

Modellgestützte Feedback-Steuerung für modulare in-situ Gaswände

Annika Beckmann¹, Mark Zittwitz¹, Matthias Gerhardt¹, Marion Martienssen², Helmut Geistlinger², Mario Schirmer²

¹BIOPRACT GmbH, Rudower Chaussee 29, Eingang Kekuléstraße 7, 12489 Berlin,
E-Mail: beckmann@biopract.de

²UFZ – Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Theodor-Lieser-Str. 4, 06120 Halle/Saale

Im Rahmen eines vom BMWA geförderten Projektes wird die Entwicklung und der Einsatz einer modellgestützten Feedback-Steuerung für die Errichtung von modularen in-situ Gasinjektionssystemen an einem hauptsächlich mit BTEX und MTBE kontaminierten Standort in Leuna, Sachsen-Anhalt, durchgeführt. Darüber hinaus soll der für den Modellstandort entwickelte Lösungsansatz auf andere Standorte und Schadstoffe übertragen werden.

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund sinkender finanzieller Möglichkeiten vieler Standorteigentümer und der zunehmenden Komplexität der zur Sanierung gelangenden Schadensfälle gewinnen Verfahren der in-situ Sanierung von Grundwasserkontaminationen verstärkt an Bedeutung. Besonders für Standorte, welche großflächig und mit hohen Schadstofffrachten kontaminiert sind, stellen aktive in-situ Maßnahmen eine kostengünstige Alternative zu herkömmlichen Sanierungsstrategien dar. Eine Vielzahl von organischen Schadstoffen im Grundwasser ist unter aeroben Bedingungen biologisch abbaubar. Aus Feldstudien zum natürlichen Abbau und Rückhalt („Natural Attenuation“) ist bekannt, dass das Fehlen von Sauerstoff ein wesentlicher limitierender Faktor für den biologischen Schadstoffabbau ist. Folglich ist die Bereitstellung von Sauerstoff im Sinne einer Beschleunigung des biologischen Abbaus durch autochthone Mikroorganismen für eine Vielzahl von Schadensfällen eine prinzipielle Lösung. Dies betrifft beispielsweise den aeroben Abbau von BTEX und MTBE.

Eine mögliche Strategie zur Sauerstoffbereitstellung ist die Direktgasinjektion von Sauerstoff, mit dem Ziel der Bildung von residualen Gasphasen zur Aerobisierung des Aquifers. Die Direktgasinjektion nutzt den Aquifer als Gasspeicher, indem die Sauerstoffzufuhr derart gesteuert wird, dass die Sauerstoffgasphase in Form fein verteilter Gasblasen im Sedimentkörper zurückgehalten wird und ein Ausgasen in die Bodenluft vermieden wird. Dabei können auch gezielt Sediment-Grenzschichten als hydraulische Barrieren gegen vertikale Gasströme und

zur Erhöhung der lateralen Ausdehnung der gasdurchströmten Kapillarnetzwerke genutzt werden. Die immobilen Residualgasphasen lösen sich langsam auf und reichern das anströmende Grundwasser mit Sauerstoff an. Die immobile Gasphase wirkt dabei hydraulisch und biologisch wie eine reaktive Gaswand.

2 Problem und Aufgabenstellung

Das Fehlen einer leistungsfähigen, modellgestützten Steuer- und Regelungstechnik kann bei Gasinjektionen zu Unsicherheiten und Fehlschlägen führen (Verblockung von Fließwegen, unvollständige Erfassung des Reaktionsraumes, unzureichende Versorgung mit Reaktionsgas). Im Rahmen eines vom BMWA geförderten Projektes soll daher eine modellgestützte Feedbacksteuerung für die Errichtung von modularen in-situ Gasinjektionssystemen entwickelt und an einem hauptsächlich mit BTEX und MTBE kontaminierten Standort in Leuna, Sachsen-Anhalt, erprobt werden.

Die Direktgasinjektion wird über Injektionslanzen mit mehreren Begasungssektionen erfolgen, welche eine räumlich orientierte Ansteuerung einzelner Horizonte ermöglicht. Die Injektionslanzen sollen sowohl vertikal als auch lateral sehr flexibel den jeweiligen hydraulischen und geologischen Bedingungen angepasst werden. Als Injektionsgas wird reiner Sauerstoff verwendet. Der Sauerstoffgaseintrag soll mit Hilfe der modellgestützten Feedbacksteuerungstechnik gezielt in Bezug auf Begasungsintensität und Begasungsintervall gesteuert werden, um die Gasinjektion dahingehend zu optimieren, dass

bei minimalem Sauerstoffeintrag eine vollständige Mineralisierung der am Standort vorhandenen gelösten Schadstoffe erreicht wird.

Die rechnergestützte Ansteuerung der Begasungssektionen wird auf einer automatisierten modelltechnischen Simulation der Ausbreitung des injizierten Gases sowie der Verteilung der gelösten Schadstoffe basieren. Dazu müssen sowohl Transportprozesse (Advektion, Dispersion/Diffusion), Reaktionsprozesse zwischen injiziertem Sauerstoffgas und der im Grundwasser vorhandenen Schadstoffe, zusätzliche sauerstoffzehrende Reaktionen, als auch Lösungsprozesse der injizierten Gasphase und die Freisetzung der gelösten Schadstoffmasse aus dem Schadstoffherd (Phasenübergänge) betrachtet werden.

Vorraussetzung für die gezielte Anwendung einer Direktgasinjektion am Standort ist die kleinskalige Erkundung der geochemischen und hydrogeologischen Bedingungen. Das auf Basis dieser kleinskaligen Erkundung zu entwickelnde, standortspezifische Modell wird im Sanierungsverlauf durch ein intensives Monitoring, in das auch die online Bestimmung der Gelöstsauerstoffkonzentration in-situ einbezogen wird, ständig erweitert und angepasst, so dass eine Feedback-Steuerung erreicht wird.

Der für den Modellstandort entwickelte Lösungsansatz soll anschließend auf andere Standorte und / oder Schadstoffe übertragen werden.

3 Lage des Untersuchungsgebietes

Die Feldversuchsanlage befindet sich am Chemiestandort Leuna auf dem Gelände der Alten Raffinerie. Der Chemiestandort liegt im südlichen Teil des Bundeslandes Sachsen-Anhalt, jeweils 30 km von den Städten Halle (Saale) bzw. Leipzig entfernt, zwischen der Ortschaft Spergau und der Stadt Leuna (Abbildung 1).

Der Standort ist Teil eines ausgedehnten Schadensbereiches, wobei sich die Grundwasserbelastungen im Wesentlichen auf das eigentliche Werksgebiet des Chemiestandortes konzentrieren. Es sind keine flächenhaften, zusammenhängenden Belastungen ausgebildet, sondern mehrere kleinere Kontaminationsbereiche um punktuelle Quellen. Das Testfeld liegt im Bereich ehemaliger Tanklager und einer Tankkraftwagen-Verladestation und umfasst sowohl Quell- als auch Ausbreitzzone.

4 Geologische Standortbedingungen

Der Betrachtungsraum gehört regionalgeologisch zur Merseburger Buntsandsteinplatte, die sich vom Südteil der Stadt Halle im Norden, über Merseburg bis in den Raum Weißenfels im Süden erstreckt. Die Schichten des Buntsandsteins fallen im Betrachtungsgebiet flach nach

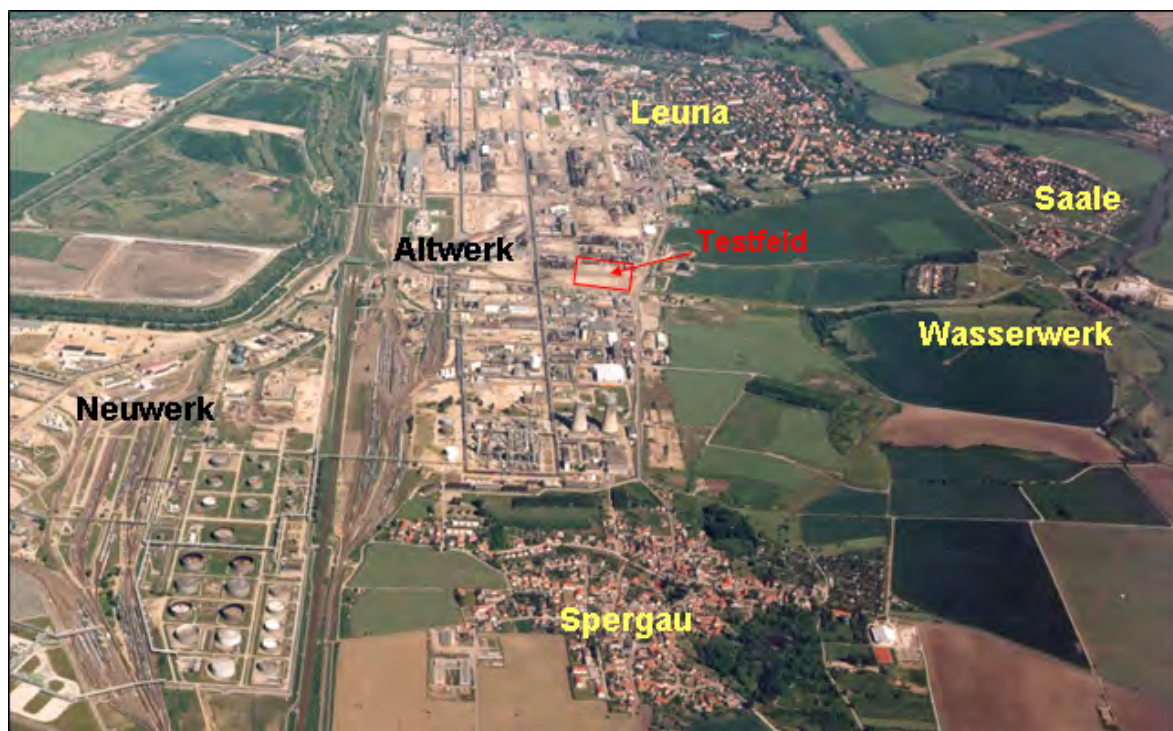


Abb. 1: Lage des Testfeldes am Chemiestandort Leuna

Südwesten ein. Überlagert wird der Buntsandstein von tertiären und quartären Sedimenten. Der überwiegende Anteil der für das Projekt relevanten Schichten am Standort wird von quartären lithostratigraphischen Körpern eingenommen. Im Untersuchungsraum finden sich pleistozäne Ablagerungen der beiden jüngeren Kaltzeiten (Saale- und Weichsel-Eiszeit). Die Schichtenfolge beginnt im Untersuchungsgebiet mit fluviatilen Sedimenten, die unmittelbar vor der 1. saalekaltzeitlichen Inlandvereisung zur Ablagerung kamen. Diese Kiese und Sande der Saalehauptterrasse, in die untergeordnet tonig-schluffige Schichten eingelagert sind, können in zwei Sedimentationszyklen untergliedert werden. Die Teilung der Sedimentationszyklen im saalezeitlichen Frühglazial ist durch das Auftreten eines Interstadial-Periglazialhorizontes zwischen den fluviatilen Terrassenbildungen belegt. Dabei handelt es sich um Schluffe und Lehme mit einer stellenweise recht reichen Molluskenfauna. Der obere Teil der Saalehauptterrasse ist im Untersuchungsgebiet fast vollständig erodiert worden und findet sich nur in kleinen geringmächtigen Vorkommen.

Im Bereich der Leuna-Werke stehen verschiedene jüngere quartäre Bildungen (Deckschichten) an der Oberfläche der Saale-Hauptterrasse an. Dabei handelt es sich um weichselkaltzeitliche Löss-Schotter-Fließerden sowie Sandlöss. Bei den Fließerden handelt es sich um bindige (steif bis halb feste) Grobschluffe mit Beimengungen von Kiesen, Sanden sowie Löss-Schluffen. Auffülle ersetzt im Untersuchungsgebiet teilweise die obersten (bindigen) Deckschichten. Die sedimentologische Zusammensetzung der anthropogenen Auffülle zeigt sich äußerst heterogen, vorherrschend jedoch schluffig, sandig und kiesig.

5 Hydrogeologische Standortbedingungen

Am Standort stellen die fluviatilen Sedimente der quartären Saalehauptterrasse den obersten grundwasserführenden Horizont dar. Dieser besitzt im Hinblick auf den Schadstofftransfer, der von den Quellen im Bereich der Alten Raffinerie ausgeht, eine zentrale Bedeutung. Die unterlagernden tertiären Schichten besitzen durch ihre feinkörnige Zusammensetzung überwiegend grundwasserstauende Eigenschaften. Die quartären Deckschichten können als vorherrschend durchlässig betrachtet werden, wenngleich sie eine geringere

Durchlässigkeit besitzen als die Sedimente der Saalehauptterrasse.

6 Bisher durchgeführte Untersuchungen

6.1 Kleinskalige hydrogeologische und stratigrafische Charakterisierung des Feldstandortes

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurden an 20 über den Feldstandort verteilten Punkten EC-Logs aufgenommen. Die 20 Messpunkte wurden außerdem für spätere Probenahmen und zu Monitoringzwecken zu 1 Zoll-Grundwassermesspegeln ausgebaut. Zusätzlich wurden an 10 Punkten Rammkernsondierungen niedergebracht und eine stratigrafische Ansprache vorgenommen. An 10 weiteren Punkten wurden hydraulische Leitfähigkeitsmessungen (Injection loggings) durchgeführt. Bei diesem Verfahren wird die Wassermenge gemessen, welche bei einem vorgegebenen Druck in bestimmter Zeit im Sedimentkörper injiziert werden kann. Diese Injection loggings wurden mit Hilfe von Slug & Bail Tests kalibriert und die kf-Werte der Gesteinsschichten vertikal im Abstand von 0,5 m ermittelt.

Auf der Grundlage der oben dargestellten Verfahren (Injection logging, EC-Log, Rammkernsondierung) wurden die Horizonte festgelegt, die am durchlässigsten und daher für die Beschreibung der hydraulischen und hydrochemischen Verhältnisse am wichtigsten sind. Die Daten aus der kleinskaligen Erkundung des Standortes fließen in die Erstellung eines kf-Wert-Feldes ein. Das mit Hilfe des statistischen Moduls T-Progs (Transition Probability Geostatistical Software) erzeugte dreidimensionale kf-Feld wird zur Bildung eines Strömungsmodells (ModFlow) für den Standort verwendet.

6.2 Kleinskalige geochemische Untersuchung des Feldstandortes

Für die kleinskalige geochemische Untersuchung wurden im Rahmen des Projektes an 6 ausgewählten Punkten des Testfeldes tiefenorientiert Bodenproben entnommen. Es wurden horizontweise Mischproben entnommen, bei positivem organoleptischen Befund auch in kleineren Abständen. Die Proben wurden im Labor auf die Hauptkontaminanten MKW und BTEX unter-

sucht. Dabei ergab sich eine Belastung mit BTEX von bis zu 2600 mg/kg und mit MKW von 4300 mg/kg. Die Hauptbelastung findet sich im oberen Teil des Grundwasserleiters und nimmt mit zunehmender Teufe ab.

Eine detaillierte quantitative Bestimmung der hydrochemischen Parameter im Grundwasser in isolierten Teufenbereichen wird mit Hilfe von Packersystemen durchgeführt. Auf diese Weise werden tiefenorientiert Wasserproben entnommen und auf Anionen/Kationen, Schadstoffgehalte und hydrochemische Parameter (Sauerstoffgehalt, Leitfähigkeit, pH-Wert, Temperatur und Redoxpotential) untersucht. Die Beprobung des Grundwassers ist noch nicht vollständig abgeschlossen, die Ergebnisse stehen bisher noch aus.

6.3 Installation Gasinjektionssystem

Der Ausbau des Gasinjektionssystems wird in mindestens zwei, maximal drei Ausbaustufen erfolgen. Insgesamt ist am Standort die Errichtung von bis zu 15 Pegeln zur direkten Sauerstoffgasinjektion geplant. Dabei wurden in

Ausbaustufe 1 drei Pilotpegel mit unterschiedlichen Injektionselementen installiert. Nach einer Testphase wird das sich als am besten geeignet erwiesene Injektionselement für den weiteren Ausbau zur Anwendung kommen.

Die Gasinjektionselemente wurden im Direct-Well-Verfahren installiert. In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Installation der Gasinjektionselemente im Direct-Well-Verfahren einen besseren Lufteintrag gewährleistet, da bei der klassischen Methode zur Einbringung mittels Trockenbohrung die zugeführte Luft bevorzugt im Bereich der - im Vergleich zum anstehenden Boden - aufgelockerten Ringraumschüttung aufsteigt und somit ein geringerer Einflussradius der Belüftung resultiert als bei einem gerammten Pegel. Während der Installation wurden zusätzlich für jeden Ansatzpunkt kleinskalige Aufnahmen hinsichtlich der Stratigraphie und der hydraulischen Leitfähigkeit angefertigt, so dass eine punktgenaue Platzierung der Injektionshorizonte und damit eine optimale Anpassung an die geologischen Gegebenheiten gewährleistet werden. In Abb. 2 ist der Entwurf einer Versuchsanordnung für einen Injektionspunkt mit drei Injektionshorizonten dargestellt.

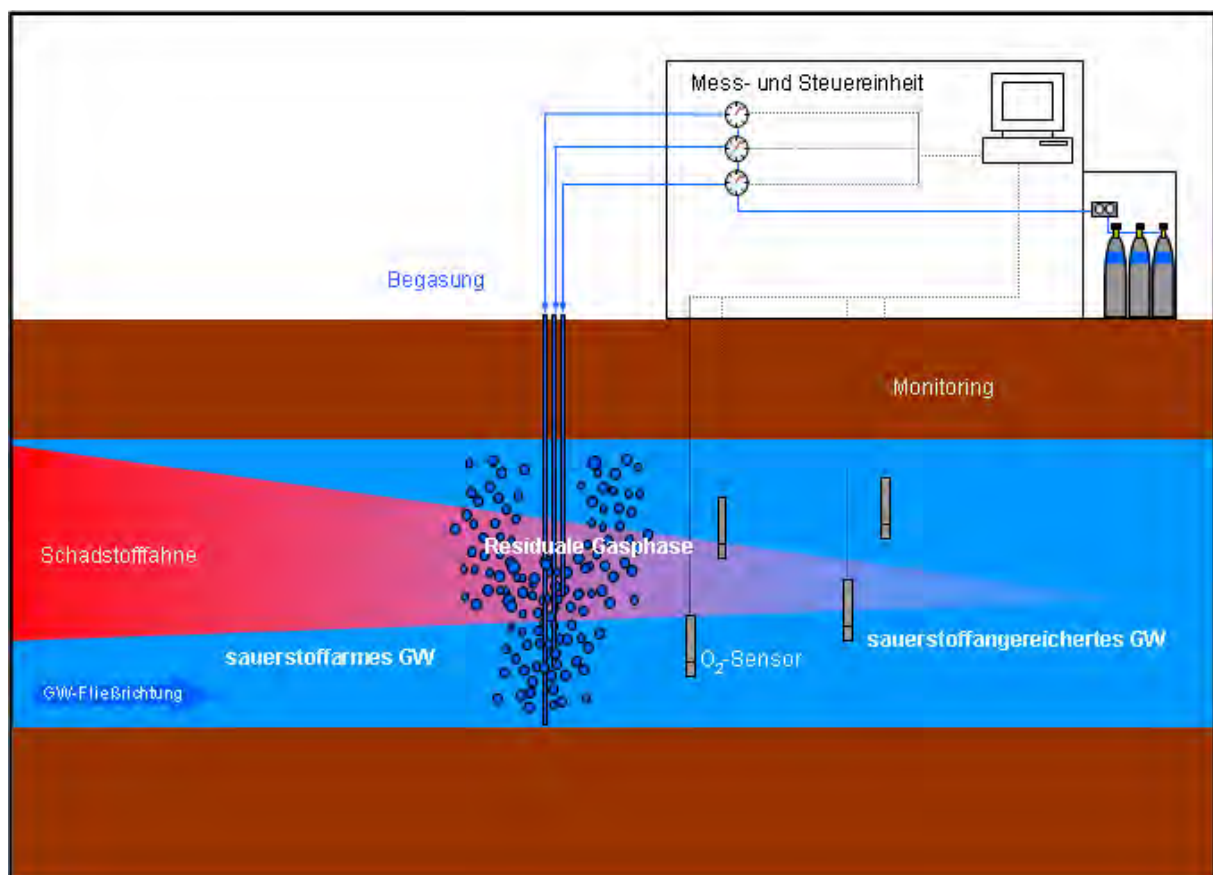


Abb. 2: Aufbau des Injektions- und Steuerungsmoduls (Vertikalschnitt).

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die kleinskalige hydrogeologische und stratigraphische Charakterisierung des Feldstandortes ist weitestgehend abgeschlossen und die Daten aus Injection logging, EC-Log und Rammkernsondierung sind in die Erstellung eines dreidimensionalen kf-Feldes eingeflossen. Die Untersuchung von Bodenproben am Testfeld ist abgeschlossen, derzeit werden weitere Untersuchungen zur Geochemie des Grundwassers durchgeführt. Die Mess- und Steuereinheit sowie die ersten drei Pilotpegel mit unterschiedlichen Injektionselementen sind installiert. Es folgt eine Testphase zur Ermittlung des am besten geeigne-

ten Gasinjektionselementes und der anschließende Ausbau des Gasinjektionsfeldes.

Das mit Hilfe von T-Progs erstellte Modell bildet die Grundlage für die weitere Strömungs- und Transportmodellierung. Das Strömungsmodell soll mittels Tracerversuchen kalibriert und eine Anpassung einzelner kf-Werte vorgenommen werden. Ein wichtiger Modellparameter ist die Verteilung der Gasphase im Untergrund. Diese soll durch die Durchführung von Partitioning Tracern ermittelt werden und in das Modell einfließen. Schließlich erfolgt die Entwicklung eines standortangepassten dreidimensionalen Modells für den reaktiven Transport von Sauerstoff und Schadstoffen (RT3D), mit dessen Hilfe die Steuerparameter für den weiteren Sanierungsablauf ermittelt werden sollen.