

# **ISCO – fast 20 Jahre Sanierungspraxis und neue Entwicklungen**

**Dr. Hans-Georg Edel**

Züblin Umwelttechnik GmbH, Maulbronner Weg 32, 71706 Markgröningen

Tel. 071451/8202-249, hans-georg.edel@zueblin.de

## **Inhalt**

|                                                         |     |
|---------------------------------------------------------|-----|
| 1. Zusammenfassung .....                                | 139 |
| 2. Einleitung .....                                     | 140 |
| 3. Grundlagen der In-situ chemischen Oxidation .....    | 140 |
| 4. Weitere wesentliche Anwendungskriterien .....        | 143 |
| 5. Wie kommt das Oxidationsmittel zum Schadstoff? ..... | 143 |
| 6. Praxisbeispiele – Meilensteine .....                 | 145 |
| 7. Literatur .....                                      | 150 |

## **1. Zusammenfassung**

Die In-situ chemische Oxidation (ISCO) ist eine effiziente Sanierungstechnologie, die sich in der Praxis bewährt hat und seit fast 20 Jahren in Deutschland und Europa eingesetzt wird. ISCO ist vor allem zur Quellensanierung für mittel- bis hochbelastete Schadstoffbereiche geeignet. Mit Hilfe unterschiedlicher Oxidationsmittel kann eine große Bandbreite an organischen Schadstoffen rasch und vollständig zerstört werden.

Dem Transport und der Verteilung des Oxidationsmittels in dem Schadstoff belasteten Untergrund kommt entscheidende Bedeutung für eine erfolgreiche Sanierung zu. Damit das Oxidationsmittel mit den Schadstoffen in direkten Kontakt treten kann, sind sowohl für gut als auch für gering durchlässigen Untergrund spezifische Injektionsverfahren und -konzepte erforderlich.

Das ISCO-Verfahren ist allerdings nicht zur Sanierung aller Grundwasserschäden anwendbar. Für weit ausgedehnte Schadstofffahnen oder Böden mit sehr hohen Gehalten an organischer Substanz ist es aus wirtschaftlichen Gründen nur bedingt geeignet.

Die erfolgreiche Anwendung des ISCO-Verfahrens bedarf zunächst einer detaillierten Standortuntersuchung, die eine möglichst detaillierte Kenntnis der Geologie, Hydrogeologie und Geochemie sowie der räumlichen Verteilung der Schadstoffe liefert.

Feldversuche zur Überprüfung der Sanierungseffizienz sind vor allem dann empfehlenswert, wenn ISCO unter schwierigen Bedingungen durchgeführt werden soll oder besondere Anforderungen an den Sanierungserfolg gestellt werden. Schließlich ist ein gehöriges Maß an technisch-wirtschaftlichem Know-how sowie umfassende praktische Erfahrung notwendig, um die In-situ chemischen Oxidation erfolgreich anzuwenden.

## 2. Einleitung

Die In-situ chemische Oxidation (ISCO) zählt zu den am häufigsten eingesetzten innovativen In-situ Sanierungstechnologien. Die Züblin Umwelttechnik GmbH hat seit dem Jahr 2003 rund 50 ISCO-Pilotversuche und Full-Scale Sanierungen in Deutschland, Frankreich, Italien und in der Schweiz durchgeführt.

Die erste großtechnische Anwendung zur Quellensanierung eines LCKW-Grundwasserschadens in Deutschland erfolgte bereits im Jahr 2005 (Edel et al. 2011). Das ISCO-Verfahren wurde seither kontinuierlich weiterentwickelt, wobei die Anwendungsgrenzen durch Kombinationen mit anderen In-situ Technologien, unterschiedlichen Oxidationsmitteln und neuen Injektionstechniken deutlich erweitert werden konnten.

## 3. Grundlagen der In-situ chemischen Oxidation (ISCO)

### 3.1 Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip der In-situ chemischen Oxidation (ISCO) beruht darauf, geeignete Oxidationsmittel in den Untergrund einzubringen und so zu verteilen, dass diese auf die vorhandenen Schadstoffe treffen (Abb. 1).

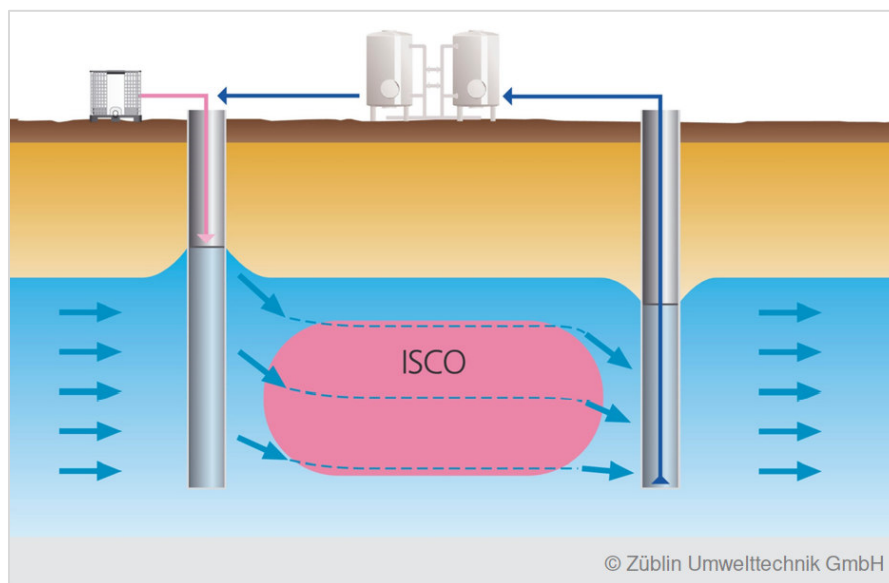


Abb. 1: ISCO – In-situ chemische Oxidation, Verfahrensprinzip

Nur wenn das Oxidationsmittel mit dem Schadstoff direkt in Kontakt kommt, ist eine chemische Reaktion möglich und die Schadstoffe lassen sich in-situ rasch und vollständig oxidieren.

Das ISCO-Verfahren eignet sich vor allem zur Quellensanierung mit Schadstoffen im mittleren bis höheren Konzentrationsbereich, für größere, zusammenhängende DNAPL- oder LNAPL-Pools ist es ungeeignet. Ein besonderer Vorteil von ISCO gegenüber herkömmlichen Verfahren besteht darin, dass sich die Sanierungsdauer durch die rasche Zerstörung der Schadstoffe beträchtlich verkürzen lässt und dadurch Kosten einspart.

### 3.2 Praxisrelevante Oxidationsmittel

In der Sanierungspraxis werden vor allem Permanganat und Persulfat, genauer Peroxodisulfat als Oxidationsmittel eingesetzt, in bestimmten Fällen auch Fenton's Reagens (Tab. 1).

Tab. 1: Praxisrelevante Oxidationsmittel für ISCO

| Oxidationsmittel          | Redoxgleichung                                            |                                                                  | E <sub>h</sub> [V] |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Permanganat               | $\text{MnO}_4^- + 4 \text{H}^+ + 3 \text{e}^-$            | $\rightarrow \text{MnO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$                | 1,7                |
| Peroxodisulfat            | $\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^-$ | $\rightarrow 2 \text{HSO}_4^-$                                   | 2,1                |
| Peroxodisulfat, aktiviert | $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$                               | (KAT) $\rightarrow \bullet\text{SO}_4^- + \text{SO}_4^{2-}$      | 2,7                |
| Fenton's Reagens          | $\text{H}_2\text{O}_2$                                    | (Fe <sup>2+</sup> ) $\rightarrow \bullet\text{OH} + \text{OH}^-$ | 2,8                |

Tabelle 2 zeigt, welche Schadstoffe sich mit diesen Oxidationsmitteln zerstören lassen. Diese reagieren allerdings nicht nur spezifisch mit diesen Schadstoffen, sondern ganz allgemein mit oxidierbaren Verbindungen, wie sie auch natürlich in der Bodenmatrix vorkommen. Dabei wird Fe<sup>2+</sup> zu Fe<sup>3+</sup>, Mn<sup>2+</sup> zu Mn<sup>4+</sup> und S<sup>2-</sup> zu S(0) oder SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> oxidiert, Huminstoffe werden entfärbt. Der Bedarf an Oxidationsmittel hängt daher nicht nur von den Schadstoffen, sondern auch von der Art des Bodens ab. Der englische Fachbegriff für Oxidationsmittelbedarf des Bodens lautet SOD (soil oxidant demand).

Tab. 2: Oxidierbarkeit von Schadstoffen (verändert nach Huling und Pievetz, 2006)

++ sehr gut, + gut, - kaum

| Schadstoff         | Permanganat | Peroxodisulfat | Peroxodisulfat, aktiviert | Fenton's Reagenz |
|--------------------|-------------|----------------|---------------------------|------------------|
| Chlorierte Ethene  | ++          | +              | ++                        | ++               |
| Chlorierte Ethane  | -           | -              | + / ++                    | + / -            |
| Chlorierte Methane | -           | -              | - / + / ++                | + / -            |
| KW                 | +           | +              | ++                        | ++               |
| BTEX               | +           | +              | ++                        | ++               |
| Benzol             | -           | +              | + / ++                    | ++               |
| PAK                | + / ++      | +              | + / ++                    | + / ++           |
| MTBE               | +           | - / +          | ++                        | + / ++           |

Der SOD setzt sich aus dem Oxidationsmittelbedarf für die Schadstoffe, der natürlichen organischen Bodenmatrix (*engl.* NOM = natural organic matter) und reduzierten anorganischen Verbindungen zusammen. Permanganat reagiert mit dem NOM wesentlich stärker als Persulfat. Daraus resultiert für Permanganat ein wesentlich höherer SOD als für Persulfat.

#### 3.2.1 Permanganat

Permanganat ist als Kalium- und Natriumsalz erhältlich, KMnO<sub>4</sub> als kristallines Salz und NaMnO<sub>4</sub> als Lösung. Beide Darreichungsformen unterscheiden sich in ihrer Eigenschaft als Oxidationsmittel prinzipiell nicht.

Mit einem Redoxpotenzial von 1,7 V ist Permanganat im Vergleich zu Persulfat oder Fenton's Reagenz ein mildes Oxidationsmittel (Tabelle 1). Es ist stabil, kann über größere Distanzen transportiert werden und besitzt damit einen weitreichenden Wirkradius (*engl.* ROI = radius of influence). Permanganat reagiert schnell und seine Wirkung wird durch den pH-Wert nur wenig beeinflusst. Bei der Umsetzung von

Permanganat entsteht schwerlöslicher Braunstein ( $\text{MnO}_2$ ), der sich mit Hilfe von Reduktionsmitteln wieder zum löslichen  $\text{Mn}^{2+}$  reduzieren lässt.

Aufgrund seiner elektrophilen Eigenschaften reagiert das Permanganat bevorzugt mit C=C-Doppelbindungen. Dabei handelt es sich um eine Molekülreaktion. Neben Ethenen lassen sich auch Phenole, aktivierte Aromaten sowie weitere Schadstoffe oxidieren, Methane, Ethane und Benzol dagegen nicht (Tabelle 2).

Das ISCO-Verfahren mit Permanganat wird meistens zur Zerstörung der altlastenrelevanten, chlorierten Ethene PCE, TCE, DCE und VC eingesetzt. Hervorzuheben ist, dass bei der Oxidation mit Permanganat im Unterschied zur biologischen reduktiven Dehalogenierung keine schädlichen Zwischen- und Endprodukte entstehen.

Als wesentliche Nachteile von Permanganat ist die Braunsteinbildung, die sich vor allem in Böden mit geringer Durchlässigkeit negativ auswirkt, sowie der gegenüber Persulfat deutlich erhöhte SOD zu nennen.

### 3.2.2 Peroxodisulfat

Eine interessante Alternative oder eine Ergänzung zum Permanganat stellt das Oxidationsmittel Peroxodisulfat, das auch als Persulfat bezeichnet wird.

Persulfat ist ein stabiles Oxidationsmittel, kann über größere Strecken transportiert werden und verfügt damit ebenso wie Permanganat über einen ausgedehnten Wirkradius. Es hat ein Redoxpotenzial von 2,1 V und weist nur eine geringe Affinität zu organischen Bodenbestandteilen auf, so dass der Oxidationsmittelbedarf des Bodens bzw. der SOD gering ist. Durch die Verwendung von Katalysatoren, durch thermische Energie oder durch UV-Bestrahlung entsteht das Sulfat-Radikal (Petri et al. 2011), das ein sehr hohes Redoxpotenzial von 2,7 V aufweist (Tabelle 1). Bei der Schadstoffoxidation durch aktiviertes Persulfat handelt es sich um eine Radikalreaktion. Mit Hilfe von Persulfat lassen sich im Gegensatz zu Permanganat auch Benzol und PAK sowie Methane, Ethane und MTBE oxidieren.

Bei der Oxidation von Schadstoffen durch Persulfat entstehen ausschließlich wasserlösliche Endprodukte, was vor allem bei der Anwendung in gering durchlässigen Böden vorteilhaft ist.

### 3.2.3 Fenton's Reagens

Fenton's Reagens entsteht durch Aktivierung von  $\text{H}_2\text{O}_2$  mit  $\text{Fe}^{2+}$ -Ionen. Dabei entstehen Hydroxyl-Radikale mit einem sehr hohen Redoxpotenzial von 2,8 V (Tabelle 1). Das pH-Optimum der klassischen Fenton's Reaktion liegt bei 3-4. Mit Hilfe chelierter  $\text{Fe}^{2+}$ -Ionen lässt sich diese auch im neutralen pH-Bereich durchführen.

Fenton's Reagens hat ein sehr breites Anwendungsspektrum. Es zerstört alle Schadstoffe, die sich auch durch Permanganat und Persulfat oxidieren lassen. Die Fenton's Reaktion geht mit einer erheblichen Wärme- und Gasentwicklung in Form von  $\text{O}_2$  und  $\text{CO}_2$  einher und ist nicht ungefährlich.

Das Hydroxyl-Radikal ist sehr instabil und zersetzt sich rasch im Untergrund. Deshalb kann es nur über kurze Distanzen transportiert werden und hat damit einen geringen Wirkradius von wenigen Metern. Karbonate fungieren als Radikalfänger und können die Effizienz des Fenton's Reagenz beträchtlich mindern. Der Reaktionsmechanismus der Fenton's Reaktion beruht auf einer Radikalreaktion.

## 4. Weitere wesentliche Anwendungskriterien

Neben dem Schadstoffspektrum und dessen Konzentrationen sind die Geologie, Hydrogeologie und Hydrochemie eines Standorts weitere wesentliche Kriterien für eine erfolgreiche Anwendung des ISCO-Verfahrens.

### 4.1 Geologie

Wie bei den meisten In-situ Technologien hat die Durchlässigkeit des Untergrunds bzw. der schadstoffbelasteten Bereiche einen entscheidenden Einfluss auf die Erfolgsaussichten des ISCO-Verfahrens. Ideal sind naturgemäß homogen aufgebaute, gut durchlässige Böden. Ist der Untergrund jedoch wenig durchlässig oder geschichtet, sind spezielle Injektionstechniken erforderlich, um das Oxidationsmittel mit dem Schadstoff in Kontakt zu bringen.

ISCO wird in erster Linie in der wassergesättigten Bodenzone angewandt. In der ungesättigten Bodenzone ist es nur dann einsetzbar, wenn es möglich ist, das Oxidationsmittel durch Verrieselung oder Soil-Mixing zu den Schadstoffen zu transportieren.

Weist der Grundwasserleiter hohe Abstandsgeschwindigkeiten auf, kann das Oxidationsmittel aus den schadstoffbelasteten Bereichen abdriften, ohne dass es vollständig abreagiert hat. Um dies zu verhindern und Kosten einzusparen, sind Zirkulationssysteme sinnvoll, die das Oxidationsmittel unterstromig erfassen und oberstromig wieder reinfiltrieren (Abrecht 2014).

Bei einer geringen Aquifermächtigkeit genügt es meist, das Oxidationsmittel in einer bestimmten Tiefe zu injizieren. Weist der Aquifer eine größere Mächtigkeit auf, sind mehrere, tiefendifferenzierte Injektionspunkte oder ein Grundwasserzirkulationssystem vorzusehen, um den gesamten Grundwasserleiter mit Oxidationsmittel zu versorgen.

### 4.2 Geochemie

Liegt ein oxidierendes Milieu im Untergrund vor, so ist das günstig für eine ISCO-Anwendung. Bei einem reduzierenden Milieu dagegen ist mit einem erhöhten Verbrauch an Oxidationsmittel zu rechnen.

Bei der Oxidation von LCKW entsteht Salzsäure, die bei Böden mit geringer Pufferkapazität zu einer Absenkung des pH-Werts führt. Im weiteren Abstrom kommt es in den meisten Fällen wieder zu einer Angleichung an den ursprünglichen pH-Wert.

Der natürliche Organikgehalt (NOM) eines Bodens wirkt sich ebenfalls auf den Verbrauch an Oxidationsmittel (SOD) aus. Böden mit sehr hohem Anteil an Organik wie beispielsweise Torfböden lassen sich mit ISCO nicht wirtschaftlich sanieren.

## 5. Wie kommt das Oxidationsmittel zum Schadstoff?

Bei gut durchlässigen Böden erfolgt die Injektion des Oxidationsmittels in den Aquifer nahezu drucklos über Lanzen, konventionelle Brunnen oder Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB), (Abb. 2). Bei gering durchlässigen Böden sind spezielle Injektionstechniken erforderlich, um das Oxidationsmittel zum Schadstoff zu transportieren. Dazu zählen neben Direct Push und Fracturing (Schrauwen et al. 2021) insbesondere die Injektion über Manschettenrohre (Abb. 3). Mit dieser Technologie können Reagenzien nicht nur tiefendifferenziert und druckgeregelt zugegeben werden, damit sind auch wiederholte Injektionen

ohne großen technischen Aufwand möglich. In bestimmten Fällen kann das Oxidans auch durch Soil-Mixing mit dem schadstoffbelasteten Untergrund vermischt werden.

Die Injektion des Oxidationsmittels kann je nach standortspezifischen Bedingungen und technisch-wirtschaftlichen Aspekten in einzelnen Kampagnen oder kontinuierlich erfolgen.

Die Konzentration des Oxidationsmittels ist an die vorhandenen Schadstoffgehalte sowie an den Aufbau des Untergrunds anzupassen. Dies gilt insbesondere für Permanganat, das bei zu hohen Konzentrationen zu Verblockungen in Folge von Braunsteinbildung ( $\text{MnO}_2$ ) führen kann, die sich durch Reduktion zum  $\text{Mn}^{2+}$  wieder auflösen lassen.

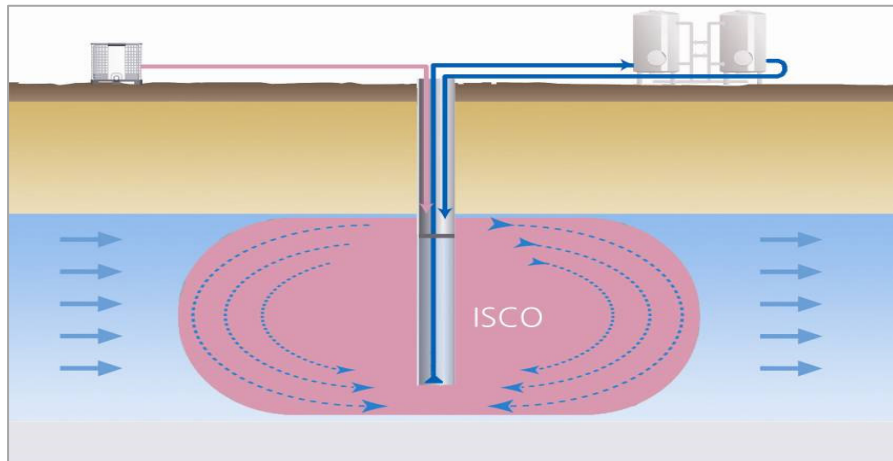


Abb. 2: GZB zur effizienten Verteilung von Oxidationsmittel in gut durchlässigem Aquifer

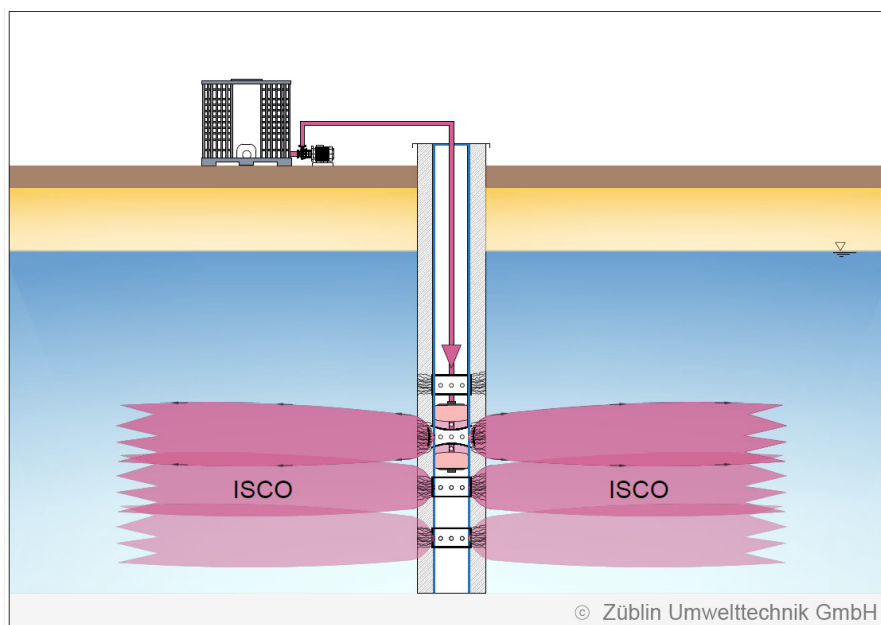


Abb. 3: Tiefendifferenzierte, druckgesteuerte Injektion über Manschettenrohre in gering durchlässigem Aquifer

## 6. Praxisbeispiele – Meilensteine

### 6.1 Erste großtechnische ISCO-Sanierung (2005-2008)

Im Jahre 2003 hat die ZÜBLIN Umwelttechnik mit Labor- und Felduntersuchungen begonnen, um die erste großtechnische ISCO-Sanierung in Deutschland an einem Standort der Automobilindustrie in Baden-Württemberg vorzubereiten (Abb. 4). Diese Quellensanierung eines LCKW-Schadens im gut durchlässigen Gipskeuperaquifer ( $k_f = 10^{-4}$  m/s) in 20-30 m unter Gelände wurde im September 2005 begonnen und innerhalb von 30 Monaten erfolgreich abgeschlossen (Edel et al. 2011). Als Oxidationsmittel wurde  $\text{NaMnO}_4$  eingesetzt, das über eine Brunnengalerie zugegeben und mittels Grundwasserentnahme und Reinfiltration im Schadensherd zirkuliert wurde. Insgesamt wurden rund 10.000 kg LCKW oxidativ zerstört, die Schadstoffkonzentrationen in der Quelle konnten um 98% reduziert werden. Dass diese In-situ Sanierung auch nachhaltig ist, belegen jährliche Grundwasseranalysen, die bis heute - rund 14 Jahre nach Beendigung der Maßnahme - durchgeführt werden (Edel 2021).



**Abb. 4:** Bohrarbeiten für die erste großtechnisch durchgeführte ISCO-Sanierung in Deutschland an einem Produktionsstandort der Automobilindustrie in Baden-Württemberg

### 6.2 Kombination ISCO / ISBR (2012)

Auf dem Standort der ehemaligen Silberwarenfabrik in Bremen wurden in der gesättigten Zone der Wesersande auf einer Fläche von ca. 12.000 m<sup>2</sup> massive Verunreinigungen durch leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW) mit Konzentrationen bis ca. 85.000 µg/l festgestellt. Der teilgespannte Aquifer hat einen Grundwasserflurabstand von 2 m und ist mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von  $k_f = 1 \times 10^{-3}$  bis  $5 \times 10^{-4}$  m/s gut durchlässig. Die mittlere Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$  beträgt 30 m/a.



Nach dem begrenzten Erfolg konventioneller Sanierungsmethoden war klar, dass sich dieser massive Grundwasserschaden aus technisch-wirtschaftlichen Gründen nur mit innovativen Verfahren sanieren lässt. Die Züblin Umwelttechnik GmbH hat im Rahmen eines Ideenwettbewerbs vorgeschlagen, die beiden Sanierungstechnologien In-situ chemische Oxidation (ISCO) und In-situ biologische Reduktion (ISBR) zu kombinieren, um die extrem hohen Schadstoffgehalte in einzelnen Teilbereichen mittels ISCO rasch zu reduzieren und die LCKW im mittleren Konzentrationsbereich durch ISBR weitgehend abzubauen (Abb. 5), (Edel et al. 2017).

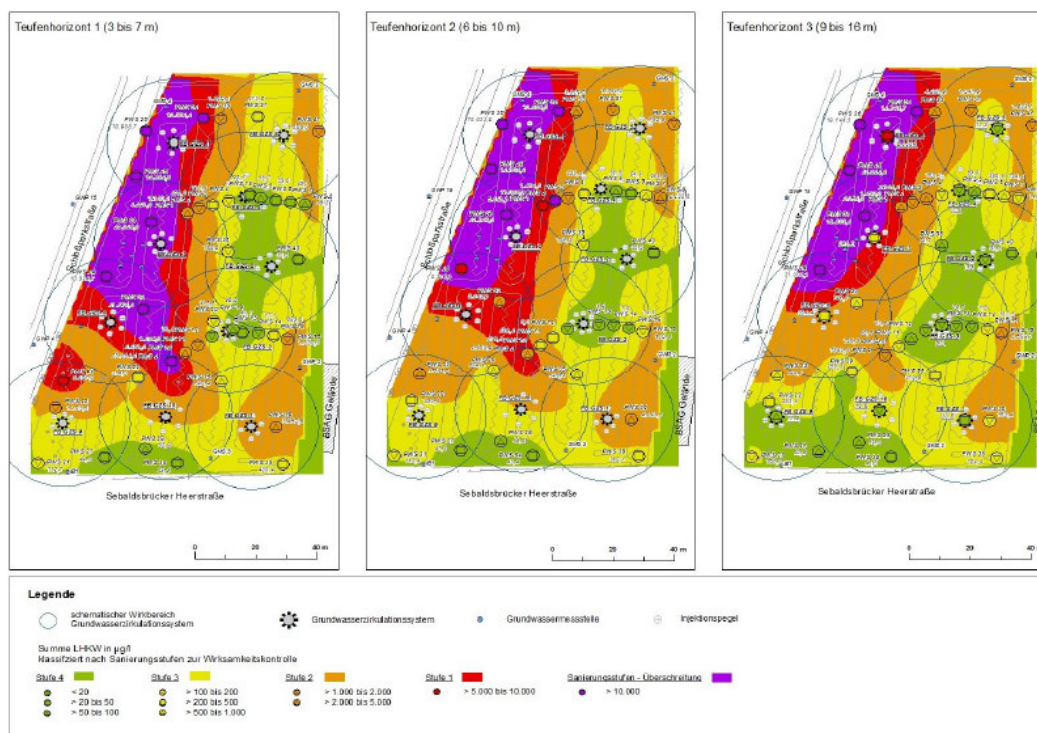
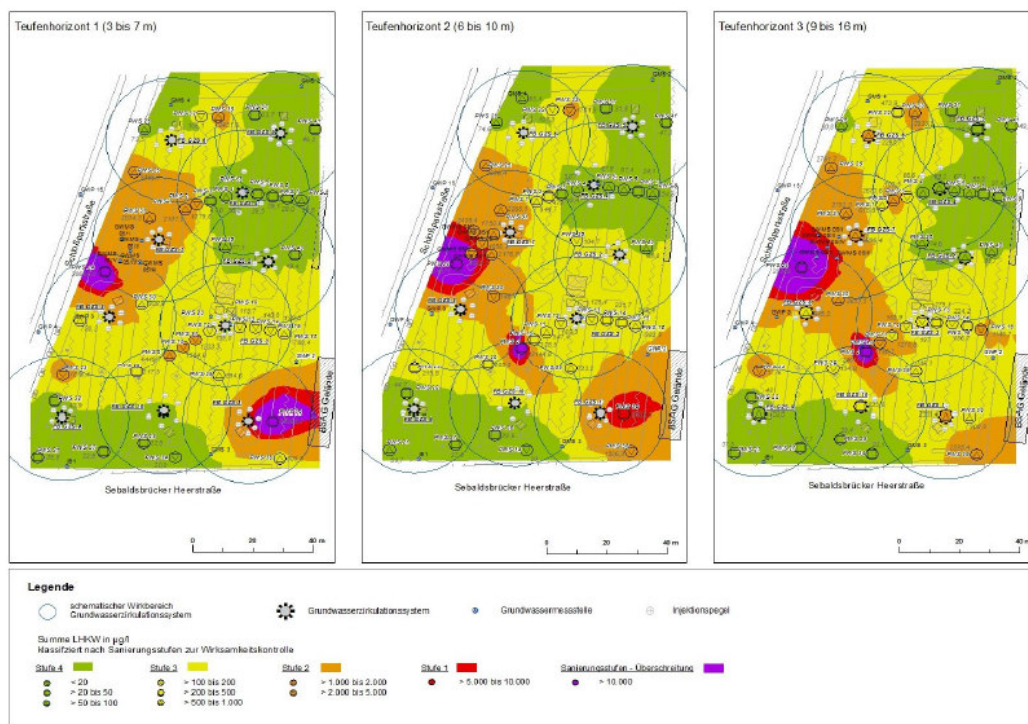
Um die Reagenzien  $\text{NaMnO}_4$  für ISCO und MolaZUT<sup>®</sup> als Kohlenstoffquelle für ISBR gleichmäßig im ca. 12-14 m mächtigen Aquifer zu verteilen, wurden auf dem Standort zehn Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB) errichtet, die einen radialen Wirkradius von 18-20 m besitzen. Damit wird der gesamte Schadensbereich sowohl horizontal als auch vertikal erfasst.



Abb. 5: Kombinierte ISCO/ISBR-Sanierung am Standort Bremen

Die Ergebnisse der LCKW-Untersuchungen zeigen, dass das kombinierte ISCO/ISBR-Sanierungsverfahren nicht nur technisch funktioniert, sondern auch überaus effizient arbeitet (Abb. 6, 7, 8) und somit große Potenzial besitzt. Lediglich im Bereich eines GZB sind derzeit noch erhöhte LCKW-Werte messbar. Zum Ende des Jahres 2022 werden die aktiven Sanierungsmaßnahmen beendet. Mittels eines Monitoringprogramms wird die Nachhaltigkeit der Maßnahme überwacht.



Abb. 6: LCKW-Konzentration in drei Tiefen nach  $t = 0$  MonatenAbb. 7: LCKW-Konzentration in drei Tiefen nach  $t = 20$  Monaten

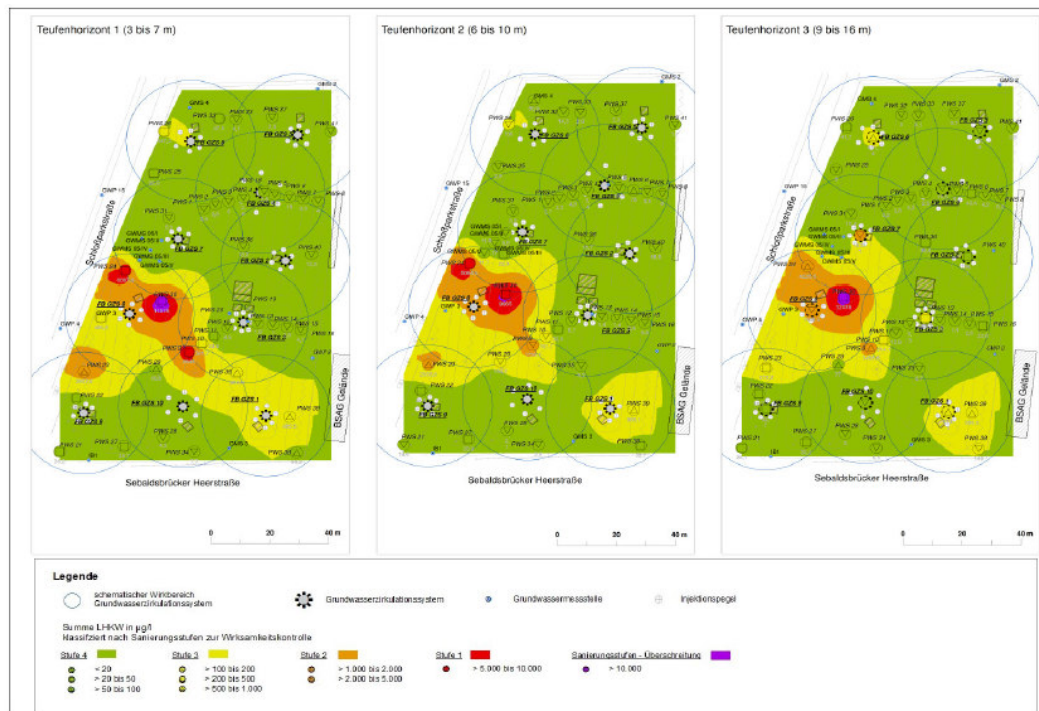


Abb. 8: LCKW-Konzentration in drei Tiefen nach  $t = 40$  Monaten

### 6.3 ISCO in gering durchlässigem Aquifer (2021)

Die Erfolgsaussichten von ISCO und anderen In-situ Technologien in gering durchlässigem Untergrund gelten bisher als limitiert. Die übliche Eingabe von Reagenzien über Brunnen oder Lanzen führt dazu, dass Oxidationsmittel über bevorzugte Fließwege transportiert werden, so dass die im dichten Untergrund angereicherten Schadstoffe nicht erreicht werden. Diese diffundieren langsam in besser durchlässige Zonen und führen zu einem Rebound. Das heißt, dass die Schadstoffgehalte wieder ansteigen, wenn die Oxidationsreaktion abgeschlossen ist.

Mit Hilfe von Manschettenrohren, lassen sich Reagenzien tiefendifferenziert und druckgesteuert über das verfügbare Porenvolumen in dichtem Untergrund verteilen. Das Manschettenrohr besitzt in regelmäßigen Abständen von 33 cm eine Perforation, die durch eine Gummimanschette mit Ventalfunktion abgedichtet ist (Abb. 9). Dieses Rohr wird in ein Bohrloch eingestellt und mit einem Magerbeton verfüllt, der unter Druck aufgesprengt wird. Anschließend kann das Reagenz über die Manschetten mittels Packer tiefendifferenziert im idealen Tiefenbereich injiziert werden. Auf diese Weise lässt sich der gesamte Sanierungsbereich sowohl horizontal als auch vertikal erfassen. Der Wirkradius ist abhängig vom Untergrund, vom Injektionsdruck und vom Injektionsvolumen. Wiederholte Injektionen von Oxidationsmittel sind ohne großen technischen Aufwand möglich und können an den Sanierungsfortschritt angepasst werden. Zu hohe Injektionsdrücke sind unbedingt zu vermeiden, ansonsten können Hebungen an der Oberfläche auftreten und das Manschettenrohr wird zerstört.





Abb. 9: Manschettenrohr und Packer zur tiefendifferenzierten Injektion von Reagenzien

Wir verfügen bereits über langjährige Erfahrungen mit Manschettenrohren zur Injektion verschiedener Kohlenstoffquellen für die In-situ biologischen Reduktion in gering durchlässigem Untergrund. Inzwischen haben wir diese interessante Injektionstechnologie auch zur In-situ chemischen Oxidation eines LCKW-Schadens in Baden-Württemberg sowie an einem Standort der chemischen Industrie im Großraum Lyon eingesetzt. In beiden Fällen liegen massive Belastungen durch organische Schadstoffe vor. Die Durchlässigkeit des Untergrunds ist gering, der  $k_f$ -Wert beträgt etwa  $10^{-6}$  m/s.

Vorangehende Laborversuche hatten bestätigt, dass sowohl Persulfat als auch Permanganat als Oxidationsmittel zur Zerstörung der vorliegenden Schadstoffe prinzipiell geeignet sind. Um Verblockungen und eine Reduzierung des verfügbaren Porenraums im dichten Untergrund zu verhindern, wurde jedoch Persulfat eingesetzt, das bei der Oxidation ausschließlich wasserlösliche Endprodukte erzeugt. Im Gegensatz dazu entsteht bei der Oxidationsreaktion mit Permanganat unlöslicher Braunstein, was insbesondere bei gering durchlässigen Böden nachteilig ist. Die Pilotversuche mit Persulfat verliefen erfolgreich und ohne nennenswerten Rebound, so dass beide Projekte als Full-Scale Sanierung fortgesetzt werden.

## 7. Literatur

- ABRECHT J (2014) Eine CKW-Grundwassersanierung – ein Fallbericht, Swiss Bull. angew. Geol. Vol. 19/1, 2014, 85-108
- EDEL H-G (2021) Case Study: ISCO n.15. in: In-situ Chemical Oxidation – Case studies, eds. European Union Network for the Implementation and Enforcement of Environmental Law, IMPEL Project no. 2020/09, 184-204

- EDEL H-G, RUITER E.-H, WESSEL U, KONERTZ K, VON MÜCKE T, LEVERMANN L (2017) Kombinierte In-situ-Sanierung mit ambitionierten Zielen, *altlasten spektrum* 3/2017, 85-90, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- EDEL H-G (2016) Voraussetzungen für die erfolgreiche Anwendung der In-situ Chemischen Oxidation (ISCO), Fachtagung In-situ-Sanierung von Altlasten - ökologisch und ökonomisch sinnvoll | Assainissement in situ – solution économique et écologique pour les sites contaminés, Veranstalter BAFU
- EDEL H-G, FRIEDRICH M, GERWECK H, STÄBLEIN H, MAIER-OßWALD W (2011) In-situ chemische Oxidation (ISCO) Erfahrungen aus einer erfolgreichen Herdsanierung, *Handbuch der Altlastensanierung*, 3. Aufl.
- HULING, S.G, PIEVITZ, B.E (2006) In-Situ Chemical Oxidation, 1-58, Engineering Issue, EPA United States Environmental Protection Agency
- PETRI B.G, WATTS R.J, TSITONAKI, A, CRIMI M, THOMSON N.R, TEEL, A.L (2011) Fundamentals of ISCO using persulfate, Chapter 4, 147-191, in: R.L. Siegrist et al. (eds.) *In Situ Chemical Oxidation for Groundwater Remediation*, doi: 10.1007/978-1-4419-7826-4\_4, © Springer Science+Business Media, 2011
- SCHRAUWEN G, ROTSCHOLL J, SIMONE L, HELD T (2021) ISCO mit Fracturing in gering durchlässigem Bodenbereich. Erkenntnisse auf Basis eines Praxisbeispiels, *altlasten spektrum* 5/2021, 166-171