

# **LISA – Leistungsgesteigerte in-situ Sanierung mittels Verfahrenskombination („LKB“)**

## **Impressum**

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber: -

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Autorinnen und Autoren: DI R. Phillip, DI Dr. R. Patek, TERRA Umwelttechnik GmbH

Gesamtumsetzung: DI R. Phillip

Fotonachweis: DI Carmen Kriegler (Portrait Robert Phillip)

Druck: -

Wien, 2020. Stand: 16. März 2021

### **Copyright und Haftung:**

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des Bundeskanzleramtes und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorin/des Autors dar und können der Rechtsprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an [robert.phillip@terra.cc](mailto:robert.phillip@terra.cc)

## Vorwort



DI Robert Phillip

Altlastensanierung in Österreich geht langsam aber sicher den Weg in Richtung in-situ Sanierungen. Dank jahrelanger Bemühungen von ÖVA, KPC, Ministerium und unzähliger Vertreter/innen von Akademia und Wirtschaft gelingt es mehr und mehr Mittel für die Altlastensanierung durch in-situ Sanierungen effizienter einzusetzen und so mehr Sanierung je Euro zu erreichen. Trotzdem gibt es immer wieder Altlasten, die auf Grund ihrer geologischen und kontaminationsbezogenen Randbedingungen prinzipiell gut in-situ sanierbar wären, aber – aufgrund ihrer alluvialen Genese - mehr oder weniger große Bereiche mit bindigen Böden aufweisen, welche sich gewöhnlich einer in-situ Sanierung weitgehend entziehen. Diese oft auch nur sehr kleinräumigen Bereiche tragen in sich das Potential, nach einer sehr erfolgreichen Sanierung der gesamten Altlast sehr kleinräumig als sekundäre Quelle zu wirken und so den Erfolg der Sanierung kurz- bis mittelfristig zu gefährden.

Diesen Bereichen wurde die vorliegende Arbeit gewidmet. Ziel ist nicht eine Vollsanierung dieser Bereiche, sondern lediglich diesen zumeist kleinräumigen Schlufflinsen das Potential als sekundäre Quelle wegzunehmen, um so einen langfristig stabilen Gesamtzustand der Altlast zu erreichen. Das ist gelungen!

DI Robert PHILLIP

Geschäftsführer TERRA Umwelttechnik GmbH

## Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Ausgangssituation und Zielsetzung</b> .....	<b>5</b>
<b>2 In situ Verfahren zur Sanierung und Sicherung von Mineralölkontaminationen</b> .....	<b>7</b>
2.1 Aufgabenstellung von LKB .....	7
2.2 Wirkungsweise von LKB .....	8
2.3 Schadensbild .....	10
2.4 Sanierungs- und Sicherungsziele .....	11
<b>3 Einsatzbereiche und Einsatzrandbedingungen (ERB)</b> .....	<b>13</b>
3.1 Ausbreitbarkeit .....	13
3.2 Abbaubarkeit .....	16
3.3 Zusammenfassung Einsatz von LKB .....	20
<b>4 Vorversuche</b> .....	<b>21</b>
4.1 Ziele der Vorversuche .....	21
4.2 Stufe 1: Abbauprobieren im Labor.....	21
4.3 Stufe 2: Feldversuch: Bruch/Wiederbruch-Versuch .....	28
<b>5 Verfahrensbeschreibung</b> .....	<b>33</b>
5.1 Dimensionierung des Gesamtsystems.....	35
5.2 Technische Einrichtungen .....	36
5.3 Monitoring .....	38
5.4 Sanierungsdauer .....	40
5.5 Erreichbare Restkontamination.....	40
5.6 Kosten (Investitionen, Betriebsmittel) .....	40
<b>6 Nutzung / Nachnutzung</b> .....	<b>42</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>43</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>44</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>46</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>50</b>

# 1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Mit den erarbeiteten Ergebnissen soll eine Verbreiterung der Anwendungsbasis von in-situ Sanierungsverfahren bei Kohlenwasserstoffschäden in feinkörnigen, dichten Böden ermöglicht werden.

Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) stellen mit halogenierten Kohlenwasserstoffen die beiden häufigsten Schadstoffgruppen an kontaminierten Standorten und Altlasten in Österreich dar (Umweltbundesamt, 2019).

Für diese Schadstoffgruppen wurde in den letzten beiden Jahrzehnten verstärkt versucht, In-Situ- Sanierungsverfahren zur Beseitigung der Kontaminationen anzuwenden.

In der Praxis stößt man bei der Umsetzung allerdings immer wieder auf Einschränkungen, da es kein In-Situ- Verfahren gibt, das immer und überall anwendbar wäre. Aus diesem Grund werden an einem Standort zumeist verschiedene In-Situ- Verfahren parallel und/oder hintereinander eingesetzt, um die Nachteile eines Verfahrens durch ein anderes Verfahren zu kompensieren.

Trotzdem bestehen auch bei Verfahrenskombinationen immer noch Problembereiche, wie zum Beispiel bei Standorten mit stark heterogenem geologischen Sichtaufbau des Untergrundes dar, wie sie häufig in alluvial geprägtem Umfeld zu finden sind.

Diese Standorte weisen meist einen raschen horizontalen Wechsel von gut durchlässigen Böden, gefolgt von sehr feinkörnigen, dichten Bereichen auf, welche für die üblichen In-Situ-Sanierungstechnologien schwer zugänglich sind. Als Folge verbleibt in solchen dichten Bereichen eine größere Schadstoffmenge, was den Sanierungserfolg insgesamt gefährden kann.

Ziel des Projektes „LISA“ war daher, bestehende Sanierungstechnologien auf diese Art von Untergrundbereichen derart anzupassen, um bei künftigen Sanierungen Handwerkszeug zur Verfügung zu haben, auch feinkörnige Bereiche wirkungsvoller als bisher bearbeiten zu können

Diese Verbreiterung der Anwendungsbasis kann erreicht werden durch:

- ein Abbausystem, welches die Kontaminanten in-situ durch chemische Oxidation oder anaerob mikrobiellen Abbau neutralisiert und / oder
- ein Transportsystem, welches in diesen problematischen dichten Bereichen entweder die Kontaminanten effektiv abführen oder Behandlungsmedien (Agenzien) für den Abbau zuführen kann

Dies bedeutet in der Folge eine Anwendung auf bisher nicht in-situ sanierbare Schäden oder Schadensteile.

Überwacht werden alle Arbeiten im Feld über ein automatisiertes Monitoring, um die Prozesse im Untergrund für die Reproduzierbarkeit möglichst umfangreich dokumentieren zu können.

In der vorliegenden technischen Arbeitshilfe sind die Ergebnisse der Laborvorversuche zusammengefasst sowie die Ergebnisse des Feldversuches dargestellt. In einem Ausblick wird auf weitere Entwicklungsmöglichkeiten hingewiesen.

# 2 In situ Verfahren zur Sanierung und Sicherung von Mineralölkontaminationen

## 2.1 Aufgabenstellung von LKB

Laut Verdachtsflächenkataster des Umweltbundesamtes existieren derzeit in Österreich 1.881 Verdachtsflächen, wobei 966 davon Altablagerungen und 915 Altstandorte sind. Am zweithäufigsten sind dabei Kontaminationen mit Mineralölkohlenwasserstoffen festzustellen. Zudem weisen viele Standorte im alluvial geprägten urbanen Umfeld öfters einen stark heterogen aufgebauten Untergrund auf, die teils Zonen aufweisen, in denen In-Situ- Sanierungen nur unter erschwerten Bedingungen stattfinden können. Die österreichische Altlastensanierung schwenkt seit etwa 10 Jahren langsam mehr in Richtung In-Situ- Sanierungen im Sinne eines effizienten Mitteleinsatzes vor dem Hintergrund enger werdender Budgets durch fallende Altlastenbeiträge.

Nun gibt es aber immer wieder Altlasten, die auf Grund ihrer geologischen und kontaminationsbezogenen Randbedingungen prinzipiell gut in-situ sanierbar wären, aber – aufgrund ihrer alluvialen Genese - mehr oder weniger große Bereiche mit bindigen Böden aufweisen, welche sich gewöhnlich einer in-situ Sanierung weitgehend entziehen. Diese – oft auch nur sehr kleinräumigen Bereiche – tragen in sich das Potential, nach einer sehr erfolgreichen Sanierung der gesamten Altlast, sehr kleinräumig als sekundäre Quelle zu wirken und so den Erfolg der Sanierung kurz- bis mittelfristig zu gefährden.

Diesen Bereichen wurde die vorliegende Arbeit gewidmet. Ziel ist nicht eine Vollsanierung dieser Bereiche, sondern lediglich diesen zumeist kleinräumigen Schlufflinsen das Potential als sekundäre Quelle wegzunehmen, um so einen langfristig stabilen Gesamtzustand der Altlast zu erreichen.

Das Vorliegen solcher Problembereiche verursacht derzeit, dass solche prinzipiell gut in situ sanierbaren Altlasten doch mittels ex situ Sanierungen saniert werden (mit einem wesentlich erhöhten Aufwand) oder verbleiben – vorerst - unsaniert.

In einem anderen Szenario werden solche kleinräumigen dichten Bereiche in der Vorerkundung nicht bemerkt oder unzureichend interpretiert. In diesem Fall ist es wahrscheinlich, dass auch nach einer im Wesentlichen sehr erfolgreichen In-Situ-Sanierung der zugänglichen und In-Situ- gut sanierbaren Bereiche diese kleinräumigen nicht zugänglichen Bereiche über relevante Zeiträume hinweg als sekundäre Quellen fungieren und eine bereits erfolgreiche Sanierung mittelfristig rekontaminieren.

Das vorliegende Verfahren „LKB“ erschließt daher bei ca 1/4 bis 1/3 der Verdachtsflächen in Österreich:

- bisher In-Situ- nicht sanierbare Altlasten doch In-Situ- zu sanieren und somit deutlich günstiger zu gestalten sowie
- auch bisher bereits In-Situ- sanierbare Altlasten in ihrer Umsetzungsphase zu beschleunigen und zu verbessern, was ebenfalls deutliche Einsparungen bei diesen bewirken wird.
- die Möglichkeit zu wesentlichen Einsparungen bei den Kosten von Altlastensanierungen bei gleichzeitiger effizienter – und doch vollständiger – Sanierung
- die Umsetzung bisher in der Wissenschaft etablierter Monitoringmethoden in die kommerzielle Anwendung und damit ein vertieftes Verständnis der Vorgänge In-Situ-, was eine verbesserte Steuerung ebendieser Vorgänge ermöglicht bei gleichbleibenden oder fallenden Kosten gegenüber konventionellen Monitoringmethoden
- die Möglichkeit durch verkürzte Sanierungszeiten bisher für In-Situ- nicht infrage kommende Verdachtsflächen und Altlasten zu behandeln.

## 2.2 Wirkungsweise von LKB

Die Umsetzung von In-Situ- Sanierungsverfahren stößt in der Praxis immer wieder auf Einschränkungen, da es kein In-Situ- Verfahren gibt, das als Allheilmittel immer und überall anwendbar wäre. Aus diesem Grund werden verschiedene In-Situ- Verfahren zumeist an einem Standort eingesetzt, um die Nachteile eines Verfahrens durch ein



anderes Verfahren zu kompensieren. Trotzdem bestehen auch bei Verfahrenskombinationen immer noch Problembereiche. Ein solches Problem stellen dabei Standorte mit stark heterogenem geologischen Sichtaufbau des Untergrundes dar, wie sie häufig in alluvial geprägtem Umfeld vieler österreichischer Großstädte und Industriegebiete zu finden sind. Diese Standorte weisen meist einen raschen horizontalen Wechsel von gut durchlässigen Böden, gefolgt von sehr feinkörnigen, dichten Bereichen auf, welche für die üblichen In-Situ- Sanierungstechnologien eher schwer zugänglich sind. Als Folge verbleibt in solchen dichten Bereichen eine größere Schadstoffmenge, was den Sanierungserfolg insgesamt gefährdet. Des Weiteren werden in der Sanierungspraxis oftmals sehr enge zeitliche Anforderungen an die Sanierung seitens der Auftraggeber gestellt. In der Regel ist der Fortschritt des biologischen Abbaus von Schadstoffen jedoch an der Höhe der Ausgangskontamination sowie an deren Bioverfügbarkeit und den vorherrschenden Milieubedingungen geknüpft. In beiden Fällen stellt sich somit die Frage, inwieweit eine Leistungssteigerung der In-Situ- Sanierung mittels verbesserter Kombination geeigneter Sanierungstechnologien erreicht werden kann.

Es können in situ Verfahren nach zwei unterschiedlichen Grundprinzipien betrieben werden:

- Austrag
- Abbau

Beim Austrag wird der kontaminierte Boden über die Medien Bodenluft und/oder Grundwasser entfrachtet, wobei diese Medien aus dem Schadensbereich transportiert werden. Mit diesen Medien wird Schadstoff abtransportiert, welcher über die Geländeoberfläche aus diesen Medien entfernt wird (z.B. pump and treat Maßnahmen oder Bodenluftsanierung).

Beim Abbau wird der Schadstoff (Kohlenwasserstoff) direkt am Ort der Kontamination ab- oder umgebaut.

Beim biologischen Schadstoffabbau werden durch mikrobielle Vorgänge organische Substanzen in die Endprodukte Kohlendioxid und Wasser umgewandelt. Für diese Reaktion wird ein Elektronenakzeptor (z.B. Sauerstoff, Nitrat, Sulfat) benötigt, wobei die meisten Kohlenwasserstoffe am effektivsten im Beisein von Sauerstoff abgebaut werden können. Es existieren jedoch auch genügend anaerobe Abbaupfade. Ihnen allen ist

gemeinsam, dass sie deutlich langsamer vonstattengehen als aerobe Abbauvorgänge, aber dafür keinerlei aktive Belüftung benötigen.

Der chemische oder physikalische Schadstoffabbau spielt – derzeit – bei LKB keine Rolle und wird daher hier nicht betrachtet.

LKB ist nun ein Verfahren, welches bekannte Mechanismen des biologischen Schadstoffabbaus und des Spezialtiefbaus zu einem Verfahren verbindet und so eine bestehende Lücke schließt. Um LKB anzuwenden benötigt man ein Transportsystem, um ein effektives Reagenz zum Wirkungsort zu bringen sowie ein Abbausystem um Schadstoff am Ort abzubauen. Für LKB wurde das Transportsystem Subfrac gewählt. Hierbei wird mit geringem Überdruck in einem langsamen aber konstantem Vorgang der gesamte zu behandelnde Bereich mehr oder weniger gleichmäßig mit Behandlungsreagenz getränkt OHNE die strukturelle Integrität der Bodenstruktur in Mitleidenschaft zu ziehen. Einmal am Ort der Wirkung entfaltet dieses Reagenz – im Falle von LKB ein Nitrat – seine Wirkung OHNE WEITERES ZU TUN! Dass dieser, somit anaerobe, Abbaupfad langsam ist, wird durch das Ziel kompensiert nicht den gesamten Schadstoffpool abzubauen, sondern lediglich hinreichend viel, um ein „Ausbluten“ der kontaminierten Bereiche in bereits dekontaminierte Bereiche zu unterbinden.

## 2.3 Schadensbild

Prinzipiell sind mit dem Verfahren LKB alle biologisch abbaubaren Kontaminanten abbaubar. Die größte Gruppe hierunter - und somit die mit den meisten und am besten untersuchten Schadensfällen - sind die Schadstoffe, welche unter „Mineralölkohlenwasserstoffe“ zusammengefasst werden können. Diese Gruppe wurde – vorerst - im Zuge der Entwicklung von LKB ausschließlich betrachtet. Es ist zwar wahrscheinlich, dass LKB auch auf andere Kontaminanten wirkt – jedoch noch nicht erprobt oder gar bewiesen.

Unter "Mineralölkohlenwasserstoffen" versteht man Rohöl, sowie die unter Normalbedingungen flüssigen Verarbeitungsprodukte der Rohöle wie Ottokraftstoffe, Mitteldestillate (leichtes Heizöl, Dieselmotorenkraftstoff), schweres Heizöl sowie Produkte weiterer Verarbeitung und Altöle. Es handelt sich dabei um komplexe Stoffgemische, die sich in ihren Eigenschaften grundlegend voneinander unterscheiden. Benzin als leicht flüchtige Fraktion des Mineralöls beinhaltet einen relativ hohen Anteil an Monoaromaten.

Bei Diesel handelt es sich um ein Mitteldestillat mit einem Siedebereich bis 350°C. Rohöl beinhaltet das gesamte Spektrum an Kohlenwasserstoffen. Je nach Art der Kontamination ist mit unterschiedlichem Verhalten der Substanzen im Boden zu rechnen und demzufolge sind unterschiedliche Sanierungsstrategien anzuwenden. Erprobt wurde LKB im Kontext einer Dieselkontamination. Auch hier gilt nun, dass die Wirksamkeit für andere Mineralölkontaminaten höchstwahrscheinlich gegeben sein wird – jedoch ebenfalls noch nicht erprobt oder bewiesen ist. Es beziehen sich daher alle in weiterer Folge gemachten Angaben – speziell Abbaudauern, Konzentrationen etc. - ausschließlich auf den Kontaminanten Diesel.

Das Schadensbild, für das LKB entwickelt wurde, sind nun also dieselkontaminierte Feinkornlinsen geringer Durchlässigkeit und geringen Ausmaßes (wenige Meter) in einer alluvialen, ansonsten eher gut durchlässigen Sand/Kies Umgebung.

## 2.4 Sanierungs- und Sicherungsziele

Das Ziel von LKB ist es den beschriebenen Feinkornlinsen das Potential zu nehmen eine erfolgte in-situ Sanierung der gesamten Liegenschaft teilweise zu rekontaminieren. Es handelt sich definitionsgemäß also um eine SICHERUNG dieser kleinräumigen Bereiche um die SANIERUNG des gesamten Standortes zu ermöglichen. Ob das Gesamtprojekt, in welches LKB einzubetten ist, insgesamt als Sicherung oder Sanierung zu bewerten ist, hängt also nicht vom sehr kleinen Teileinfluss der Feinkornlinsenbehandlung ab, sondern ist im Kontext des Gesamtprojektes zu bewerten.

Das Ziel für die mittels LKB zu behandelnden Bereiche ist also jedwede Fließbewegung von Kontaminant aus dem Feinkornbereich zu unterbinden und auch das Elutionspotential zu reduzieren. Es kann daher keine numerische Konzentration angegeben werden, sondern ein solches Ziel ist unter ingenieurmäßigem Abwiegen der Randbedingungen des Sanierungsfalles durch den bearbeitenden Planer bzw. den (Amts-)Sachverständigen festzulegen. Wesentliche hierbei zu betrachtenden Einflussrandbedingungen sind:

- Relevante Residualsättigung des Kontaminanten in Abhängigkeit von intrinsisch vorhandener Saugspannung der Feinkornmatrix
- Lage des Feinkornbereiches im Untergrund und dadurch bedingt dessen Exposition gegenüber potentiell eluierenden Regen- oder Grundwasserströmen

- Erreichter bzw. beabsichtigter Abbaugrad und damit die langfristig Bio- und Elutionsverfügbarkeit des verbleibenden Kontaminationsrestes bzw. auch des langfristig verbleibenden Reagenzmittels

# 3 Einsatzbereiche und Einsatzrandbedingungen (ERB)

Im Wesentlichen beruht der Einsatz von LKB auf zwei Grundbedingungen:

- Hinreichend homogene Ausbreitbarkeit des Reagenzes in hinreichender Geschwindigkeit
- Abbauende Wirkung des Reagenzes auf den Kontaminanten, mit dem es tatsächlich auch in Kontakt kommt

Im Detail wurden im Zuge der Entwicklung von LKB im Projekt LISA die Einsatzrandbedingungen wie folgt aufgeklärt:

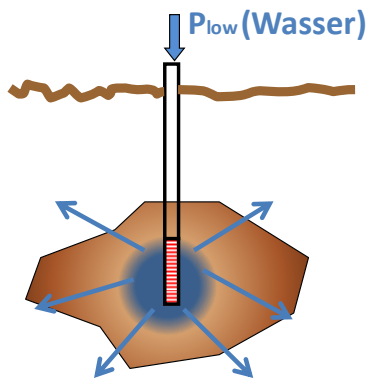
## 3.1 Ausbreitbarkeit

Von den untersuchten Transportmechanismen erwies sich das System Subfrac als am geeignetsten. Das System Subfrac bedeutet, dass mit mildem Druck Fluid in den Boden gepresst wird, so dass dieses sich möglichst gleichmäßig ausbreiten kann und im Wesentlichen alle Bodenporen mittels konvektivem Fluidtransport erreicht.

Abgrenzung Frac / Subfrac System

Subfrac System:

### a) Extraktion



### b) Injektion

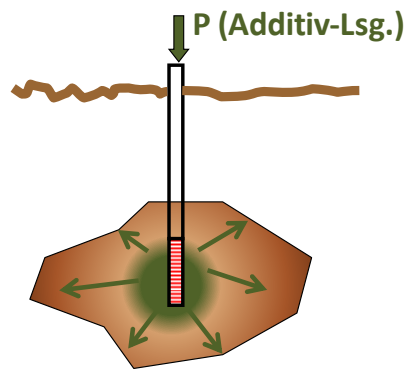


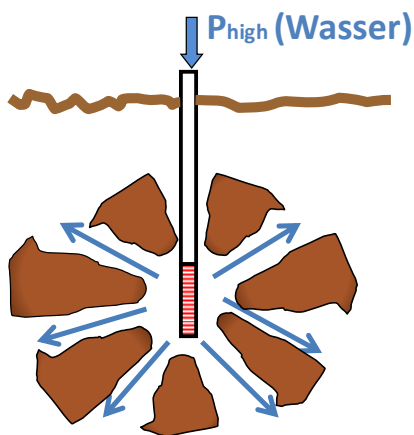
Abb. 1: Behandlung von Schluffflinsen mittels Subfrac-Transport

Unter Subfrac wird eine kontrollierte Druckspülung unterhalb der Bruchspannung des behandelten Bodens verstanden. Diese führt geringfügig zu einem physikalischen Schadstoffaustrag (Extraktion). Hauptsächlich soll das Behandlungsmittel (Reagens) an den Ort seiner Wirkung in hinreichend homogener Verteilung und in hinreichender Konzentration transportiert werden (Injektion).

Frac System:

### Frac

Schritt 1



### Migration

Schritt 2

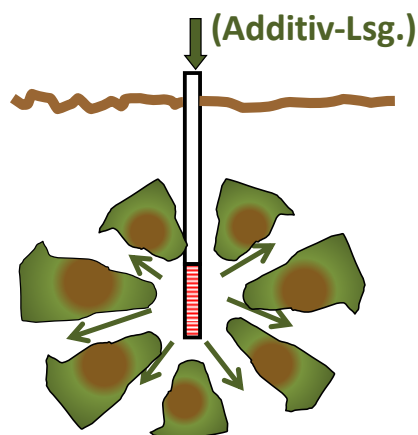


Abb. 2: Behandlung von Schluffflinsen mittels Frac-Migration

Im Gegensatz dazu wird unter der Frac-Methode eine kontrollierte Druckspülung oberhalb der Bruchspannung des behandelten Bodens verstanden. Sie dient zur Herstellung von Bruchflächen (bevorzugt wäre gleichmäßig und horizontal) im Abstand von etwa 2-3 Ebenen je Meter Teufe. In diesen Bruchflächen lässt sich unter Druck sehr gut ein Fluss von Sanierungsfluid etablieren. Diese hergestellten Wegsamkeiten dienen dann als Ausgangsebenen für extrem verkürzte – und sohin massiv beschleunigte – Diffusionsvorgänge. Die Frac-Methode ist also eigentlich eine Diffusionsmethode, bei der durch die künstlich geschaffenen Fracs die Diffusionsstrecken dramatisch verkürzt werden und die Methode so wirtschaftlich anwendbar wird.

Im Zuge des Projektes LISA erwies die Frac Methode basierend auf derzeitigem Entwicklungsstand keine hinreichende Prognosemöglichkeit für Richtung und Dichte der erzeugten Fracs – und somit keine hinreichende Prognosemöglichkeit für Abbauvorhersagen.

Es zeigte sich aber die anzulegende Bruchspannung um zwischen dem Frac und Subfrac Verfahren zu unterscheiden als sehr genau im Feld messbar.

Warum ist diese Unterscheidung so wichtig?

Es ist in der Literatur und in der täglichen Anwendungspraxis der Zugang „viel hilft viel“ recht verbreitet. Wenn also eine Infiltration eines dichten Bodens zu lange dauert, so liegt die Idee den Verpressdruck zu erhöhen um den Vorgang zu beschleunigen nicht weit entfernt. Dies wird auch von sichtbarem „Erfolg“ gekrönt sein, weil die zu verpressende Fluidmenge mittels höheren Drucks tatsächlich schneller im Boden verschwindet. Allerdings wurde nachgewiesen, dass bei gängigen Überlagerungsdrücken von unter 10m Bodenauflast die vorhersagbare und feldmessbare Bruchspannung von Schlufflinsen bei ca 0,6bar liegt! Diese Bruchspannung ist hauptsächlich abhängig von der Kohäsion C des feinkörnigen Bodens und dem Überlagerungsdruck („Formationsdruck“). Das bedeutet, dass z.B. bei einer Pegeltiefe von 7m und einer Wassersäule bis zur Oberfläche diese kritische Spannung bereits überschritten würde! Dadurch bilden sich in weiten Teilen der Schlufflinse Fracs – also bevorzugte Wegigkeiten und >90% des teuren Sanierungsfluides verschwinden zumeist unbemerkt außerhalb des Zielgebietes!

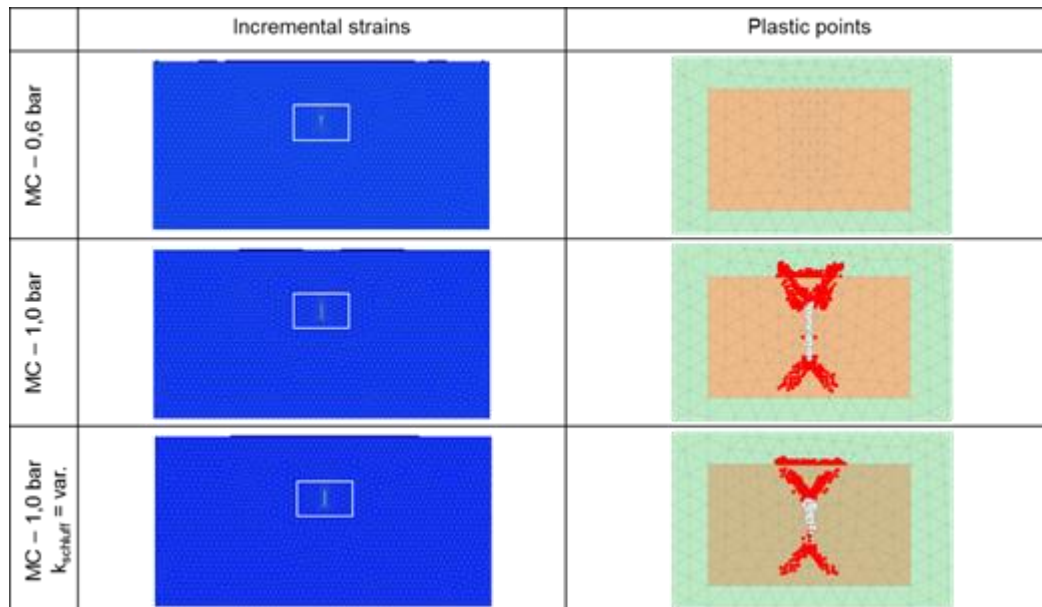


Abb. 3: Mechanisches Verhalten einer Schlufflinse bei unterschiedlichem Einpressdruck MC der injizierten wässrigen Lösung (Quelle: Bericht TU Graz)

Es ist daher von wesentlicher Bedeutung für LKB, dass die gegen vorgegebene Bruchspannung im Feld gemessen UND während des gesamten Applikationsvorganges ZU KEINER ZEIT überschritten wird! Die Feldmessung dieser Bruchspannung wird in Kapitel 5 näher erläutert.

### 3.2 Abbaubarkeit

Grundsätzlich können wahrscheinlich alle biologisch abbaubaren, organischen Schadstoffe durch LKB abgebaut werden. Erprobt ist die Methode bis dato lediglich für Diesel bzw. diesem Mitteldestillat sehr verwandte Kontaminanten.

Anaerob mikrobielle Schadstoffdegradation:



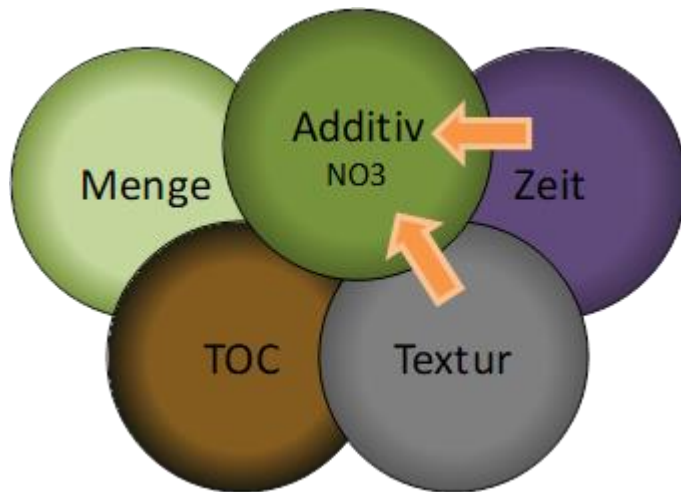


Abb. 4: Einflußfaktoren: anaerob mikrobielle Behandlung mit chemischen Additiven

Die in Abb. 4 gezeigten und im Projekt LISA betrachteten Faktoren zeigten alle einen statistisch signifikanten Einfluss auf das Abbauergebnis, wenngleich sich jene Einflüsse teils spezifisch in Bezug auf das eingesetzte Behandlungsmittel ausprägten. In einer qualitativen Abschätzung der Faktoreinflüsse kann folgende Reihenfolge getroffen werden: Reagens > Konzentration > Zeit > TOC > Textur

Aus diesem Grund wurde das Behandlungsmittel festgelegt als Nitrat. Mit diesem Zusatz wurden die besten – und günstigsten – Ergebnisse erzielt.

Die anzuwendende Konzentration ergibt sich aus den Vorversuchen gemäß Kapitel 4.

Die benötigte Zeitdauer für Zugabe und Abbau wurde auf Basis von Vorversuchen abgeschätzt. TOC Gehalt und Textur des Bodens sind nicht beeinflussbare Randbedingungen. Sie können daher nicht geplant werden, sind aber beeinflussende Randbedingungen, deren Auswirkung im Zuge der Vorversuche und der Planung abgeschätzt werden muss. Die durch diese Abschätzung beeinflussten steuerbaren Parameter sind Konzentration und Zeitdauer – wobei hier das eine durch das andere in engen Grenzen tauschbar ist.

#### Schadstoffverfügbarkeit

Hydrophobe Schadstoffe neigen dazu, mit dem Boden bzw. seiner organischen Substanz Bindungen einzugehen. Die somit gebundenen Substanzen sind für Mikroorganismen

nicht oder nur eingeschränkt verfügbar, wodurch der biologische Abbau verzögert bzw. unterbunden werden kann. Im Normalfall ist in den betrachteten Feinkornlinsen der Gehalt an organischer Substanz (TOC) manchmal erheblich und sein Einfluss ist daher zu berücksichtigen. Da jedoch die Sorption ein langfristig stabiler Zustand ist, sind die sorbierten – und somit einem Abbau wenig zugänglichen – Anteile der Kontamination als neutral zu beachten, da deren Abbau nicht Ziel des Verfahrens ist.

### Durchlässigkeit

Als untere Grenze der Durchlässigkeit für LKB sind Böden mit Durchlässigkeitsbeiwerten ( $k_f$ ) von  $10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  (Feinsand/Schluff) anzusehen. Dieser wird im Zuge des Bruchversuches mitbestimmt und kann vorab aus der Kornverteilung abgeschätzt werden. Da es sich um alluviale Ablagerungen handelt, sind zumeist horizontale Zwischenlagen mit höheren oder geringeren Durchlässigkeiten möglich bis wahrscheinlich. Solche Zwischenlagen sind zulässig. Ob sie einen wesentlichen negativen Einfluss haben kann ebenfalls im Zuge des Bruchversuches mitbestimmt werden (siehe Kapitel 4). Anzumerken ist noch, dass bei asymmetrischer Verteilung der Durchlässigkeiten es um den (die) Ausbreitungspegel zu einer stark einseitigen Wirkung des Verfahrens kommen kann, weshalb die Untergunderkundung sehr sorgfältig und genau auszuführen ist.

### Temperatur

Bei in Österreich „üblichen“ Untergrundtemperaturen von  $10\text{-}14^\circ\text{C}$  sind zufrieden stellende stabile Abbauraten zu erwarten, so keine anderen Parameter limitierend wirken. Es wird aber darauf hingewiesen, dass Laborabbauversuche unter Labor Temperaturen aus diesem Grund nicht direkt auf Feldergebnisse umlegbar sind.

### Nährstoffe

Mikroorganismen benötigen für ihren Stoffwechsel Nährstoffe (vor allem Stickstoff, Phosphor, Kalium) sowie Spurenelemente. Die Menge an benötigten Nährstoffen in verfügbarer Form wird häufig im Verhältnis zum abzubauenen Substrat (hier Kohlenstoff aus der Mineralölkontamination) angegeben. Als Richtwert gilt ein Verhältnis C:N:P:K von 100:10:1:1, allerdings ist es empfehlenswert, das tatsächliche optimale Verhältnis in Vorversuchen zu bestimmen. Spurenelemente sind im Normalfall im Boden in ausreichender Konzentration vorhanden.

Weiters ist anzumerken, dass dieses optimale Verhältnis für den Aufbau von Biomasse gilt. Sobald, wie beabsichtigt, der Kohlenstoff mineralisiert wird und als CO<sub>2</sub> entweicht, stellt dieser Anteil keine Forderung nach Nährstoffen. Deshalb wird selten die volle Verteilung nötig sein, sondern nach Ausbildung stabiler Biofilme wird der Bedarf an Nährstoffen stark zurückgehen, da diese aus absterbender Biomasse nachbezogen werden. Es ist in der Plateauphase der biologischen Tätigkeit, also nach abgeschlossenem Aufbau der nötigen Biomasse, sohin ein Kreislauf der Nährstoffe wahrscheinlich. Eine weitere Zufuhr ist nur in geringem Maße nützlich.

Es kann im Gegenteil sogar sinnvoll sein nicht alle biologisch relevanten Parameter in einen optimalen Bereich zu verschieben, da ansonsten ein sehr gut abbaubarer Schadstoff zu einer überproportionalen Biomasseproduktion anstatt der beabsichtigten Mineralisierung führt. Dies kann zu einem so genannten Bioclogging der Poren bei gering durchlässigen Böden und damit zu einem Stillstand der Sanierung bis zur nicht möglichen in situ Sanierung führen. Diese Möglichkeit ist durch das ingenieurmäßige Abwiegen der vor Ort herrschenden Bedingungen zu berücksichtigen. Im Zweifel sollten hierzu Technikumsversuche vor Fertigstellung der Detailplanung durchgeführt werden.

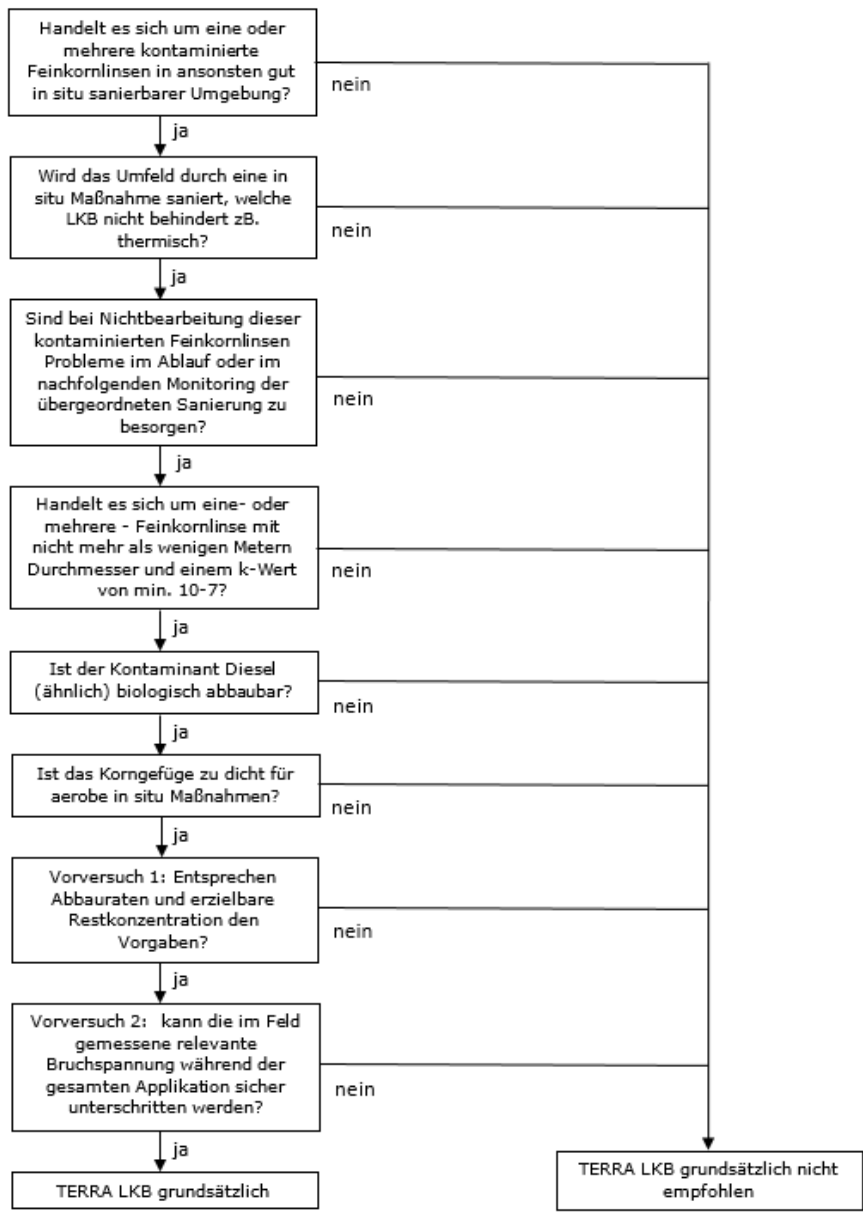
#### Begleitkontaminationen

Biologische Abbauvorgänge können durch andere am Standort vorherrschende Bedingungen gehemmt werden. So können Begleitkontaminationen (z.B. Schwermetalle) in hoher Konzentration oder hohe Salzkonzentrationen die mikrobiologische Aktivität an einem Standort behindern. Bei Verdacht auf eine solche Begleitkontamination sollten daher durch chemische Analyse bzw. Messung biologischer Parameter hemmende Umstände ausgeschlossen werden. Eine sehr hohe Schadstoffkonzentration kann ebenfalls hemmend wirken. Mit einer derartigen Hemmung ist allerdings nicht unter einem KW - Wert von 30.000 – 50.000 mg kg<sup>-1</sup> zu rechnen. In diesem Fall wäre ein anderes Verfahren, etwa eine in situ Bodenwaschung, vorzuschalten. Zu beachten ist auch, dass in den Versuchen im Rahmen von LISA bei einer Konzentration des zugegebenen Reagenz Nitrat von 100g/kg im Zuge des nachfolgenden Abbaus Effekte aufgetreten sind, welche wahrscheinlich auf Salzhemmungen zurückzuführen sind.

### 3.3 Zusammenfassung Einsatz von LKB

Die wesentliche einzuhaltende Randbedingung für die Subfrac Methode ist daher die maximal zulässige Bruchspannung am gegebenen Standort zu messen und sicher während der gesamten Applikation zu unterschreiten.

Laufdiagramm



Tab. 1: Einsatz von LKB in Abhängigkeit der Kontamination sowie der Untergrundeigenschaften

# 4 Vorversuche

## 4.1 Ziele der Vorversuche

Sind die grundlegenden Voraussetzungen bzw. der Bedarf für LKB an einem Standort gegeben, sollten folgende Fragestellungen in Vorversuchen abgeklärt werden:

Stufe 1: Abbauprobieren im Labor mit kontaminiertem Material des Standorts (Kapitel 4.2.)

- 1. Bioverfügbarkeit des Schadstoffs
- 2. Mikroorganismenpopulationsabschätzung
- 3. gegebenenfalls nötige Nährstoffzugabe
- 4. erreichbare Restkonzentration
- 5. erzielbare Abbaurate
- 6. Anwendungskonzentration des Reagens
- 7. Reagens selbst

Stufe 2: In situ Bruchversuch (Kapitel 4.3.)

- 1. Relevante Bruchspannung
- 2. Zeitlicher Verlauf

## 4.2 Stufe 1: Abbauprobieren im Labor

Biologische Atmungsaktivität (AT4)

Als erste Orientierung wird empfohlen AT4 Tests in zumindest 3 Replikationen (besser sind 5) durchzuführen. Hierbei sollte eine Vorauswahl für den deutlich aufwendigeren Schüttelversuch getroffen werden. Es wird darauf hingewiesen, dass der AT4 ein aerober Test ist, obwohl LKB auf anaeroben Vorgängen basiert! Dies ist sinnvoll, weil der Test Standardmäßig verfügbar, günstig und rasch (4 Tage) ist.

Die Effektivität jedes biologischen Schadstoffabbaus hängt generell von den Milieubedingungen für den mikrobiellen Aufwuchs sowie von der Beschaffenheit der

autochthonen Mikroflora selbst ab. Eine Kennzahl für die Untersuchung dieser beiden untereinander in Wechselwirkung stehenden Faktoren ist die biologischen Atmungsaktivität, der sog. AT4.



Abb. 5: Darstellung des prinzipiellen Aufbaus der AT4-Versuchsreaktoren

Beim AT4-Test steht die Aktivität eines mikrobiellen Konsortiums im direkten Zusammenhang mit dem Sauerstoffverbrauch, der definitionsgemäß innerhalb von vier Tagen aufgrund der metabolischen Zersetzung von organischen Substraten durch die Mikroorganismen entsteht. Durch Zugabe von Nährstoffen oder Substraten kann eine vorhandene Limitierung bestimmter Milieubedingungen anhand des Ausmaßes der Atmungsaktivität identifiziert und quantifiziert werden. Zur experimentellen Ermittlung etwaiger prinzipieller Limitationen können für jede Bodenprobe Versuche mit entsprechend nachfolgend aufgelisteten Variationen durchgeführt werden:

- unbehandelte Grundatmung (basal)
- nach Nährstoffzugabe im Verhältnis 100:10:1:1 Schadstoff zu Stickstoff, Phosphor und Kalium (NPK)
- nach Applikation von Glucose und Nährstoffen (Glu+NPK) als leicht verfügbares Nährsubstrat

Die Ergebnisse einer solchen Versuchsreihe in LISA sind in der Tabelle 2 aufgeführt:

Probe	Behandlung	AT4 [mg/g*4d]
A1	basal	0,40
A2	NPK	0,41
A3	Glu+NPK	3,12
B2	basal	0,21
B2	NPK	0,22
B2	Glu+NPK	2,59

Tab. 2: Atmungsaktivität nach 4 Tagen (AT4), Beispiel-Tabelle

Die zu den AT4-Werten korrespondierenden Kurvenverläufe innerhalb der betreffenden Versuchszeiträume sind für jede Bodenprobe einzeln in der Abbildung 6 und Abbildung 7 veranschaulicht:

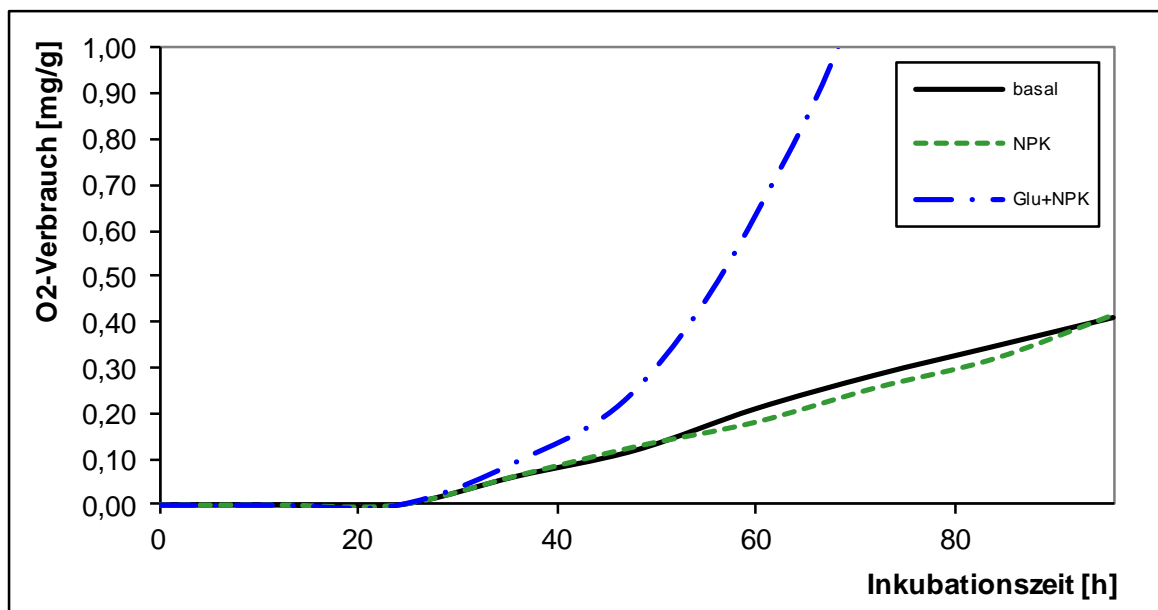


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf der mikrobiellen Atmung Probe A2

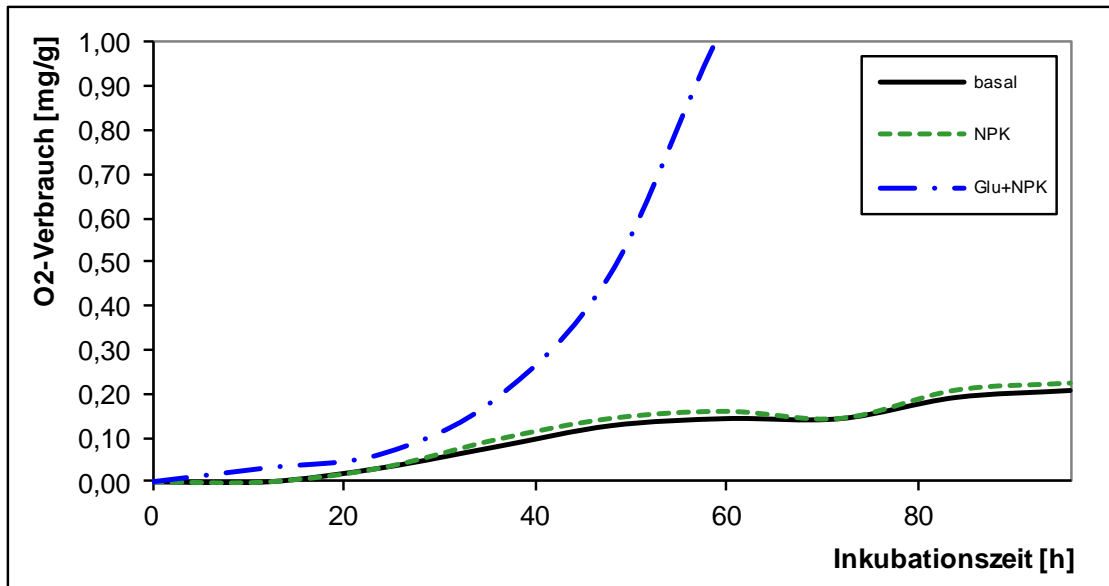


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der mikrobiellen Atmung Probe B2

Die AT4-Versuche zeigten bei beiden Proben ein leicht divergentes Bild. Probe A2 wies eine stark ausgeprägte Atmungsaktivität auf, die schon bereits für die unbehandelten Bodenproben beobachtet werden konnte. Probe B2 zeigte hingegen eine nur moderate Atmungsaktivität. In beiden Fällen war keine wesentliche Förderung der mikrobiellen Aktivität nach Applikation von Nährstoffen zu verzeichnen, woraus auf eine zumindest für die initiale Wachstumsphase ausreichende Nährstoffverfügbarkeit vor Ort geschlossen werden kann. Die Versuchsansätze mit Glucose zeigten hingegen ein exponentielles mikrobielles Wachstum an. Im Vergleich zu der moderat ausfallenden Grundatmung sowie der Atmungsaktivität der mit Nährstoffen versetzten Proben, lässt sich hier für die Probe B2 eine Substratlimitierung vermuten, also eine eingeschränkte Bioverfügbarkeit der Kohlenwasserstoffe.

#### Mikrobielle Schadstoffverfügbarkeit unter aeroben Bedingungen

Nach diesen AT4 Tests ist also bekannt:

- sind hinreichend arbeitswillige Mikroorganismen vorhanden
- bestehen prinzipielle Abbauhindernisse wie z.B. Schwermetallhemmungen
- ist die Kontamination prinzipiell bioverfügbar
- ist Nährstoffzugabe erforderlich oder hilfreich



## Abbauversuch

Ein Abbauversuch in Anlehnung an den ÖVA-Leitfaden "BioSparging" ist der nächste Schritt. Dieses Testverfahren wurde ausgewählt, weil es schnell zu Ergebnissen führt (nach ca. 2 bis 3 Monaten), relativ standardisierte Versuchsbedingungen mit geringer Fehleranfälligkeit vorherrschen und die Messgenauigkeit bestimmt werden kann.

Für den Suspensionsversuch wurden einer Suspension aus Bodenmaterial und Wasser (1:10 Masse) angesetzt und mittels Schüttlern permanent über die gesamte Versuchsdauer von 12 Wochen in Bewegung gehalten. Nach 2, 5 und 12 Wochen dieser Behandlung erfolgte die Bestimmung der jeweils aktuellen KW-Konzentration im Bodenmaterial der Suspensionen. Aus diesem Grund ist dieser Versuch recht aufwendig. Auch hier werden zumindest 3 Replikationen (besser 5) empfohlen. Bei Probenahme zu den drei genannten Zeiten sind dies bereits neun Analysen je Probe.

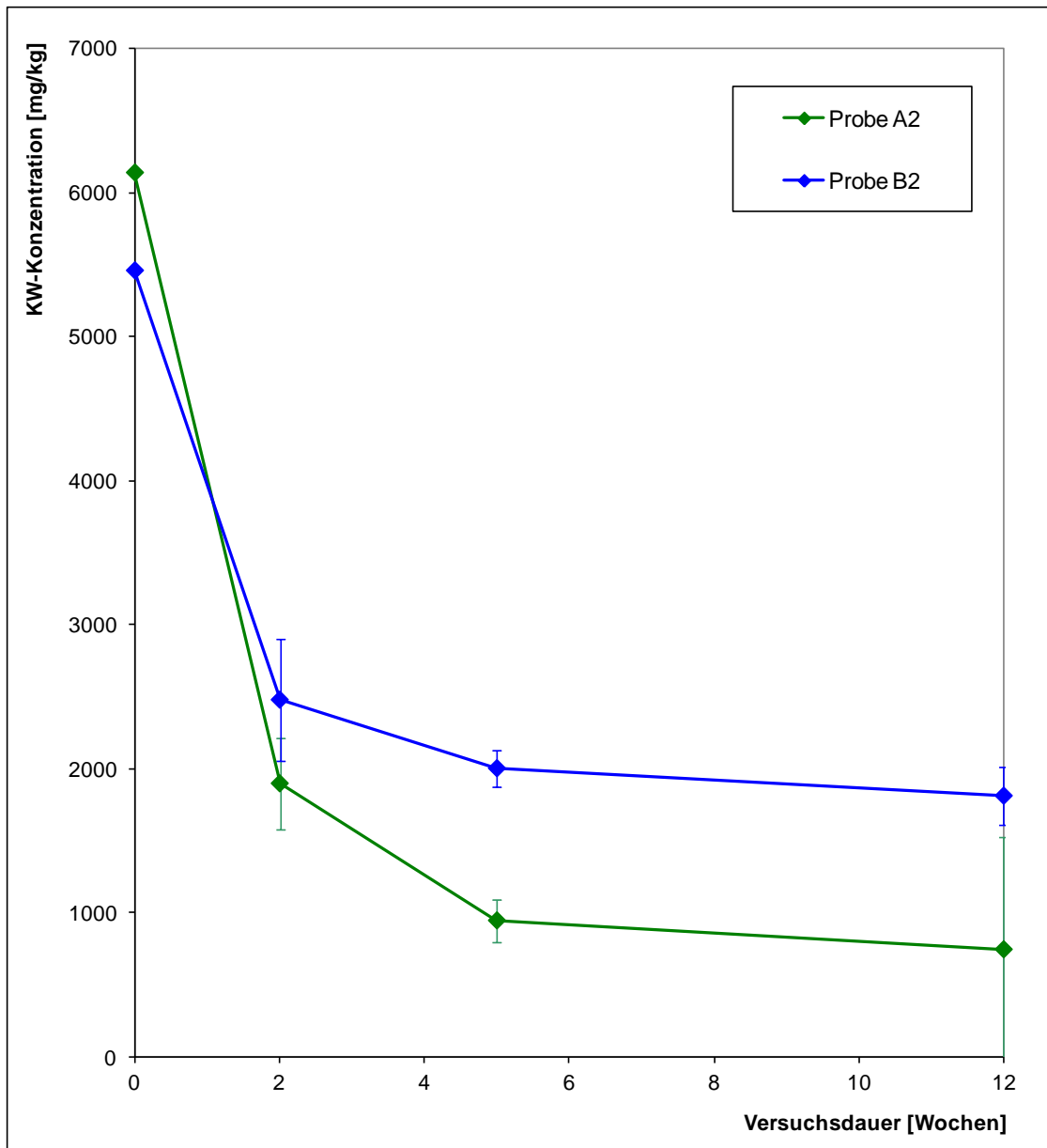


Abb. 8: Abbau des verfügbaren Schadstoffpools

Die daraus erhaltenen Konzentrationsverläufe sind in der Abb. dargestellt. Die ausgewählten Proben zeigten eine steil abfallende KW-Konzentration schon innerhalb der ersten zwei Behandlungswochen, was ein Indiz für eine schnelle Adaption des mikrobiellen Konsortiums und dessen exponentielles Wachstum darstellt. Im weiteren Versuchsverlauf flachten jedoch die Abbaukurven bei beiden Proben schnell ab und blieben annähernd bis zum Versuchsende nach 12 Wochen Behandlungsdauer auf stabilem Niveau, welches das Ende des Schadstoffabbaus, und somit den Verbrauch des bioverfügbaren Schadstoffpools indizierte. Probe A2 erreichte eine Abbaugrenze von ca.

1000 mg/kg KW, Probe B2 eine von etwa 2000 mg/kg KW. Der bioverfügbare Schadstoffpool liegt für die Probe A2 bei etwa 88%, für Probe B2 bei 67%.



Abb. 9: Versuchsreaktoren auf Horizontalschüttler (anaerob)

Die zu variieren empfohlenen Parameter bei diesem Versuch sind:

- Reagens
- Konzentration des Reagens

Werden also drei Reagenzien in drei Konzentrationen getestet, so sind dies neun Proben. Diese werden in je neun Analysen (siehe oben) untersucht, daher zumindest 81 Samples am Schütteltisch. Die in der Abbildung 9 erkennbaren Beutel auf den Reaktoren sollen den Zutritt von Luftsauerstoff verhindern, zugleich jedoch ein Gasausgleichsvolumen bieten.

### 4.3 Stufe 2: Feldversuch: Bruch/Wiederbruch-Versuch

Grundvoraussetzung für den Einsatz des Subfrac Verfahrens ist die Kenntnis über:

- 1. Die Größe der zu bearbeitenden Feinkornlinse
- 2. Das Umfeld der zu bearbeitenden Feinkornlinse
- 3. Die Struktur und Textur der zu bearbeitenden Feinkornlinse
- 4. Homogenität und Isotropie der zu bearbeitenden Feinkornlinse
- 5. Jene Grenzspannung, bei der sich die strukturelle Integrität der Feinkornlinse zu verändern beginnt.

Die Punkte 1-4 müssen aus der Erkundung hinreichend bekannt sein.

Punkt 5 ist jener Punkt, in der die Kohäsion überdrückt wird und im Spannungszustand des Bodens die neutralen Spannungen die wirksamen Spannungen übersteigen. Oder einfach gesprochen kann gesagt werden, dass der durch die Injektion induzierte Porenwasserdruck die Summe aus Kohäsion und Überlagerungsdruck übersteigt.

Um nun ein einfaches Instrument zur Verfügung zu stellen ebendiesen Spannungszustand in situ festzustellen, wird folgender Feldversuch durchgeführt:

Es wird im Zentrum der Feinkornlinse ein Applikationspegel errichtet (siehe Kapitel 5).

Nach hinreichender Aushärtedauer (min 1 Woche) wird im Pegel ein fixer Wasserstand über der Mitte der Filterstrecke eingestellt. Der Wasserstand sollte während der Dotation maximal 10 cm schwanken (besser 5cm). Es ist durch eine geeignete Steueranlage Wasser in genau dieser Menge nachzuliefern, dass dieser Wasserstand möglichst konstant bleibt. Die Infiltrierte Menge in der Zeit ist zu loggen.

Es werden folgende Wasserstände über Filtermittelpunkt empfohlen:

- 0,2 Bar
- 0,4 Bar
- 0,5 Bar
- 0,6 Bar
- 0,7 Bar
- 0,8 Bar
- 0,85 Bar
- 0,9 Bar

Die erste Stufe sollte so lange gehalten werden, bis Wassersättigung aller Poren eingetreten ist und daher die Wasseraufnahme in der Zeiteinheit bei gleichbleibendem Überdruck konstant ist. Ab der zweiten Druckstufe ist dieser Wasserzufluss im Wesentlichen immer ein der Druckstufe zugeordneter Wert.

In Abhängigkeit vom Durchlässigkeitsbeiwert ist eine typische Versuchsdauer bis Bruch ca. 1-4 Wochen. Die Grundannahme bei diesem Versuch ist, dass das dotierte Wasservolumen gemäß dem Gesetz von Darcy ( $v=k \cdot I$ ) und der Kontinuitätsbedingung ( $Q=v \cdot F$ ) in jeder Druckstufe konstant sein muss. Bei Steigerung des Gradienten muss der Durchfluss linear steigen - sofern sich keine andere Randbedingung ändert ( $v$ -Filtergeschwindigkeit;  $k$ -Durchlässigkeitsbeiwert;  $I$ -Gradient;  $Q$ -Durchflussmenge;  $F$ -Querschnittsfläche). Sollte sich also eine überlineare Veränderung der Dotationsmenge ergeben muss sich eine der Randbedingungen geändert haben. Da die geometrischen Randbedingungen des Dotationspegels unveränderbar sind und  $I$  vom Versuchsleiter mittels des Wasserspiegels im Pegel konstant gehalten wird, kann sich nur der Wert  $k$  (bzw.  $F$ ) geändert haben. Der Wert  $k$  ist aber eine Bodenkonstante, die unter anderem auch das Porenvolumen bzw. die Porengröße und die Lagerungsdichte abbildet. Kommt es zu einer Überschreitung dieser Grenzspannung, so ändert sich das Porenvolumen bzw. die Porengröße in einem kleinen Bereich (Bruch oder Frac) sprunghaft. Der Versuch verfolgt die Absicht diesen Punkt zu ermitteln.

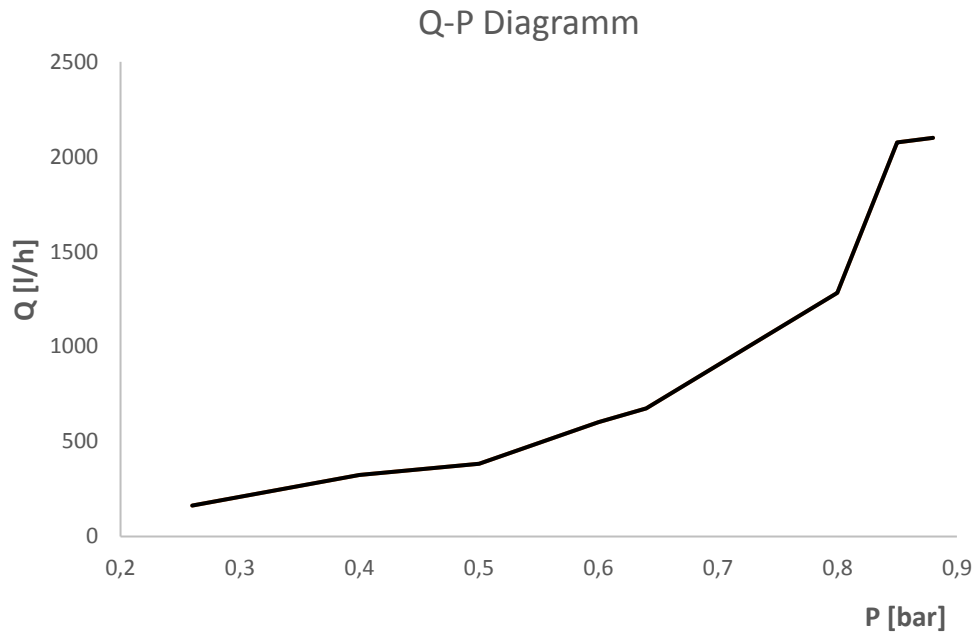


Abb. 10: Beispielhaftes Verhältnis Durchfluss zu Druck - erster Bruchversuch

Wie bereits unschwer zu erkennen ist, folgt das Verhältnis aus Druck und Durchfluss lange Zeit annähernd linear dem Druckanstieg. Der erste Bruch scheint hier zwischen der Druckstufe 0,65 Bar zu 0,8 Bar zu erfolgen. Ein noch deutlicherer Bruch erfolgt nach der nächsten Druckerhöhung.

Im Zuge der Versuche im Projekt LISA war eine Kernaussage der Versuche, dass nach dem Bruchversuch eine derart gestörte Bodenmatrix im Falle einer Reagenzanwendung bereits bei einer niedrigeren Druckstufe wiederbricht. Im Projekt LISA war der Wiederbruch nach 4 Monaten deutlich beeinflusst vom Vorversuch. Nach eineinviertel Jahren war dann defacto kein Unterschied mehr zu beobachten.

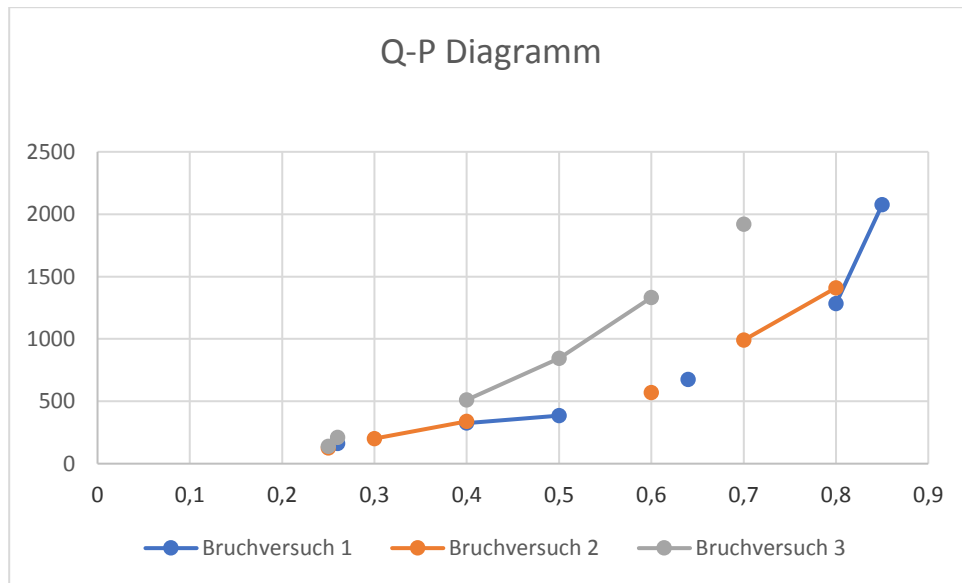


Abb. 11: Verhältnis Durchfluss [l/h] y-Achse; zu Druck [bar] x-Achse für alle Bruchversuche

Es ist deutlich zu erkennen, dass der zweite durchgeführte Bruchversuch (Pause 1 Jahr und 4 Monate) annähernd dieselben Ergebnisse liefert wie Versuch Nr. 1. Daraus wurde geschlossen, dass es nach ausreichend Zeit wieder zu einem „urzustandähnlichem“ Bodenzustand kommt, welcher hinreichend ähnlich ist, um nicht eine nachfolgende Reagenzdotation negativ zu beeinträchtigen. Daher wurde ein dritter Versuch angesetzt, welcher nach bereits weiteren 4 Monaten durchgeführt wurde. Dieser Versuch zeigt nun deutliche Abweichung von den beiden anderen Versuchen, da der Durchfluss im Vergleich zu den ersten Versuchen stark erhöht ist. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Pause zwischen Versuch 2 und 3 kürzer war als zwischen den Versuchen 1 und 2, so dass sich die in Versuch 2 gebildeten Wegsamkeiten noch nicht vollständig geschlossen hatten.

(Anmerkung: Es muss betont werden, dass es sich lediglich um einen Versuch an einem Standort handelt. Die statistische Relevanz ist also nicht sehr hoch. Andererseits muss aber ebenfalls festgehalten werden, dass genau diese Ergebnisse erwartet wurden und somit der Bruch/Wiederbruch-Versuch nicht als ein „neues“ Ergebnis zu werten ist, sondern es sich lediglich als eine messtechnische Bestätigung eines auf Basis der geotechnischen Rahmenbedingungen, der Erfahrungswerte und der Modellrechnungen als plausibel anzunehmendem Ergebnis handelt. Somit wird davon ausgegangen, dass es sich um ein im Wesentlichen verallgemeinerungsfähiges Ergebnis handelt.)

Daher:

- 1. Bruchversuch aufbauen, instrumentieren und durchführen
- 2. Ist bis zur Applikation mit Reagenz hinreichend Zeit kann derselbe Pegel zur Reagenzapplikation wieder verwendet werden
- 3. Sollte unter Zeitdruck gearbeitet werden (müssen), so muss der Vorversuch deutlich außerhalb der beabsichtigten Applikation stattfinden, da die Störung durch den Bruchversuch nicht nur den Applikationspegel betrifft, sondern die gesamte bearbeitete Schlufflinse gestört wird. Dadurch hätte ein neu errichteter Pegel in derselben Schlufflinse keinerlei positiven Einfluss auf das Ergebnis.



# 5 Verfahrensbeschreibung

LKB ist im Wesentlichen ein sehr unspektakuläres Verfahren. Nach Bearbeitung der Vorversuche und Planung des Sanierungsablaufes besteht die eigentliche Sanierung zumeist aus einer einmaligen Applikation von Sanierungsreagenz. Diese Applikation dauert je nach Randbedingungen ca. ein bis mehrere Monate mit minimalem Anlagenaufwand. Danach arbeitet das Reagens in situ ohne jedes Zutun anaerob. Es gibt keine Steuerungsoption während des biologischen Abbaus. Die prozessbezogenen Monitoringmöglichkeiten bzw. -notwendigkeiten sind gering. In Abhängigkeit von Planung und Monitoring ist nach frühestens einem Jahr - eher mehr – eine Reapplikation möglich, um eine weitere Abbaustufe einzuleiten. Danach kommt nur mehr die Schlussbeprobung mittels Bohrungen.

Wichtige Anmerkung: eine der Grundaussagen des Projektes LISA war, dass auch eine sehr gut erkundete Schlufflinse - da alluvial generiert - IMMER inhomogen und anisotrop sein wird! Dies ist auch ein Grund, warum das Niederdruck Subfrac Verfahren als Transportsystem gewählt wurde. Es gibt ausreichend Zeit für eine HINREICHEND homogene Ausbreitung des Reagenz. Als typisches Bild nachfolgend eine im Rahmen von LISA vollständig ausgegrabene Schlufflinse, welche mittels des hier vorgeschlagenen Subfrac Verfahrens mit einem Tracerfluid getränkt wurde. Der Abstand der Aufnahme vom Applikationspegel ist hier ca. 2,5-3,5m, Tiefe ca. 7m unter GOK.



Abb. 12: Freigelegte Schlufflinse



Abb. 13: Detailaufnahme freigelegte Schlufflinse

In der Analytik wurde der brombasierte 2K Tracer in jeder Probe vorgefunden (auch an den braunen Stellen). Doch wie bereits an der Farbreaktion zu erkennen ist (blaugrau ist der Farbumschlag des Tracers), wurde er nicht sehr homogen – jedoch für die Zielerreichung hinreichend homogen – verteilt.

Mit diesen Bildern im Kopf lässt sich Dimensionierung und Interpretation der Ergebnisse weitaus besser durchführen.

## 5.1 Dimensionierung des Gesamtsystems

Es ist systemintrinsisch unvermeidbar, dass Sanierungsreagenz in Bereiche vordringt, wo deren Applikation nicht beabsichtigt ist. Auch die beste Erkundung kann den Untergrund nicht in einem Maß aufschließen, dass dieser Effekt vermeidbar wäre. Daher ist die Einbettung von LKB in ein Sanierungs-/ Sicherungsumfeld zwingend notwendig, welches sicherstellt, dass jedwede „überschießende“ Reagenz keine negative Auswirkung auf das Umfeld und die Schutzgüter entwickeln kann.

Im Bewusstsein dieser zwingend notwendigen Sicherung kann nun ein Systemdesign gewählt werden, welches dazu tendiert die Schlufflinse eher in Reagenz zu tränken und Randverluste in Kauf zu nehmen, als eine Minderausbreitung in Kauf zu nehmen, um unerwünschte Randeffekte zu minimieren.

Die Dimensionierung von LKB ist somit nach folgenden Schritten vorzunehmen:

- 1. Auf Basis der Erkundungsergebnisse wird das Volumen der Schlufflinse ermittelt und das Porenvolumen daraus abgeleitet. Daraus wird die benötigte Mindestfluidmenge des Reagenzes je Applikation definiert.
- 2. Auf Basis der Laborvorversuche wird das Reagenz und dessen Konzentration festgelegt. Die bei höheren Konzentrationen beobachtete Salzttoxizität kann hierbei ein Grund sein mit zwei schwächer dimensionierten Gaben schnelleren und/oder besseren Abbauerfolg zu erreichen als mit einer höher konzentrierten Applikation.
- 3. Auf Basis des Bruchversuchs wird der Applikationsdruck festgelegt und die Applikationsanlage designed
- 4. Monitoring

## 5.2 Technische Einrichtungen

Es werden folgende technischen Einrichtungen benötigt:

- Applikationspegel
- Applikationseinheit
- Monitoringsonde(n)

Pegel:

Sowohl für die Applikation als auch für den Vorversuch wird ein Pegel errichtet, der die folgenden Eigenschaften aufweist:

- Die Feinkornlinse wird vertikal mit durchgehendem Kerngewinn durchbohrt bis ihr unteres Ende erreicht ist oder bis hinreichend unkontaminierte Bohrstrecke erschlossen wurde
- Der unterste Bereich der Bohrung wird mit einer Zementmilch (besser Dämmen) verfüllt bis zur Unterkante der beabsichtigten Filterstrecke
- Der Innendurchmesser des Pegels beträgt zumindest 50mm
- Die Filterlänge des Pegels beträgt ca. die halbe Teufe der Feinkornlinse
- Die Filterstrecke wird vertikal im hydraulisch gewichteten Zentrum der Feinkornlinse angeordnet
- Der Ringraum im Bereich von oberhalb der Filterstrecke bis GOK - aber jedenfalls bis zum oberen Ende der Feinkornlinse – wird mit einer Zementmilch (besser Dämmen) vollständig verfüllt und so druckwasserdicht an die Feinkornlinse angeschlossen

Applikationseinheit:

Die Aufgabe der Applikationseinheit ist es die geplante Applikationsmenge in jenem Tempo dem Applikationspegel zuzuführen, sodass der Wasserstand im Pegel nicht mehr als 5cm rund um den beabsichtigten Applikationsdruck schwankt. In Abhängigkeit von Pegeltiefe und Applikationsdruck kann dieser Wasserstand im Pegel sowohl unter als auch über Geländeniveau liegen.

## Monitoringsonde

Monitoringoptionen werden im Kapitel 5.3 näher beschrieben. Eine Monitoringoption ist die Beobachtung der Veränderung der Leitfähigkeit in situ. Hierfür werden spezielle Organe benötigt, die mittels Bohrgerät – eventuell im Zuge der Erkundungsmaßnahmen gesetzt werden.

Es wird hierbei die elektrolytische Leitfähigkeit online gemessen. Die Messelektroden bestehen aus zwei Flacheisen (5 cm x 2,5 cm x 0,3 cm), die mit einem Zentimeter Abstand parallel zueinander angeordnet und in einer Zwei-Komponenten-Gießharzmasse eingefasst sind. Die Enden der Elektroden sind mit jeweils 10 m Kabel verbunden (tiefenabhängig) und in einem Kunststoffrohr mit 5 cm Durchmesser eingefasst, welches ein zerstörungsfreies Rammen in den Boden gewährleisten soll (siehe Abbildung 14 und 15.).



Abb. 14 und 15: Aufbau der Leitfähigkeitsmesssonde und Einbau der Messsonde mithilfe eines Stahlrohres

Eine Sonde wird in situ appliziert, indem eine Kernbohrung auf Höhe des Zentrums des Applikationsfilters abgeteuft wird. Es wird die Sohle der Bohrung von lockerem Bohrgut gereinigt und mittels eines hinreichend langen Stahlrohres, durch welches die Kabel der Sonde bis GOK geführt werden, in die Sohle der Bohrung gerammt. Danach wird eine Testmessung durchgeführt. Sollte die Testmessung zufriedenstellende Messergebnisse liefern, wird das Rammrohr gezogen und die Bohrung mittels Dämmersuspension verfüllt.

Nach Aushärtung wird die Onlinemessung begonnen und die Stabilisierung der Messergebnisse abgewartet. Diese Stabilisierung tritt ein sobald die Verfüllsuspension vollständig abgebunden hat und sich an die Umgebungsbedingungen hinsichtlich Feuchte und Elektrolytkonzentration angepasst hat. Ab diesem Zeitpunkt ist die Sonde bereit, um die Applikationstätigkeit zu verfolgen. Je nach Randbedingungen ist mit einer Vorlaufzeit bis zur Wertekonstanz der Messungen von ca. ein bis zwei Monaten plausibel.

### 5.3 Monitoring

Es werden 2 Arten von Monitoring unterschieden.

- 1. Auffinden von unerwünschten Ausbreitungspfaden des Sanierungsreagenz
- 2. Monitoring des anaeroben Abbaus

Punkt eins wird hier nicht besprochen, da LKB nur ein Detail - eingebettet in einer größeren Sanierung des gesamten Umfeldes – ist. Es wird aber jedenfalls jeder mögliche potentielle Ausbreitungspfad von Sanierungsreagenz außerhalb der angezielten Schlufflinse zu überwachen sein, um potentielle Ausbreitung erkennen zu können. Ein sehr guter Leitparameter hierfür ist die elektrische Leitfähigkeit im Grundwasser.

Das Monitoring des Abbaus kann auf eine direkte und eine indirekte Art erfolgen. Zum einen sind Bohrungen eine gute Methode direkt Sanierungserfolge zu messen. Allerdings ist jede Bohrung eine deutliche Beeinflussung des Umfeldes unter Bedachtnahme der gewählten Randbedingung, wenn es sich um sehr kleinräumige Feinkornlinsen handelt. Bohraufschlüsse werden also geeignet sein einen End- oder Zwischenzustand zu erheben, sind aber für ein laufendes Abbaumonitoring ungeeignet.

Als laufendes Monitoring kann die elektrolytische Leitfähigkeit herangezogen werden. Doch obwohl dieser Parameter einfach und günstig und vor allem online messbar ist, unterliegt dieser Parameter vielfältigen sich überlagernden Einflüssen. Einige hiervon sind:

- Elektrolytkonzentration
- Schadstoffkonzentration
- Feuchtegehalt
- Lagerungsdichte/Porenvolumen

Daher ist die elektrolytische Leitfähigkeit zwar ein gut zu messender und zu loggender Parameter – jedoch ist er nur ungenau interpretierbar (ähnlich wie eine Gleichung mit 4 Unbekannten zwar präzise ist, aber nur unter Annahmen interpretierbar da gegenseitige Abhängigkeiten der Unbekannten bestehen).

Das Monitoring kann je nach Wunsch an einem oder mehreren Punkten stattfinden. Im Fall von mehreren Monitoringpunkten empfiehlt es sich diese in unterschiedlichen Abständen anzuordnen.

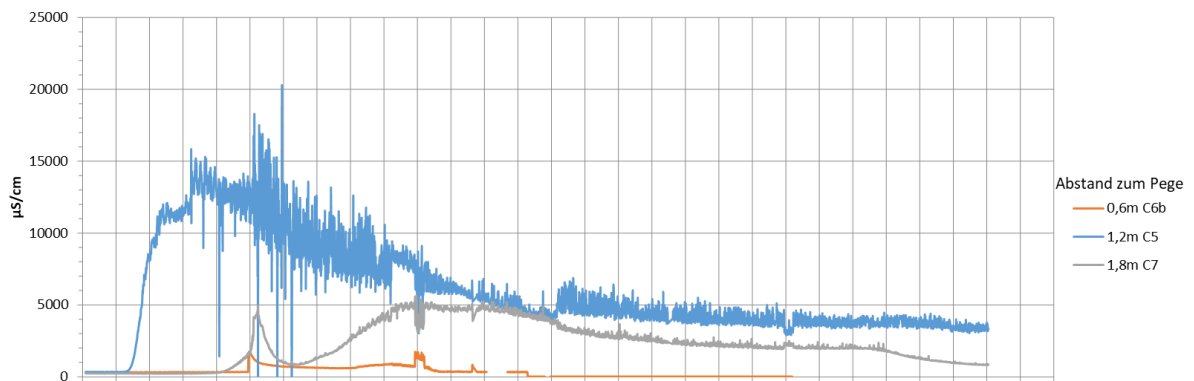


Abb. 16: Beispielhafte Messergebnisse von 3 Lf Messonden in Abständen 0,6m, 1,2m, 1,8m

Sehr typisch für alluviale Standorte ist die trotz einer optisch sehr homogen anmutenden Schlufflinse doch vorherrschende Inhomogenität und Anisotropie. Am raschesten und stärksten reagierte in diesem Beispiel der Pegel in mittlerer Entfernung (1,2m), der offensichtlich deutlich besser mit dem Dotationspegel kommuniziert als die anderen beiden. Trotzdem ist bei allen 3 Messpunkten ein annähernd gleicher Verlauf zu sehen:

- Vor Zugabe Parameterkonstanz
- Anschwallphase im Zuge der Reagenzausbreitung
- Gegenseitiges Angleichen der Messwerte durch Diffusionsvorgänge
- Einsetzende Zehrung

Die Dotation dauerte hier ca 2 Monate. Die gesamte Zeitskala dieses Ausschnitts ist ca. 4 Monate.

## 5.4 Sanierungsdauer

Die Sanierungsdauer ist abhängig von der Art und Stärke der Kontamination sowie den Standortbedingungen. Im Mittel kann mit einer Reduktion der Kohlenwasserstoffe von 1.000 – 3000 mg kg<sup>-1</sup> pro Jahr gerechnet werden. Der Verlauf kann anhand der Laborvorversuche abgeschätzt werden, wobei der in situ Prozess – je nach tatsächlich in situ erreichbaren Randbedingungen für die abbauenden Organismen – eine Zehnerpotenz langsamer ist.

## 5.5 Erreichbare Restkontamination

Nach Abschluss von biologischen Sanierungsverfahren ist mit einer Restkontamination im Untergrund zu rechnen. Diese Kontamination ist abhängig von Verfügbarkeit und Persistenz der Schadstoffe und kann in Laborversuchen abgeschätzt werden. Die ungefähre Größenordnung der zwingend verbleibenden Restkontamination kann aus den Vorversuchen geschlossen werden, wobei jedoch zu beachten ist, dass der im Labor erreichte Abbaugrad unter Optimalbedingungen erreicht wurde und daher im Feld mit Sicherheit nicht flächig erreicht werden wird.

## 5.6 Kosten (Investitionen, Betriebsmittel)

Die Kosten für die Sanierung eines Standortes sind grundsätzlich stark von den Gegebenheiten am Standort abhängig. Insbesondere die Mächtigkeit der gesättigten und der kontaminierten Schicht, die Bebauung und Zugänglichkeit, die Schwere der Kontamination, sowie die Durchlässigkeit des Untergrunds und die damit verbundenen Reichweiten spielen eine bedeutende Rolle bei der Schätzung des Kostenrahmens. Vergleichswerte sind in der Literatur nicht vorhanden.



Aus Markterhebungen kann Folgendes grob geschätzt werden:

- Erkundungskosten werden hier der übergeordneten Standortsanierung zugerechnet, da LKB nur als „ad on“ gedacht ist.
- Planungs- und Erhebungskosten je nach Inhomogenität der Feinkornbereiche: ca. € 50.000,-100.000,-
- Reagenzkosten: ca. € 5.000,- bis 10.000,- je Feinkornlinse innerhalb der hier gewählten Randbedingungen
- Errichtungskosten je Dotation: €10.000,- bis 20.000,-
- Betriebs und Überwachungskosten: € 10.000 bis € 20.000 pro Jahr

## 6 Nutzung / Nachnutzung

Prinzipiell kann LKB so ausgeführt werden, dass ein Standort bereits während der Sanierung voll nutzbar ist. Sämtliche Anlagenteile können temporär überflur oder permanent unterflur ausgeführt werden; in diesem Fall ist allerdings mit erhöhten Ausführungskosten zu rechnen.

Das Nachnutzungspotential des Standortes richtet sich aber nach dem Erfolg der übergeordneten Sanierung des Gesamtstandortes, da LKB lediglich zu einem sehr kleinen – aber eventuell wesentlichen Teil – der Gesamtsanierung beiträgt.

## **Tabellenverzeichnis**

Tab. 1: Einsatz von LKB in Abh. der Kontamination sowie der Untergrundeigenschaften...23	
Tab. 2: Atmungsaktivität nach 4 Tagen (AT4), Beispiel-Tabelle.....23	

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 3: Behandlung von Schlufflinsen mittels Subfrac-Transport.....	14
Abb. 4: Behandlung von Schlufflinsen mittels Frac-Migration.....	14
Abb. 3: Mechanisches Verhalten einer Schlufflinse bei unterschiedlichem Einpressdruck MC der injizierten wässrigen Lösung (Quelle: Bericht TU Graz).....	16
Abb. 4: Einflußfaktoren: anaerob mikrobielle Behandlung mit chemischen Additiven.....	17
Abb. 5: Darstellung des prinzipiellen Aufbaus der AT4-Versuchsreaktoren .....	22
Abb. 6: Zeitlicher Verlauf der mikrobiellen Atmung Probe A2.....	23
Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der mikrobiellen Atmung Probe B2.....	24
Abb. 8: Abbau des verfügbaren Schadstoffpools.....	26
Abb. 9: Versuchsreaktoren auf Horizontalschüttler (anaerob).....	27
Abb. 10: Beispielhaftes Verhältnis Durchfluss zu Druck - erster Bruchversuch.....	30
Abb. 11: Verhältnis Durchfluss [l/h] y-Achse; zu Druck [bar] x-Achse für alle Bruchversuche.....	31

Abb. 12: Freigelegte Schlufflinse.....	34
Abb. 13: Detailaufnahme freigelegte Schlufflinse .....	34
Abb. 14 und 15: Aufbau der Leitfähigkeitsmesssonde und Einbau der Messsonde mithilfe eines Stahlrohres.....	37
Abb. 16: Beispielhafte Messergebnisse von 3 Lf Messonden in Abständen 0,6m, 1,2m, 1,8m.....	39

## Literaturverzeichnis

- [1] Jahnke, W., Ohlmeyer, A., Rebens, M. & Wagner, B.: Geotechnische Kartierungen im Norden von Göttingen.- in: Leiss, B., Tanner, D., Vollbrecht, A. & Arp, G. (Hg.): Neue Untersuchungen zur Geologie der Leinetalgrabenstruktur.- Universitätsdrucke Göttingen, S. 149-162, 2011
- [2] Leiss, B., Vollbrecht, A., Tanner, D. Arp, G.: Vorwort.- In: Leiss, B., Vollbrecht, A., Tanner, D., Arp, G.: Neue Untersuchungen zur Geologie der Leinetalgrabenstruktur Bausteine zur Erkundung des geothermischen Nutzungspotentials in der Region Göttingen: vii – ix., Universitätsdrucke Göttingen, 2011
- [3] Technischer Leitfaden, Biologische Sanierung der ungesättigten Bodenzone – Bioventing; Andreas P. Loibner, Dragana Todorovic, Robert Philipp, Hildegard Aichberger; ÖVA; Wien, März 2006
- [4] In Situ Treatment Technologies for Contaminated Soil; Engineering Forum Issue Paper. United States Environmental Protection Agency (US EPA); EPA 542/F-06/013; November 2006
- [5] Biologische Bodensanierung - Methodenbuch; K. Alef; VCH Verlagsgesellschaft mbH; Weinheim, 1994
- [6] Technischer Leitfaden, Biologische Sanierung der gesättigten Bodenzone – Bio Sparging; Robert Philipp, Andreas P. Loibner, Katharina Aichberger; ÖVA; Wien, März 2006
- [7] Held, Thomas: In-situ-Verfahren zur Boden- und Grundwassersanierung: Planung, Verfahren und Sanierungskontrolle; Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2014

[8] Rowell, David L.: Bodenkunde: Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen; Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hongkong, London, Mailand, Paris, Santa Clara, Singapur, Tokio; 1997

[9] Watts, Richard J.: FINAL REPORT - Enhanced Reactant-Contaminant Contact through the Use of Persulfate In Situ Chemical Oxidation (ISCO); SERDP Project ER-1489, Washington State University, Washington, February 2011

[10] U. Hiester, M. Müller, H.-P. Koschitzky, O. Trötschler, U. Roland, F. Holzer und H.-G. Edel.: Leitfaden - Thermische in situ-Sanierungsverfahren (TISS) zur Entfernung von Schadensherden aus Boden und Grundwasser; Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ; Leipzig, August 2012

[11] U. Hiester, T. Theurer, A. Winkler und H-P. Koschitz; Forschungsbericht FZKA-BWPLUS: Technologieentwicklung zur thermischen In-situ-Sanierung gering durchlässiger Böden (THERIS); Abschlussbericht zur Phase II; Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart; Stuttgart, Oktober 2003

[12] Chen, K.-F., Chang, Y.-C. and Chiou, W.-T.: Remediation of diesel-contaminated soil using in situ chemical oxidation (ISCO) and the effects of common oxidants on the indigenous microbial community: a comparison study. J. Chem. Technol. Biotechnol., 91: 1877–1888. (2016) doi:10.1002/jctb.4781

[13] Siegrist, R. L., Crimi, M., Simpkin, T. J.: In Situ Chemical Oxidation for Groundwater Remediation: SERDP ESTCP Environmental Remediation Technology; Springer-Verlag, Berlin, 2011

[14] Bai, M., Why are brittleness and fracability not equivalent in designing hydraulic fracturing in tight shale gas reservoirs. Petroleum, Vol. 2 (2016), 1-19.

[15] Becker et al., Einteilung und Funktionen der Porengrößen (1984): In: Humboldt Universität Berlin Bodenkunde Online (Saugspannung – Wassergehalt)

- [16] Implenia Spezialtiefbau GmbH: Düsenstrahlverfahren im Tiefbau und deren Anwendung (2018).
- [17] Flury, Markus; Wai, Nu Nu ; Dyes as Tracers for Vadose Zone Hydrology in Reviews of Geophysics (April 2003)
- [18] Lu, Jianhang; Wu, Laosheng; Visualizing Bromide and Iodide Water Tracer in Sol Profiles by Spray Methods in Journal of Environmental Quality S363ff (2003)
- [19] Lang H.J., Huder J., Amann P., Puzrin A.M.: Bodenmechanik und Grundbau: Das Verhalten von Böden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte (2010)
- [20] Fehrer, Alina; Masterarbeit Universität Wien, Thermisch induzierte Kapillarmigration von chemischen und biologischen Agenzien in geringdurchlässigen Böden (2018)
- [21] Philipp, Robert; Leistungsgesteigerte in situ Sanierung mittels Verfahrenskombination (LISA); Dissertation Montanuniversität Leoben (in Bearbeitung)
- [22] Huang Q. et al.: Permanganate diffusion and reaction in sedimentary rocks. Journal of Contaminant Hydrology 159, 36–46. (2014)
- [23] Kolymbas, Dimitrios; Geotechnik-Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, Springer (2011)
- [24] Grubinger H.: Der Boden als poröses Mehrphasensystem und seine Entwässerbarkeit; Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie, Band 65, Heft 2. (2016)
- [25] Mitchell J.K., Soga K.: Fundamentals of Soil Behavior. No. 3. John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey (2005)
- [26] von Ameln D. Bayer H.J., Lenz J., Wegener T.: Bohrspülungen im HDD, Vulkan-Verlag GmbH, Band 26. (2003)
- [27] Busch K-F., Luckner L.: Geohydraulik. – 2. Aufl., 442 1(974)
- [28] Höltinger B., Coldewey W.G: Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 8. Auflage. Springer Spektrum (2013)



[29] von Engelhardt W., Zemann J.: Der Porenraum der Sedimente. Springer Verlag Berlin-Heidelberg, 145-146 (1960)

[30] Schweiger, Helmut, Numerische Simulation von Druckinjektionen in alluviale Feinkornlinsen – unveröffentlichter Bericht; TU Graz Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik (2016)

[31] Scheffer & Schachtschabel, Spectrum Heidelberg (2010)

[32] Castillo, „Jasmin Marleen Masterarbeit an der FH Oberösterreich Campus Wels, Studie zur oxidativ-biologischen Abbaubarkeit organischer Schadstoffe in Abhängigkeit der Bodeneigenschaft (2019)

[33] Hädicke, Agnes Maria; Bakkalaureatsarbeit Montanuniversität Leoben; Einfluss bodenmechanischer Parameter und Prozesse auf die Effizienz der Bodenspülung zur in-situ-Sanierung von Altlasten (in Bearbeitung)

[34] Internetchemie.info; elektrochemische Spannungsreihe;  
<http://www.internetchemie.info/chemie-lexikon/daten/e/elektrochemische-spannungsreihe.php> (2017)

[35] Bogolte, Björn Tobias; Enhanced aerobic Bioremediation – Technique and Process Controls; Dissertation Montanuniversität Leoben (in Bearbeitung)

## Abkürzungen

Abk.	Abkürzung
BGBI.	Bundesgesetzblatt
Art.	Artikel
usw.	und so weiter

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und  
Technologie**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

+43 1 711 62 65-0

[email@bmk.gv.at](mailto:email@bmk.gv.at)

[bmk.gv.at](http://bmk.gv.at)