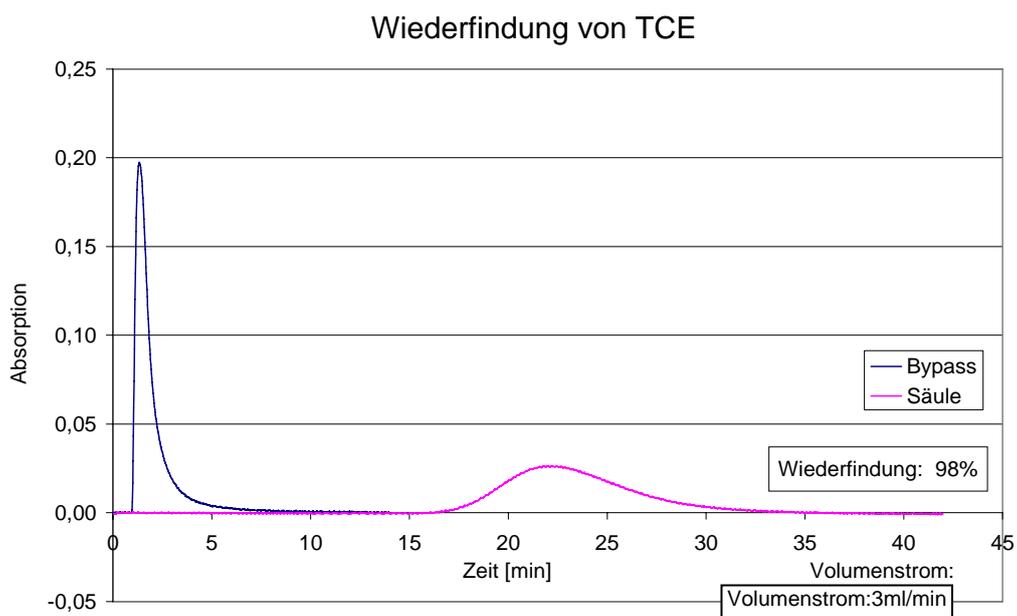


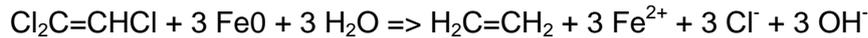
Abb. 17: Wiederfindung von TCE bei ersten Säulenversuchen.

4. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Als erste Abschätzung werden die Kosten für die Eisenkolloidmengen für die Reduktion einer Modellkontaminante abgeschätzt.

4.1 Fe-Bedarf

Geht man als Modell für die Reaktion von Trichlorethen mit elementarem Eisen von folgender Reaktionsgleichung aus,



ergibt sich ein stöchiometrisches Verhältnis von Trichlorethen zu erforderlichem Eisen von 1 Mol Trichlorethen zu 3 Mol Eisen oder einem Gewichtsverhältnis von 1 kg Trichlorethen (Molgewicht: 131 g/Mol) zu 1,282 kg Fe (Molgewicht: 56 g/Mol).

Für eine Fahne mit einer mittleren Konzentration von 100 µg/l bei einer Fahnenbreite von 50 m, einer Mächtigkeit von 10 m (Tiefe) und einer angenommenen Fließgeschwindigkeit des Grundwassers von 0,5 m pro Tag ergibt sich so bei einer halbjährlichen Eisengabe unter der Voraussetzung eines quantitativen Umsatzes ohne Nebenreaktionen ein Eisenbedarf von 5,8 kg.

Aufgrund der bei den kinetischen Messungen beobachteten Nebenreaktionen, insbesondere die H₂-Entwicklung, sollte man eine 10%ige Effizienz des Umsatzes ansetzen, d.h. es wären 58 kg Eisen zur Behandlung des Abstroms erforderlich.

4.2 Kostenschätzung

Das kommerziell erhältliche Produkt (Firma Toda, RNIP) mit 20% Feststoffgehalt (70% Fe₀, 30% Fe₃O₄) hat einen Preis von ca. 180€/kg Fe₀ bei einer Gebindegröße von 3kg.

Dies bedeutet für das obige Beispiel Materialkosten von 10.440 €

Für das über die Reduktion mit Borhydrid im flüssigen System synthetisierte Material sind für 1 kg Fe₀ folgende Kosten zu betrachten (bei einem getesteten Überschuss von 3 für das Reduktionsmittel und vollständigem Umsatz bis zum Fe₀):

5 kg FeSO₄ mit 50 € in Gebindegrößen von 5kg

1 kg NaBH₄ mit 300 € in Gebindegrößen von 5kg

Berücksichtigt man ferner 50% Verlust bei der Aufreinigung und Lagerung der Suspension (konservative Schätzung), so folgen Materialkosten von 700€/kg Fe₀.

Dies bedeutet für das obige Beispiel reine Materialkosten von 40.600 € (ohne Abschreibung etc.).

5. Schlussfolgerungen

Aus Kapitel 4 folgt, dass selbst unter Berücksichtigung deutlicher Einsparpotentiale bei der Borhydrid-Variante (Preise pro Gebinde) diese gegenüber einem kommerziellen Produkt über die Festphasenreduktion bzw. einem weit entwickelten FE-Produkt nicht konkurrenzfähig ist, was auch sicher nicht durch den grundsätzlichen Vorteil der direkten vor Ort Synthese (mit definierten Produkteigenschaften) aufgehoben wird.

Die potentiellen Vorteile der Verwendung von Fe-Kolloiden werden durch die erhaltenen Ergebnisse bestätigt, weitere Arbeiten zur Steuerung von Kolloidstabilität, Reaktivität und Migrationsverhalten sind notwendig.

Zu schlussfolgern ist daraus, dass weitere FE-Arbeiten vom kommerziellen/weit entwickelten Material ausgehen sollten und die folgenden beiden Effekte detailliert untersucht und optimiert werden müssen:

1. Altern der Suspensionen (kolloidchemisch bedingte Agglomeration, Nebenreaktionen in der Suspension und damit geringe Mobilität).
2. Vorkonditionieren (vor einer Injektion am Standort), um Punkt 1 zu kompensieren, definierte Suspensionsbedingungen zu schaffen und ggf. je nach Zusammensetzung der Bodenmatrix kolloidchemische Anpassungen (Oberflächenladungen und deren Dichte) vorzunehmen.

6. Literatur

Alessi D.S., Li Z.H.: Synergistic effect of cationic surfactants on perchloroethylene degradation by zero-valent iron *Environmental Science & Technology* 35 (18) 3713-3717 September 2001

Dahmke, A. (1997), „Aktualisierung der Literaturstudie ‘Reaktive Wände’ pH-Redoxreaktive Wände“. Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg, Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung, 33/97, Karlsruhe.

Kopinke F.D., Georgi A., Weiss H.: Brief Communication. *Journal of Nanoparticle Research* 6 (1): 123-123 Februar 2004

Stupp H.D. (2001): Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen - Vergleiche Reinigungswände/pump-and-treat. ITVA-Fachtagung Reinigungswände auf dem Vormarsch. Magdeburg am 24. Oktober 2001.

Zhang W. (2003); Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview. *Journal of Nanoparticle Research* 5: 323–332, 2003.9