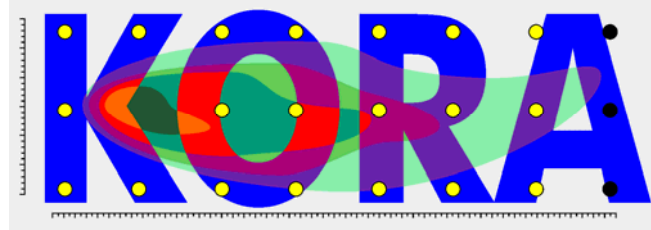


BMBF-Förderschwerpunkt



Handlungsempfehlungen und Methodensammlung - Untersuchungsmethoden zur Beurteilung von NA -

Hans-Peter Koschitzky

Jochen Michels, Matthias Stuhmann, Christopher Frey



Projektübergreifende Begleitung (PüB)



NATURAL ATTENUATION – „Working with the nature“ bei der Erkundung und Sanierung von kontaminierten Standorten

BAFU Schweiz, UBA Wien und LUBW Karlsruhe
St. Gallen, Schweiz 15.-16. April 2010

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Untersuchte Standorte im Förderschwerpunkt KORA



Schadstoffe

Standorte

● (Yellow)	TV 1: Mineralöl	5
● (Black)	TV 2: PAK, BTEX	4
▲ (Green)	TV 3: CKW	6
▲ (Blue)	TV 4: deponiebürtig	4
◆ (Red)	TV 5: Explosivstoffe	3
■ (Grey)	TV 6: Schwermetalle, u.a.	2

Summe: 24

Ziele und Zielgruppen der KORA-Produkte

Handlungsempfehlungen (HE) mit Methodensammlung

- Ziele:
 - Empfehlungen zur Nutzung des NA-Potentials in der Altlastenbearbeitung
 - Zusammenstellung der Definitionen, rechtlichen Einordnung, Erfahrungen und Empfehlungen zu Methoden und Arbeitsweisen
- Hauptzielgruppen:
 - Bundesressorts, OFD, BBR, LABO, LAWA (+ Zielgruppen LF)

Leitfäden (LF)

- Ziele:
 - Schadstoff- bzw. branchenspezifische Bewertung des NA-Potentials
 - Hinweise und Empfehlungen zur Planung und Durchführung von MNA sowie
 - Beschreibung von Referenzstandorten
- Hauptzielgruppen:
 - Vollzug, Ingenieurbüros, Grundstückseigner, Sanierungspflichtige (+ HE)

TV 1 Raffinerien, Tanklager
TV 2 Gaswerke, Kokereien,
Teerverarbeitung
TV 3 Chemische Industrie
TV 4 Deponien,
Altablagerungen
TV 5 Rüstungsaltslasten
TV 6 Bergbau, Sedimente

Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden



Handlungsempfehlungen

Kapitel

- 1 Einführung
- 2 Begriffsbestimmungen
- 3 Rechtliche Rahmenbedingungen
- 4 Umsetzung von MNA (stufenweises Vorgehen)
- 5 Erkundung und Monitoring
- 6 Untersuchung der NA-Prozesse
- 7 Modellierung und Prognose
- 8 Ökonomische Bewertung
- 9 Risikokommunikation und Akzeptanz
- 10 Glossar
- 11 Index
- 12 Literatur

Anhang: Methodensammlung

Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden



Kapitel

- 1 Einführung
- 2 Begriffsbestimmungen
- 3 Rechtliche Rahmenbedingungen
- 4 Umsetzung von MNA (stufenweises Vorgehen)
- 5 Erkundung und Monitoring
- 6 Untersuchung der NA-Prozesse
- 7 Modellierung und Prognose
- 8 Ökonomische Bewertung
- 9 Risikokommunikation und Akzeptanz
- 10 Glossar
- 11 Index
- 12 Literatur

Anhang: **Methodensammlung**



Kapitel 4: Umsetzung von MNA

Stufenweises Vorgehen zur Umsetzung von MNA

- Stufe I: Prüfung der Voraussetzungen für MNA
- Stufe II: Spezifische Standortuntersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit von NA
- Stufe III: Prognose und Entscheidung über MNA
- Stufe IV: Überwachung und Abschlusskontrolle

**Kapitel 5:
Erkundung und
Monitoring**

Stufe I: ...
Stufe II: ...
Stufe III: ...
Stufe IV: ...

**Kapitel 6:
Untersuchung der NA-
Prozesse**

Stufe I: ...
Stufe II: ...
Stufe III: ...
Stufe IV: ...

**Kapitel 7:
Modellierung und
Prognose**

Stufe I: ...
Stufe II: ...
Stufe III: ...
Stufe IV: ...



Stufe I: Prüfung der Voraussetzungen für NA

Kapitel 5: Erkundung und Monitoring

Stufe I:
Erkundung und Abgrenzung des Untersuchungsraumes

- Quellbereich
- zukünftiger Fahnenbereich
- Bilanzraum
- hydrogeologische Erkundung
- Rezeptoren

Kapitel 6: Untersuchung der NA- Prozesse

Stufe I:
Potentialabschätzung

- Interpretation verfügbarer Daten
- Abschätzung des Abbau- und Rückhaltepentials

Kapitel 7: Modellierung und Prognose

Stufe I:
Konzeptionelles Standortmodell (hydrogeol./geochem.)

- Definition von Aufgaben, Zielen, und Anforderungen an die Modellergebnisse
- Teilung des Untersuchungsgebietes in Bilanz- > Modell- > Aussageraum
- Datenbank zu Erfassung von Erkundungsdaten

Stufe II: Spezifische Standortuntersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit von NA

Kapitel 5: Erkundung und Monitoring

Stufe II:
Spezifische Erkundungsmaßnahmen

- Horizontale und vertikale Quellen- und Fahnenabgrenzung
- Strömungsverhältnisse
- Schadstofffrachten an Transekten

Kapitel 6: Untersuchung der NA- Prozesse

Stufe II:
Identifizierung und Quantifizierung der NA-Prozesse

- Quantifizierung der fracht-reduzierenden Prozesse
- Elektronendonator/-akzeptor-Bilanzen
- Nachweis spez. Metaboliten
- In-situ-Untersuchungen

Kapitel 7: Modellierung und Prognose

Stufe II:
Berechnungsmodell für die Grundwasserströmung und den Stofftransport

- Übersicht über Modellierungssoftware in KORA
- Erarbeitung und iterative Anpassung des Transportmodells
- Modellrechnungen/ Interpretation

Stufe III: Prognose und Entscheidung über MNA

Kapitel 5: Erkundung und Monitoring

Stufe III:

Festlegung von Überwachungs-messstellen und -intervallen

- Messstellenausbau
- modellgestützte Planung des Monitoringprogramms

Kapitel 6: Untersuchung der NA- Prozesse

Stufe III:

Parameterpräzisierung und Auswahl von Leitparametern

- Erhöhung der Datendichte
- Spezialuntersuchungen in Abstimmung mit Erkundung und Modellierung
- Leitparameter müssen auch die Rahmenbedingungen erfassen

Kapitel 7: Modellierung und Prognose

Stufe III:

Hinweise und Empfehlungen zu Modellprognosen

- Beschreibung der Modellunsicherheit über Szenarienanalysen

Stufe IV: Überwachung und Abschlusskontrolle

Kapitel 5: Erkundung und Monitoring

Stufe IV:

Durchführung des Monitorings

- Planung der technischen Maßnahmen im "Versagensfall"
- Modellgestützte Festlegung von Messstellen
- Vergleich von Messwerten mit Prognosewerten zukünftiger Fahnenbereich

Kapitel 6: Untersuchung der NA- Prozesse

Stufe IV:

Kontrolle der Wirksamkeit und Nachhaltigkeit der NA-Prozesse

- optional weitere Prozessuntersuchungen

Kapitel 7: Modellierung und Prognose

Stufe IV:

Modellierung

- Entwicklung einer merkmalsabhängigen Entscheidungsmatrix für spezifische Rückfallmaßnahmen
- Definition von Aufgaben, Zielen, und Anforderungen an die Modellergebnisse

KORA-Methodensammlung zur Untersuchung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse

Methoden

- In KORA entwickelte, erprobte und validierte Methoden, zum Teil noch nicht standardisiert oder genormt.
- Keine „Modellierungsmethoden“ (numerische Modelle)
[Übersicht/Grundlagen in HE Kap. 7](#); [Details in BLF TV7](#)

Darstellung

Einheitliche Systematik, 2 Seiten pro Methode

- Nachschlagewerk für die Altlastenbearbeitung
- Schneller Überblick über spezifische Methoden
 - [Weitere Details finden sich in den Leitfäden](#)



Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden

KORA-Methodensammlung zur Untersuchung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse

Informationen

- Zielsetzung / Kurzbeschreibung des Verfahrensprinzips
- Einsatzbereich / -möglichkeiten
- Aufwand (Zeit, Personen, Kosten)
- Anforderungen an Proben
- Anwendungsbereiche und -grenzen
- Entwicklungsstand / Anbieter / Literatur
- Anwendungsbeispiele (KORA-Projekte) → **Leitfäden**
- Alternative Methoden
- Ansprechpartner



Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden

KORA-Methodensammlung zur Untersuchung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse

Gliederung der Methoden (85 + 3)

- 1. Methoden zur Erkundung (22)**
 - Charakterisierung der Quelle und der Fahne
- 2. Methoden zur Beurteilung des biologischen Abbaus (23+3)**
 - in Stufe I
 - in Stufe II
- 3. Methoden zur Beurteilung des Rückhalts (5)**
 - in Stufe I
 - in Stufe II
- 4. Methoden zur Beurteilung des Abbaus, Rückhalts und der Transformation (20)**
 - chemisch-analytische Methoden
 - Batch- und Säulenversuche
- 5. Methoden zur Hydrogeologie und Ökotoxikologie (17)**



Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden

KORA-Methodensammlung - Erkundung

1. Methoden zur Erkundung

Direct-Push-Techniken:

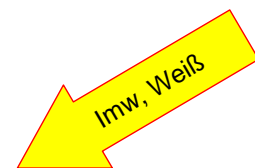
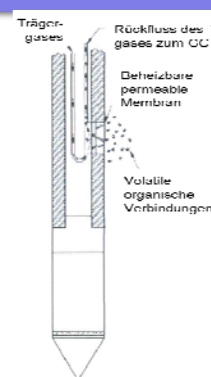
- mit Sonden: z.B. MIP, LIF (1.1.1; 1.1.2)
- mit GW- und Gas-Probennahme (1.1.3, 1.1.4)

Pumpversuche:

- Bestimmung der Phasenmobilität bei aufschwimmender Ölphase (1.1.6)
- Immissions-Pumpversuche (1.2.1)

Passivsammler-Techniken:

- Passivsammler z. Frachtbest. im GW & Oberflächengewässer „gaisafe“ (1.2.2)
- Nicht-Gleichgewichts-Passivsammler (PAK, NSO-HET) (1.2.3)
- Keramikdosimeter (PAK, BTEX, LCKW) (1.2.4)

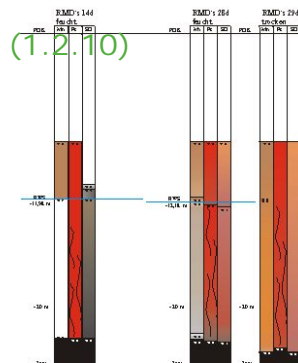


Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden

2. Methoden zur Beurteilung des biologischen Abbaus

Redoxparameter / Keimzahlbestimmung (Stufe I):

- Vertikale Redoxzonenkartierung mit Detektorbändern (1.2.10)
- MPN-Verfahren zur Keimzahlbestimmung (2.1.1)



Nachweis von Metaboliten:

- Metaboliten-Nachweis von aromatischen Kohlenwasserstoffen (2.1.2, 2.1.9)
- Quantifizierung von Metaboliten des MTBE (2.2.12)

Mikrokosmen (Stufe I und II):

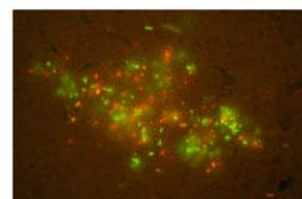
- aerob und anaerob (LCKW-Abbaupotential, Clotethene) (2.2.1a-c)
- Anoerobe Säulenuntersuchungen (2.2.2)
- In-situ-Mikrokosmen (BACTRAP®) (2.2.9)



2. Methoden zur Beurteilung des biologischen Abbaus

Molekularbiologische Methoden:

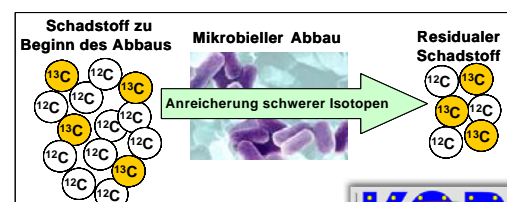
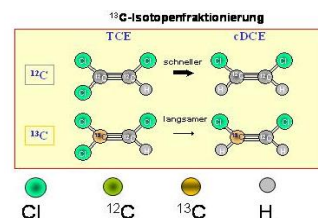
- Real-time PCR-DGGE (2.2.3) (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis)
- In-situ-Fluoreszenz-Sonden (fish) für MTBE-abbauende Bakterien (2.2.10)



Fluoreszenzfärbung (live-dead)

Isotopenuntersuchungen:

- ¹³C-LCKW-Isotopenverhältnisse (2.2.4)
- ¹³C-BTEX/PAK-Isotopenverhältnisse (2.2.5)
- ³⁷Cl-Isotopenfraktionierung von LCKW (2.2.6)
- ¹³C-CO₂-Isotopenverhältnis im gelösten organischen Kohlenstoff (2.2.7)



3. Methoden zur Beurteilung des Rückhalts

In Stufe I:

- Sequentielle Extraktionsmethoden (3.1.1, 3.1.3.)
- pH-abhängige Batch-Versuche (3.1.2)



In Stufe II:

- Säulenversuche (3.2.1)



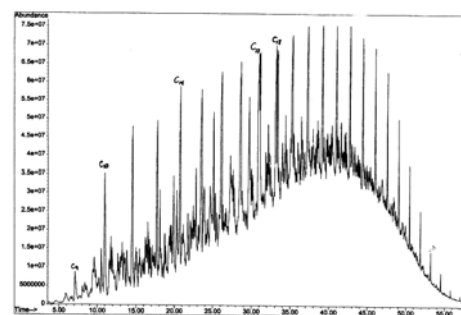
Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden

KORA-Methodensammlung – Abbau, Rückhalt, Transformation

4. Methoden zur Beurteilung des Abbaus, Rückhalts und der Transformation

Chemisch-Analytische Methoden:

- GC-MS-Fingerprinting (4.1.6)
- HPLC-(DAD8-MS)-Analytik für Teerölmethabolite, (N-HET) (4.1.5)
- Non-Target-Analytik (HPLC-NMR-MS) (4.1.2)



Batch- und Säulenversuche:

- Batchversuche zur biotischen und abiotischen Transformation von STV (4.2.1)
- Säulenversuche mit markierten Verbindungen (4.2.10)

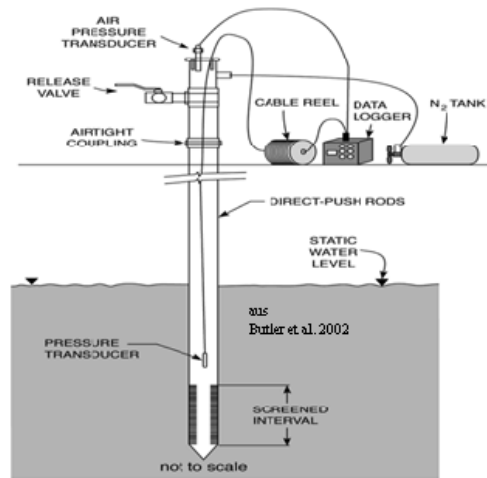


Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden

5. Methoden zur Hydrogeologie und Ökotoxikologie

Hydrogeologie / Geologie:

- Direct-Push-Injection-Logging (5.1.1)
- Direct-Push-Slug-Tests (5.1.2)
- Thermischer Flowmeter (5.1.3)
- Diffusivitätstest (5.1.4)

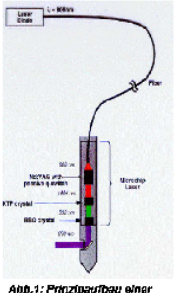


Ökotoxikologische Methoden:

- Feststoffkontakttests zur ökotoxikologischen Bewertung (5.2.3)
- Ökotoxikologische Testmethoden mit Bodeneluaten (Algenwachstumshemmtest, Daphnien-, Leuchtbakterientest, ...) (5.2.3)



Methodenblätter: Beispiel Direct-Push-LIF-Sondierung

1. Methoden zur Erkundung		
1.1	Charakterisierung der Quelle und der Fahne	1.1.2 Direct-Push-LIF Sondierung bzw. -ROST™ Sondierung
Zielssetzung Tiefenhorizontierte in-situ Detektion von Schadstoffen, insbesondere polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen, in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone.		
Kurzbeschreibung der Methode Allgemeines zu DP-Verfahren: Direct-Push wird als Überbegriff für Technologieverfahren verwendet, bei denen Stahlrohre mit Durchmessern von 25 – 50 mm in den Boden gedrückt oder gehämmert werden. Die DP-Verfahren können in der ungesättigten und gesättigten Zone verwendet werden und eignen sich besonders für bindige, sandige und kiesige Sedimente bis zur Mittelfraktion. DP-Verfahren bieten die Möglichkeit, während der Sondierung kontinuierlich bzw. semi-kontinuierlich erkundungsrelevante Parameter aufzuzeichnen, sowie Gas-/Wasser-/Bodenproben zu nehmen. Dies sowie die i.d.R. größere Sondiergeschwindigkeit (40 - 200 m/Tag), die räumliche „Beweglichkeit“ und die geringeren Kosten sind die Vorteile der DP-Verfahren gegenüber herkömmlichen Bohrverfahren (Dietrich, 2005). LIF-Sondierung: Bei einer LIF (Laser Induced Fluorescence)- bzw. ROST™ (Rapid Optical Screen Tool)-Sondierung wird mit zwei in Serie geschalteten Lasern Licht im UV-Bereich über ein Glasfaserkabel in die Sonde geleitet und durch ein Saphirfenster ins umgebende Sediment. Insbesondere polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe werden angeregt zu fluoreszieren, wobei Intensität, Dauer und Wellenlängenbereich der emittierten Fluoreszenz, die online über einen Oszillographen angezeigt wird. Aufschluss geben über die Schadstoffzusammensetzung, den Grad der Kontamination und u.U. über das Vorliegen der Schadstoffe als Phase.		
		
Einsatzbereich/Aufwand Erfasste(n) Parameter: Fluoreszenz-Intensität einzelner Wellenlängenbereiche bzw. Summenfluoreszenz als Maß für die Kontamination und deren Zusammensetzung. Messmedium / Einsatzort: Ungesättigte und gesättigte Bodenzone. Sandige und bindige Lockergesteinssedimente bis ca. 30 m u GOK. Untersuchungsaufwand: ca. 100 - 120 Sondiermeter / Tag bzw. rund 4250 € / Tag. Ergänzende Untersuchungen: ROST-Sondierungen werden häufig mit CPT-Sondierungen kombiniert.		
Anforderungen an Proben Probenvolumen, Art: Es werden keine Proben genommen, da es sich um eine in-situ Analytik-Methode handelt. Probenlagerung: Es werden keine Proben genommen, da es sich um eine in-situ Analytik-Methode handelt.		

Anwendungsbereich und -grenzen der Methoden Anwendungsbereich: Ungesättigte und gesättigte Bodenzone mit sandigen bis fein-/mittelkiesigen Lockergesteinssedimenten bis ca. 30 m u GOK. Anwendungsgrenze: Mittel-/grobkiesige Sedimente sowie Festgestein nicht sonderbar. Semiquantitative Methode, da die Lithologie / Sediment Einfluss auf die Signalthöhe hat.
Entwicklungsstand/Anwendungsbeispiele Praxistauglichkeit: ja, wird seit Jahren eingesetzt.
Anbieter: Fugro (ROST™)
Anwendung in KORA: Projektnummer 1.2: Brand (FKZ: 02WND352), Projektnummer 1.4b: VMZ Spandau (FKZ: 02WND432).
Literatur: GERBNER D, SCHEVTT T, FALKER C (2008) Untersuchungen von Alllasten - Einsatzmöglichkeiten und Grenzen von Direct-Push Technologien bei der Alllastenbearbeitung. Alllasten Spektrum:316-330. DIETRICH P, LEVEN C (2005) Direct Push Technologies. In: Kirsch R (ed) Groundwater Geophysics. Springer Verlag. p 321-340.
Alternative Methoden Direct-Push MIP Sondierung
Ansprechpartner Dr. Anita Peter, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Tel: 0431-880 3917, E-mail: anita.peter@gpi.uni-kiel.de
Besonderheiten/Hinweise Durch das Messprinzip der LASER-induzierten Fluoreszenz besitzt das Verfahren einen eingeschränkten Anwendungsbereich, der primär auf PAK beschränkt ist.



KORA-Methodensammlung - Beispiel

1.1.2 Direct-Push-LIF-Sondierung

Zielsetzung:

Tiefenhorizontierte in-situ Detektion von Schadstoffen, insbesondere PAK, in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone.

Kurzbeschreibung der Methode:

Allgemeines zu DP-Verfahren:

Direct-Push wird als Überbegriff für Technologieverfahren verwendet, bei denen Stahlrohre mit Durchmessern von 25 - 50 mm in den Boden gedrückt oder gehämmert werden.

LIF-Sondierung:

Bei einer LIF- bzw. ROST™-Sondierung wird mit zwei in Serie geschalteten Lasern Licht im UV-Bereich über ein Glasfaserkabel in die Sonde geleitet und durch ein Saphirfenster ins umgebende Sediment. Insbesondere PAK werden angeregt zu fluoreszieren,

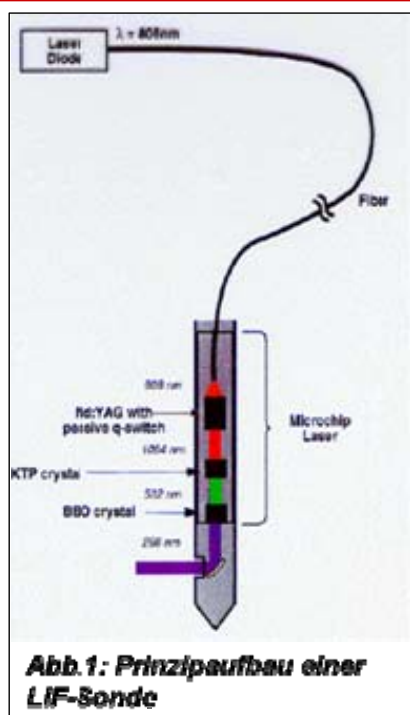


Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden

KORA-Methodensammlung - Beispiel

1.1.2 Direct-Push-LIF-Sondierung (Fortsetzung)

Abbildung:



Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden

KORA-Methodensammlung - Beispiel

1.1.2 Direct-Push-LIF-Sondierung (Fortsetzung)



Einsatzbereich / Aufwand:

Erfasste Parameter:

Fluoreszenz-Intensität einzelner Wellenlängenbereiche bzw. Summenfluoreszenz als Maß für die Kontamination und deren Zusammensetzung.

Messmedium / Einsatzort:

In-situ-Sondierungen in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone.

Untersuchungsaufwand:

ca. 100 - 120 Sondiermeter/Tag bzw. rund 4.250,- €/Tag.

Ergänzende Untersuchungen:

LIF-Sondierungen werden häufig mit CPT-Sondierungen kombiniert.



Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden

KORA-Methodensammlung - Beispiel

1.1.2 Direct-Push-LIF-Sondierung (Fortsetzung)



Anforderungen an Proben:

Menge, Art:

Keine Probennahme, da In-situ-Analytik-Methode.

Probenlagerung:

Keine Probennahme.

Anwendungsbereich und -grenzen:

Anwendungsbereich:

Ungesättigte und gesättigte Bodenzone mit sandigen bis fein-/mittelkiesigen Lockergesteinssedimenten bis ca. 30 m u.GOK.

Anwendungsgrenzen:

Mittel-/grobkiesige Sedimente sowie Festgestein nicht sondierbar.

Semiquantitative Methode, da die Lithologie Einfluss auf die Signalhöhe hat.



Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden

KORA-Methodensammlung - Beispiel

1.1.2 Direct-Push-LIF-Sondierung (Fortsetzung)

Entwicklungsstand / Anwendungsbeispiele:



Praxistauglichkeit:

Praxistauglich. Wird seit Jahren eingesetzt.

Anbieter:

z.B. Fugro (ROST™).

Anwendung in KORA:

Projektnummer 1.2: Brand (FKZ: 02WN0352),
Projektnummer 1.4b: VMZ Spandau (FKZ: 02WN0432).

Literatur:

GERSTNER D., SCHEYTT T., FÄLKER C. (2006) Untersuchungen von Altlasten - Einsatzmöglichkeiten und Grenzen von Direct-Push Technologien bei der Altlastenbearbeitung. Altlasten Spektrum: 316-330.

DIETRICH P., LEVEN C. (2005) Direct Push Technologies. In: Kirsch R. (ed.) Groundwater Geophysics. Springer Verlag, p. 321-340.

KORA-Methodensammlung - Beispiel

1.1.2 Direct-Push-LIF-Sondierung (Fortsetzung)



Alternative Methoden:

Direct-Push-MIP-Sondierung.

Ansprechpartner:

Dr. Anita Peter, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Tel: 0431-880 3917,
E-mail: anita.peter@gpi.uni-kiel.de.

Besonderheiten / Hinweise:

Durch das Messprinzip der LASER-induzierten Fluoreszenz besitzt das Verfahren einen eingeschränkten Anwendungsbereich, der primär auf PAK beschränkt ist.

KORA-Methodensammlung - Fazit

- Überblick über die in KORA entwickelten, erprobten, validierten und empfohlenen Methoden zum Nachweis und zum Monitoring natürlicher Schadstoffminderungsprozesse
- Beschreibung Verfahrensprinzip, Einsatzmöglichkeiten, Anwendungsbereiche und –grenzen, Informationen zum Entwicklungsstand
- Ausführliche Anwendungsbeispiele zu einzelnen Methoden sind in den KORA-Branchenleitfäden
- Numerische Methoden nicht in Methodensammlung (separater LF)
- Methodensammlung ist Bindeglied zu LF und Nachschlagewerk für Altlastenbearbeitung



Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden

Zum guten Schluss

Danke für Ihr Interesse

Haben Sie Fragen ??

Weitere Informationen:

- Internet: <http://www.natural-attenuation.de>
- Newsletter: <http://www.natural-attenuation.de/News>



Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden