

# „Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung

## ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren

Hans-Peter Koschitzky

VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser-  
und Altlastensanierung, Universität Stuttgart  
ITVA Fachausschuss H1: *Technologien und Verfahren*  
Arbeitskreis *Innovative In-situ-Sanierungsverfahren*



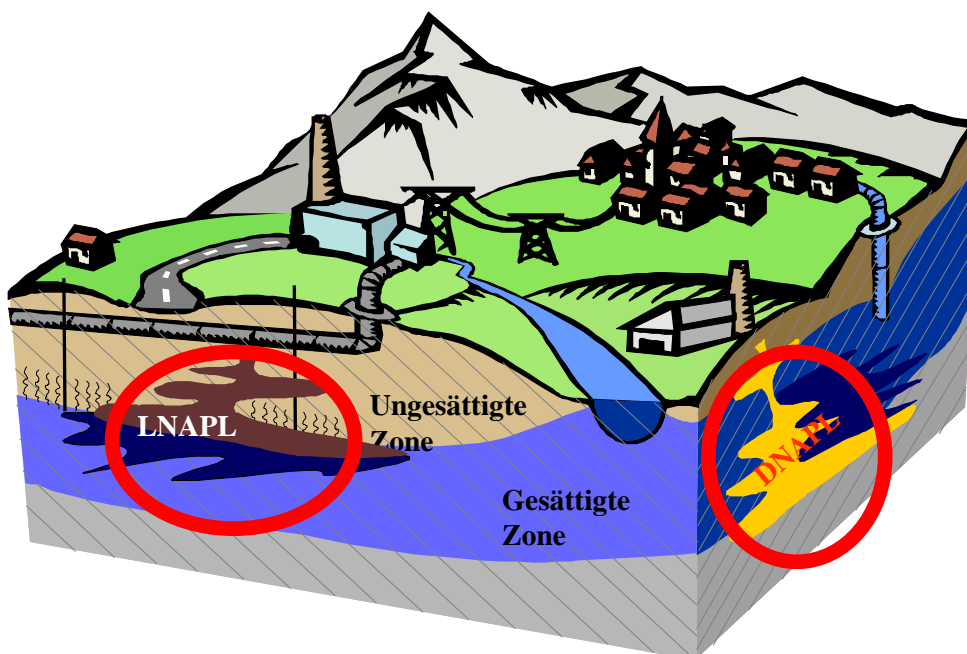
Niedersächsisches Ministerium  
für Umwelt und Klimaschutz



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum

21. Oktober 2009, Hannover

## Anlass und Motivation



- In-situ-Sanierung
- Im Boden (ungesättigte Zone ZU)
- Organische Schadstoffe
- LNAPL und DNAPL
- Im Grundwasser (gesättigte Zone, GZ)
- Schadensherdsanierung
- Quellensanierung
- Fahnensanierung (Grundwasserabstrom)

© VEGAS



„Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren

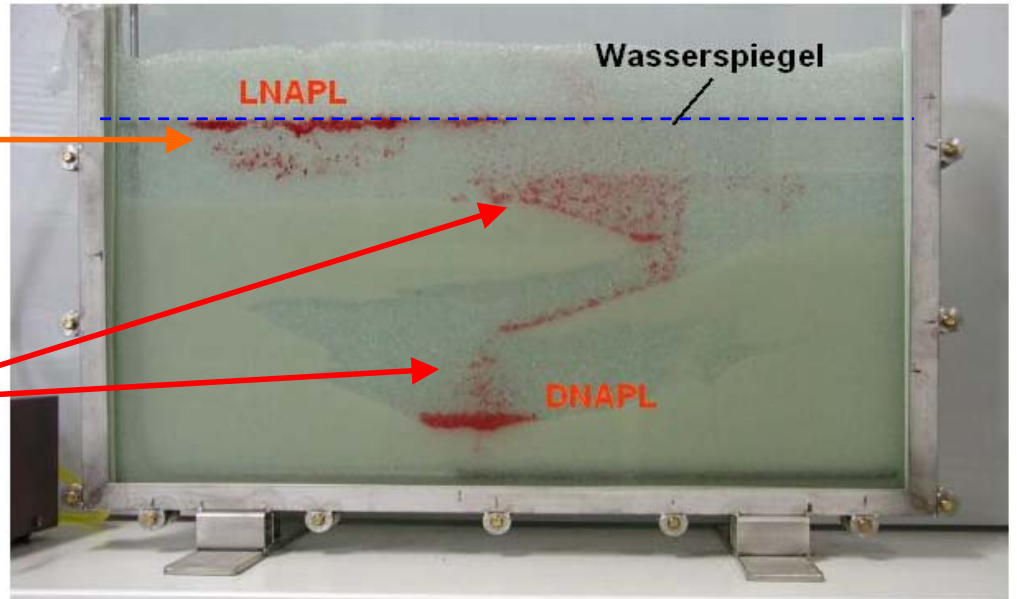


10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

## Beispiel: Schadstoffvorkommen im Untergrund

**LNAPL**  
leichter als Wasser

**DNAPL**  
schwerer als Wasser



NAPL = Non aqueous phase liquid (nicht mischbar mit Wasser)

© VEGAS



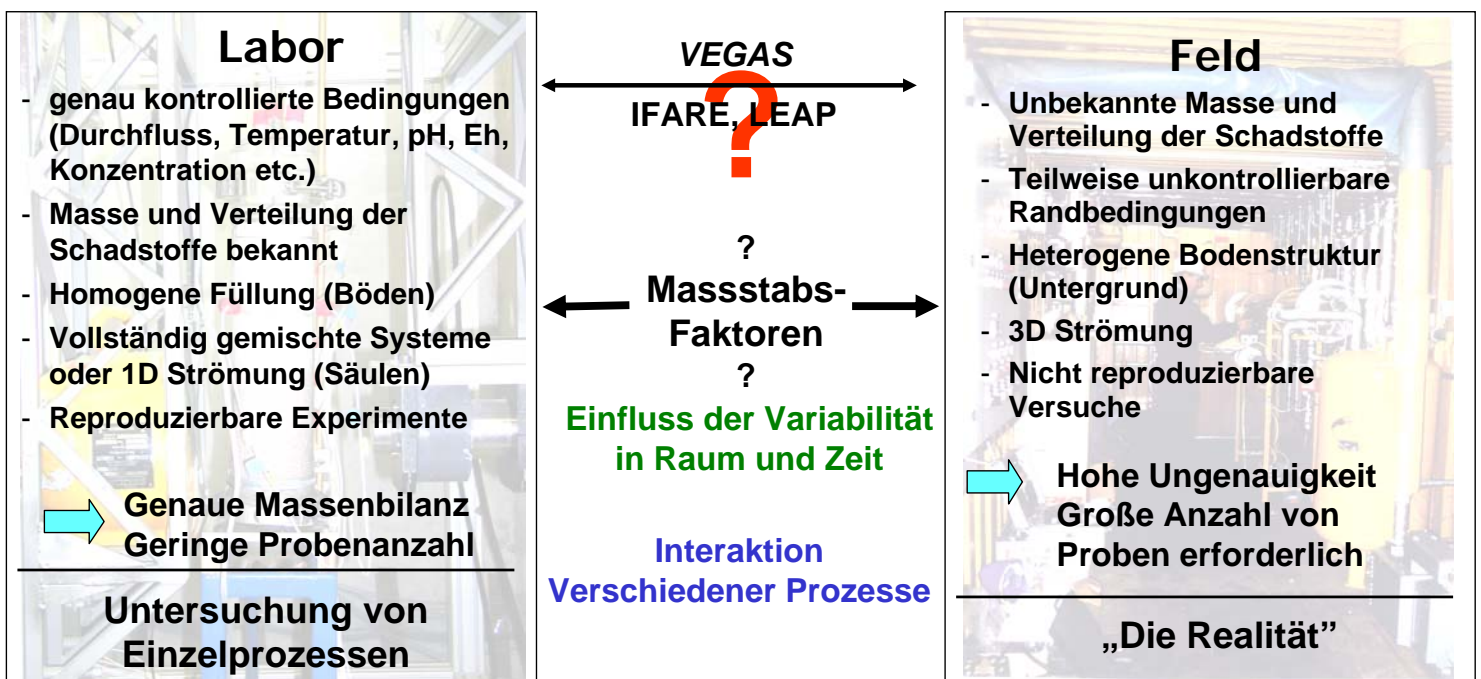
Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

3

## Das Skalen Problem



© VEGAS



Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

4

# VEGAS – „bridging the gap“



© VEGAS



**Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung**  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

5

## Technologieentwicklung – In-Situ-Sanierung

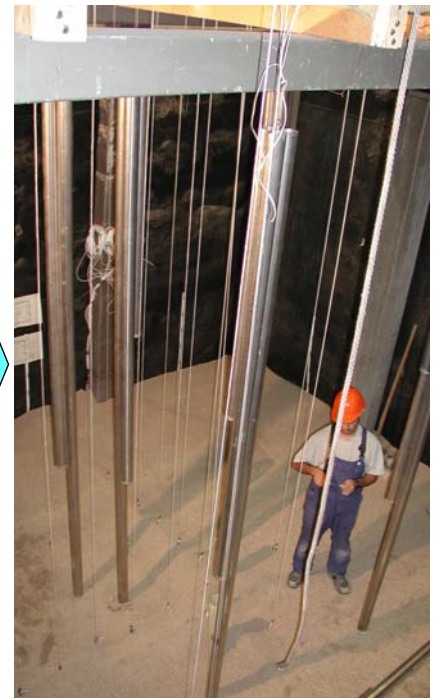
1D



2D



3D



**Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung**  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

6

# VEGAS: Großbehälter



Länge 18.5 m  
Breite: 9 m  
Höhe: 4.5 m  
Über 1000 Probenahme-  
und Messstellen

Aufteilung in drei  
Compartments  
(9m × 6.2m × 4.5m)

**Bisherige Projekte**  
Surfactant Flushing (Tenside)  
Dampf-Luft-Injektion  
Feste Wärmequellen  
GZB, LIP, Hydraulikprojekt  
Alcohol Flooding  
Mineralölausbreitung und  
Erkundung

© VEGAS



**Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung**  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

7

## Aufbau großskaliger Versuche



© VEGAS



**Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung**  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

8

# Aufbau großskaliger Versuche



© VEGAS



**Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung**  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

9

## VEGAS Große Rinne



Länge: 16 m  
Breite: 1 m  
Höhe: 3 m

Seitenwand aus Glas

**Bisherige Projekte**  
Co-Solvent flushing  
Mikroemulsion  
Alcohol flushing  
PAK Ausbreitung  
DNAPL Infiltration  
Enhanced natural  
Attenuation ENA

© VEGAS



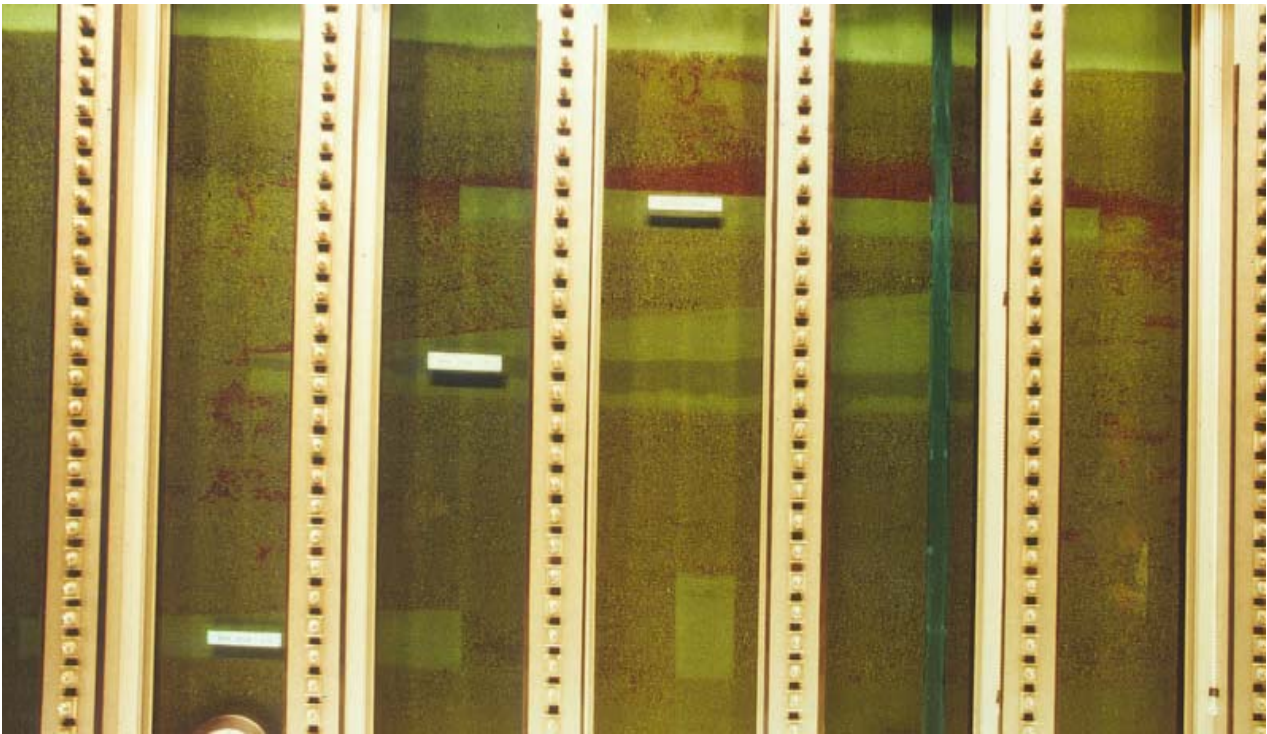
**Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung**  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

10

# CKW – Versickerung in einem inhomogenen Aquifer



© VEGAS



**„Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung**  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

11

## In-situ-Sanierungsverfahren

	Quelle		Fahne
	<b>Thermisch unterstützt</b>	<b>Physikalisch / chemische Verfahren „Flushing Technologien“</b>	
<b>Ungesättigte Bodenzone</b>	<b>Dampf-Luft Injektion (TUBA)</b>		
	<b>Feste Wärmequellen (THERIS)</b>		
<b>gesättigte Zone (Grundwasser)</b>	<b>Dampf-Luft Injektion</b>	<b>Alkohol-Flooding</b>	<b>„Dichtwand-Heber-Reaktor“ (DHR)</b>
		<b>Mikroemulsion- Spülung</b>	<b>Enhanced Natural Attenuation (ENA)</b>
	<b>Feste Wärmequellen</b>	<b>Tensid-Spülung</b>	
		<b>ISCO / NanoFe (in der Entwicklung)</b>	<b>NanoFe (in der Entwicklung)</b>

© VEGAS



**„Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung**  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

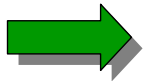
12

## Weshalb und für wen eine ITVA Arbeitshilfe ?

- Identifikation Erfolg versprechender und bereits erfolgreich angewandter innovativer In-situ-Sanierungsverfahren
  - Analyse und Bewertung ihrer Einsatzmöglichkeiten
  - Darstellung in Form von systematischen Datenblättern
  - Verfahren mit mindestens einer dokumentierten Pilotanwendung
- Arbeitshilfe = unabhängige und wertfreie Darstellung der Verfahren
  - Anwendung und Akzeptanz der Verfahren verbessern
  - Auswahl eines geeigneten In-situ-Sanierungsverfahrens erleichtern

**Zielgruppe: Fachleute und Sachverständige aus dem Umweltbereich, Behördenvertreter sowie Sanierungspflichtige**

**Aufzeigen / Hilfestellung: Was können innovative In-situ-Sanierungsverfahren leisten**



**Beitrag zur Lösung von Altlastenproblemen**

© VEGAS



Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

13

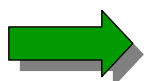
## Was ist innovativ ?

Ein **innovatives Sanierungsverfahren** ist ein Verfahren, das einen Entwicklungsstand erreicht hat, der seine **praktische Eignung** im Sinne einer **umweltverträglichen, effizienten Anwendung** gesichert erscheinen lässt, aber das **noch nicht** dem Stand der Technik und/oder den allgemein anerkannten Regeln der Technik entspricht

- **Innovativ kann auch eine Kombination mehrerer Verfahren sein**
- **Innovative Verfahren sollten zum Stand der Technik bzw. zu allgemein anerkannten Regeln geführt werden**

**Sanierungsverfahren die**

**Schadstoffe biologisch, chemisch oder physikalisch aus dem Boden oder Grundwasser entfernen, in unschädliche Stoffe umwandeln oder ggf. deren Ausbreitung langfristig verhindern**



**Objektive „Bekanntmachung“ der Verfahren**

© VEGAS



Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

14

# Aufbau und Gliederung der Arbeitshilfe

1. Veranlassung und Zielsetzung
  2. Einführung
  3. Begriffe und Definitionen
  4. Rechtliche Rahmenbedingungen
  5. Anwendungsvoraussetzungen
  6. **Physikalische Verfahren**  
(für die ungesättigte Bodenzone und die gesättigte Bodenzone)
  7. **Biologische Verfahren**
  8. **Chemische Verfahren**
  9. **Durchströmte Reinigungswände**
  10. **Fazit und Ausblick (Empfehlungen)**
  11. Literatur
  12. **Glosar**
- Anhang: Rechtliche Rahmenbedingungen und Genehmigungserfordernisse, Zusammenfassung der Verfahrensbewertungen, Adresslisten

© VEGAS



Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

15

## Physikalische Verfahren

- **Physikalische Vorgänge führen zu einer Änderung der Lage und der äußeren Form eines Stoffes**
- **Änderung des Aggregatzustandes (flüssig – gasförmig)**
- **Mobilisierung oder die Solubilisierung (in Lösung gehen von Stoffen)**
- **Physikalische Verfahren für die ungesättigte Bodenzone**  
Thermisch unterstützten Boden-Luft-Absaugung TUBA (Dampf-Luft-Injektion), Feste Wärmequellen (THERIS), Multi-Phase- & Dual Phase Extraction und Elektrokinetik
- **Physikalische Verfahren für die gesättigte Bodenzone**  
Airsparging , Dampf-Luft-Injektion (DLI) insbesondere zur Sanierung von CKW-Schadstoffquellen, Alkoholspülung (Alkohol-Cocktail), Tensidspülung, Huminstoffe als Bio-Sorptionssperre

© VEGAS



Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

16



## Biologische Verfahren

- **Schadstoffe werden durch die Mikroorganismen im Grundwasser direkt abgebaut**
- **Keine Extraktion (Förderung) von Schadstoffen mit anschließender On-site-Reinigung (Wasseraufbereitung etc.)**
- **Zugabe (Injektion) von Nährstoffe oder speziellen Mikroorganismen**
- **Aerobe und anaerobe Verfahren**
- **Stimulierung des Abbaus nicht chlorierter Kohlenwasserstoffe: Biosparging, Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)-Zugabe, ORC®, iSOC™, Oxywall (aerober Abbau), Nitratzugabe zum anaeroben Abbau**
- **Stimulierung des Abbaus chlorierter Kohlenwasserstoffe (CKW): Zugabe von Melasse, organischen Säuren, Alkohole und HRC® für den anaerober LCKW-Abbau, (reduktive Dechlorierung), Methan-Biostimulation (aerober LCKW-Abbau)**

© VEGAS



Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

17

## Chemische Verfahren

- **Schadstoffe werden durch Zugabe eines chemischen Oxidationsmittels durch „kalten Verbrennung“ abiotisch zerstört**
- **Ziel ist die vollständige Umsetzung zu umweltneutralen Stoffen**
- **Oxidations-Reaktion erfolgt im Grundwasserleiter sehr schnell, sobald/sofern wirksamer Kontakt Oxidationsmittel und organischer Schadstoff hergestellt**
- **In-situ-chemische-Oxidation – ISCO**  
technische Machbarkeit und Realisierbarkeit unterscheidet sich je nach Oxidationsmittel: Kalium-/Natriumpermanganat, Fentons Reagenz, Persulfat und Ozon
- **In-situ-chemische-Reduktion - ISCR**  
Metallisches Eisen als wirksames Reduktionsmittel, In-situ-Einsatz über Nano- und Mikroisen-Injektion, ISCR von Chrom VI

© VEGAS



Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

18

# Durchströmte Reinigungswände

- Schaffung definierter reaktiver Zonen (Reaktor) im Untergrund zur In-situ-Dekontamination des durchströmenden Grundwassers
- Passives Verfahren, natürlicher „Grundwasserfluss“ durchströmt Reaktor
- Alternative zu aktiven hydraulischen Sicherungsmaßnahmen (Pump&Treat)
- Langzeitsicherung bei Schadstoffquellen, bei denen Dekontamination innerhalb eines überschaubaren Zeitrahmens nicht möglich ist
- Prinzipiell auch zur Sanierung von „abgerissenen“ Fahnen oder als Vorsorge-Maßnahme zum Schutz von sensiblen Grundwassernutzungen

Erfahrungen aus / Bezug zu RUBIN, Details RUBIN-Handbuch

© VEGAS



Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

19

## Verfahrensblatt der Arbeitshilfe

<b>Verfahrensname</b>	
<b>Prinzip</b>	(ggf. Bild, Skizze o.ä.)  <i>Beschreibung der wirksamen Prozesse</i>
<b>Aufbau und Beschreibung</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- <i>Verbale technische Beschreibung des Verfahrens und</i></li><li>- <i>ggf. Verfahrensschema mit vollständiger Quellenangabe</i></li><li>- <i>Verfahrenskomponenten, besondere Verfahrenscharakteristik</i></li><li>- <i>Begleitende, erforderliche Komponenten wie Grundwassersicherung, BLA, etc.</i></li></ul>
<b>Verfahrensspezifischen Planungsgrundlagen</b>	<i>Untersuchungsergebnisse (z.B. Erkundung, Voruntersuchungen), die über die im Kap. 5 genannten (OU, DU, etc.) zwingend erforderlich sind</i>

© VEGAS



Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

20

# Verfahrensblatt der Arbeitshilfe

## Anwendungsbereich

- *Quelle oder Fahne*
- *Bodenzone (ungesättigte Bodenzone, GW-Schwankungsbereich, gesättigte Bodenzone)*
- *Geologie und Hydrogeologie des Standortes*
- *Geochemische und hydrochemische Standortbedingungen*
- *Art und Umfang der Kontamination - Schadstoffe (gut, bedingt, ungeeignet)*
- *Art des Aquifers Poren-GWL, Kluftaquifer*
- ...

## Anwendungsgrenzen

*Grenzen mit Bezug auf den Anwendungsbereich, Einschränkungen des Anwendungsbereichs z.B. Leichtphasen, Schwerphasen, Einzelsubstanzen aus Stoffgruppe des Anwendungsbereichs,  $K_f$ -Werte, Grundwasserchemismus, Schluffschichten, starke Inhomogenitäten, etc.*

© VEGAS



**Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung**  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

21

# Verfahrensblatt der Arbeitshilfe

## Besonderheiten, Hinweise, Risiken

- *Unkontrollierte Schadstoffmobilisierung*
- *Explosionsfähige Gemische*
- *Methabolitenbildung*
- *Besonderer Arbeitsschutz*
- *etc.*

## Entwicklungsstand

- *Pilotphase, Entwicklungsphase*
- *Stand der Technik etc. in Deutschland / Europa (?) / USA (??)*

## Rechtliche Hinweise

*Besonderheiten die über Kap. 4 (mit Anhang) hinaus gehen*

*Hinweis: Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit den zuständigen Behörden abzustimmen.*

© VEGAS



**Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung**  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

22

## Referenzprojekte / zuständige Behörde

- Konkrete Referenzbeispiele (Namen, Schadstoff, Ort)
- (Sanierungspflichtiger) und zuständige Behörde

Bei genannter Behörde kann im Bedarfsfall nachgefragt werden

## Ausgewählte Literatur

- bis max. 5 aktuelle Stellen der letzten 3 Jahre
- konkrete, vollständige Literaturzitate, nicht nur Hinweis auf Internet
- Gesamt-Literaturverzeichnis am Ende der Arbeitshilfe
- keine Firmenwerbung

## Bewertung durch den Arbeitskreis

Aspekte u.a. Wirtschaftlichkeit, Genehmigungsfähigkeit, Sanierungsdauer, Risiken, Entwicklungsstand



## Beispiel Verfahrensblatt Entwurf

ITVA Entwurf Arbeitshilfe  
Innovative In-situ-Sanierungsverfahren

**Grundwassersanierung mit Dampf-Luft-Injektion (DLI)**

**Prinzip**  
Durch die Injektion eines Dampf-Luft-Gemisches in die gesättigte Bodenzone erwärmt der injizierte Dampf durch die Abgabe seiner Verdampfungsenthalpie den zu sanierenden Bereich. Im Idealfall breitet sich der Dampf-Luftfront radialsymmetrisch um die Injektionsstelle aus. Die mit dem Dampf injizierte Luft wirkt als inertes Trägergas und trägt die Kontaminanten, ähnlich dem Air-Sparging, jedoch mit erheblich größerer Beladung, gasförmig in Richtung der ungesättigten Zone aus dem Grundwasserkörper (Aquifer) aus. Die gasförmige Entfernung der Schadstoffe erfolgt über eine Bodenluftabsaugung, die Teil des Verfahrens ist, aus der ungesättigten Bodenzone.

**Aufbau und Beschreibung**  
Bei der Injektion des Dampf-Luft-Gemisches breitet sich die Mischleistung von der injizierten Dampfphase und der hydraulischen Durchlässigkeit des Bodensystems über ein Dampffeld mit Radien zwischen 1 – 5 m um die Injektionsstelle aus. In der unmittelbaren Umgebung werden die flüssigen, leicht- bis mittelflüchtigen organischen Schadstoffe in der Gasphase überführt. Die injizierte Luft strömt als inertes Trägergas vor der Injektionsstelle in die Dampfphase, nimmt dabei die gasförmigen Schadstoffe auf und transportiert sie nach oben in die ungesättigte Bodenzone. Eine gleichzeitig betriebene Bodenluftabsaugung saugt die Kontaminanten aus der ungesättigten Zone ab, die Bodenluft wird in konventioneller Weise (z.B. Luftaktivkohle, katalytische Verbrennung) gereinigt. Der Betrieb erfolgt unter Wasserdruck, um die Entnahme der versträkt wasserlöslichen Schadstoffe und schließlich der gasförmigen Verfrachtung.

Anlagentechnisch sind ein Dampf- oder Gaserzeuger und ein Kompressor zur Erzeugung und Injektion des Dampf-Luft-Gemisches erforderlich. Die Bodenluftabsaugung umfasst einen Absauger, einen Kondensatscheider sowie die Abluftreinigung (Aktivkohle, TN, NOx, KalOx). Die Bereitstellung des erforderlichen Kühlwassers erfolgt über hydraulische Sicherung des Grundwasseranforderung. Das Grundwasser sollte mittels Wasseraktivkohle gereinigt werden. Eine entsprechende Wasseraufbereitung wird zur Behandlung des anfänglichen Konzentrats aus der heißen Bodenluft eingesetzt. Dem Kondensatscheider sollte ein Absauger mit Trennung der wässrigen und i.d.R. nicht anfallenden organischen Flüssigkeiten nachgeschaltet werden. Die getrennte organische, bzw. wässrige Phase ist gesondert zu behandeln, wenn möglich. Der Betrieb einer Phasenschöpfung ist i.d.R. nicht erforderlich.

**Verfahrenstechnische Planungsgrundlagen**  
Informationen zur Infrastruktur am Standort (Wasser-, Strom-, Gas-, Abwasseranschluss), Informationen zur Gründung von Gebäuden, Leitungen und Kanäle im Untergrund und zu temperaturempfindlichen Bauteilen.  
Informationen zur vertikalen Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit im Aquifer zur Reichweitenabschätzung (Pumpversuche, Flowlog-Messungen).

**Anwendungsbereich**

- Schadstoffquellen in der gesättigten Bodenzone
- Lockergesteine (Feinsand bis Schluff) mit hydr. Durchlässigkeit  $k_v: 5 \times 10^{-3}$  bis  $1 \times 10^{-2}$  m/s
- Hydraulisch schlecht durchlässige Schichten, wie z.B. Schluff- oder Tonsschichten bis zu mehreren dm Mächtigkeit, können thermisch mittels konduktiver Aufheizung saniert werden.
- organische Schadstoffe LNAPL- und DNAPL
- Sanierung unter Gebäuden bei Erhalt der Gebäudenutzung während der Sanierung

ITVA Entwurf Arbeitshilfe  
Innovative In-situ-Sanierungsverfahren

**Grundwassersanierung mit Dampf-Luft-Injektion (DLI)**

**Anwendungsgrenzen**

- Unter dem Ansatz einer anisotropen Schichtung und Durchlässigkeiten im Bereich zwischen  $k_v: 0,5 - 5 \times 10^{-3}$  m/s kann nach derzeitigem Stand des Wissens von einer „thermischen Reichweite“ von 3 - 5 m Radius bei einer Injektionsrate von 150 kg/h Sättigung (1 m Filterstrecke) ausgegangen werden. Pilotanwendungen (Industriepark Zeltitz (2007), (Karlsruhe-Durchsch. 2005)) die numerisch begleitet wurden, unterstützen diesen Ansatz.
- Bei Vorliegen einer BTEX-Kontamination sollte die Injektion zusätzlich in die ungesättigte Zone und insbesondere in den Grundwasserwechselbereich erfolgen.
- Leicht- und mittelflüchtige organische Kontaminanten (Siedetemperaturen bis 180°C) in der gesättigten Zone

**Besonderheiten, Hinweise, Risiken**

- keine Flüssigmobilisierung von Schadstoffen (DNAPL und LNAPL)
- Kontrolle der Sanierung über Temperaturmessungen im Sanierungsgebiet online (elektronische Steuerung der Sanierung und Nachweis der Dampfausbreitung und des Sanierungsfortschritts)
- Anlagenbau entsprechend Chemiestandards zum kontinuierlichen Betrieb (z.B. redundante Pumpen mit Bestimmung der maßgeblichen Stoffströme, Temperaturen, Drucke)
- Pilotanwendung zur Reichweitenbestimmung wird empfohlen
- geringe Sanierungszeiten bei vollständiger Reinigung der über die thermische Temperatur des entsprechenden Schadstoffs hinaus erwärmten Bereiche
- Da sich der Dampf in der gesättigten Zone durch Auftrieb nicht horizontal im Aquifer, sondern auch vertikal nach oben ausbreitet, kann das Verfahren zur simultanen Sanierung der gesättigten und ungesättigten Zone eingesetzt werden
- Liegen Zwischenstauer, z.B. Schluff- oder Tonlinsen, so sind diese durch die Injektion unterhalb der hydraulischen schlecht durchlässigen Bereiche („steampipe“) und unterhalb der darüber anstehenden Boden über flächenhafte Konduktion aufzuwärmen. Die wärmeren Schadstoffe verdampfen und gelangen gasförmig in die darüber liegende Zone, wo sie durch die Bodenluftabsaugung erfasst werden. Etwas kondensierte Schadstoffe werden durch die „nachrückende“ Wärme wieder verdampft.
- Durch Kombination mit dem THERMUS-Verfahren (Katalysator, elektrischen Heizelementen, Betriebstemperatur 300 – 500°C in Pilotanwendung) werden gezielt geringleitende Schichten größerer Mächtigkeit in der ungesättigten Zone durch Erhitzung auf die eutektische Temperatur aufgetaut, die Schadstoffe durch die erhöhte Durchlässigkeit thermisch saniert.

**Entwicklungsstand**  
Mehrere Pilot-Anwendung in Deutschland vorhanden

**Rechtliche Hinweise**  
Wasserrechtliche Erlaubnis, Abfallrechtliche Anzeige, Einhaltung Betriebssicherheitsverordnung (Dampf- und Druckbehälterverordnung, Arbeitsschutz)

**Referenzprojekte / zuständige Behörde**

- Pilotanwendung zur Sanierung eines Altstandorts in Albstadt mittels Dampf-Luft-Injektion (September 2003 – Februar 2004, Auftraggeber: Mettler-Toledo, Landratsamt Zollern-Alb)
- Pilotanwendung zur Luft-Injektion in Karlsruhe-Durchsch. als Grundlage der Sanierungsplanung (April – Oktober 2005, Auftraggeber: Stadt Karlsruhe Umweltamt)
- Thermische In-situ-Pilotanwendung ehemaliges Hydriewerk Zeltitz (Testfeld I) (Mai 2007 – Dezember 2007), Landratsamt Burgenländkreis

**Ausgewählte Literatur**

- Koschitzky, H.-P., Trötschler, O., Ochs, S.O., Denzel, S. und K. Stockl (2006) Dampf-Luft-Injektion zur Sanierung der ungesättigten Zone. Pilotanwendung zur Sanierungsplanung an einem innerstädtischen Standort. Sanierungsband, VEGAS-Statuskolloquium 2006, Editor: Braun, J., Koschitzky, H.-P. & M. Stuhmann, Eigenverlag, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 9/2006-Nr. 150, S. 60-70 - ISBN 3-933761-53-0
- Koschitzky, H.-P., Trötschler, O., Limburg, B., Hirsch, M., Weiß, H. (2007) Pilotanwendung DLI Zeltitz: Erste Ergebnisse der thermischen Sanierung des Kernbereichs eines Benzolchaderns mittels Dampf-Luft-Injektion. Tagungsband, VEGAS-Kolloquium 2007, Editor: Braun, J., Koschitzky, H.-P. & M. Stuhmann, Eigenverlag, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 9/2007-Nr. 165, S. 52 - 62 - ISBN 3-933761-69-7

**Bewertung durch den Arbeitskreis**  
Das Verfahren kann unter entsprechenden Bedingungen als zuverlässiges, gut kontrollierbares, schnelles und kostengünstiges Verfahren eingesetzt werden. Der Sanierungsverlauf kann online durch eine Temperaturüberwachung verfolgt und überwacht werden. Zur zuverlässigen Dimensionierung



# Beispiel Verfahrensblatt Entwurf

**Prinzip:**  
Bei niedrig chlorierten Kohlenwasserstoffen (DCE, VC, cometabolisch auch TCE) ist vor allem ein Abbau im aeroben Milieu von Bedeutung (oxidative Dechlorierung). Je niedriger der Chlorgehalt der Verbindung ist, desto schneller läuft der aerobe Abbau. Der Abbau ist auf direktem Wege mit Sauerstoff möglich, wobei der Schadstoff aus Elektronenakzeptor fungiert. Elektronen an den Sauerstoff abgibt und den Bakterien als Energiequelle dient. Erfolgt der Abbau indirekt und cometabolisch, ist neben Sauerstoff ein Cosubstrat erforderlich, z. B. Methan. Beim Methan-Biostimulationsverfahren werden die methylophilen Mikroorganismen durch Einbringen von Methan in den Grundwasserleiter im aeroben Milieu versorgt.

**Aufbau und Beschreibung:**  
Das Methan-Biostimulationsverfahren zielt darauf ab, methanotrophe Mikroorganismen (MO) zu vermehren. Dazu ist es erforderlich, die Mikroorganismen im gesamten Sanierungsverlauf mit Methan zu versorgen. Die methanotrophen Mikroorganismen produzieren zur Verwertung des Methans das Enzym Methanmonooxygenase (MMO), das als eine Nebenaktivität die Oxidation von LCKW katalysiert. Beim Methan-Biostimulationsverfahren wird ein methanhaltiges Luftgemisch in die gesättigte Bodenzone unterhalb der Kontamination eingeblasen. Damit handelt es sich um eine Kombination aus In-situ-Strippen und biologischem In-situ-Verfahren. Die Methan-Konzentration in der Bodenluft beträgt 0,5 – 2,2 %, um die untere Explosionsgrenze von Methan zu unterschreiten. Durch das Einblasen des Methan-Luft-Gemisches setzt ein Strippeffekt ein. Zusätzlich kann es zu Schadstoffmobilisierung kommen. Daher sind eine Sicherung des Abstroms und eine Bodenluftabsaugung erforderlich.

**Erforderliche Planungsgrundlagen:**

- Abgrenzung der Schadstofffahne
- Kenntnis des Schadstoffbildes
- Kenntnis der Hydrochemie, insbesondere Sauerstoff, DOC, Redoxspannung, Kohlendioxid
- Untersuchung auf methanotrophe Mikroorganismen im Grundwasser
- Kenntnis der Verteilung der CKW-Abbauprodukte

**Anwendungsbereich:**

- Anwendung im Grundwasser im Abstrom einer Schadstoffquelle (Schadstofffahne) oder im unmittelbaren Umgebungsbereich der Schadstoffquelle, unterstützend auch zu Quellensanierung
- Voraussetzung ist die gleichmäßige Verteilung von Sauerstoff und Methan im Untergrund. Daher ist eine Anwendung nur bei homogenen und durchlässigen Porengrundwasserleitern Erfolg versprechend
- Geeignet nur für niedrig chlorierte LCKW

**Anwendungsgrenzen:**

- Wenig durchlässige Grundwasserleiter
- Klüftgrundwasserleiter
- Schadstoffphasen (müssen durch physikalische Verfahren entfernt werden)
- Hoher chlorierte LCKW

**Besonderheiten, Hinweise, Risiken:**  
Aufgrund von Strippeffekten ist eine zusätzliche Bodenluftabsaugung in der ungesättigten Zone erforderlich. Zudem besteht bei Anwendung des Verfahrens das Risiko der Mobilisierung von Schadstoffen. Daher ist eine Sicherung des Abstroms erforderlich.

**Entwicklungsstand:**  
Das Verfahren wurde in den USA entwickelt und dort bereits mehrfach eingesetzt. In Deutschland wurde das Methan-Biostimulationsverfahren in wenigen Fällen eingesetzt. Es handelt sich um zwei Fälle in Nordrhein-Westfalen und eine Anwendung in Berlin.

**Rechtliche Hinweise:**  
Genehmigung nach Wasserrecht  
Hinweis: Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.

**Referenzprojekte / zuständige Behörde:**  
Beispiel:  
- Ehem. Textilbetrieb in Mönchengladbach (Untere Bodenschutzbehörde der Stadt Mönchengladbach)  
- Altstandort im Kreis Lippe (Untere Bodenschutzbehörde des Kreises Lippe)

**Ausgewählte Literatur:**  
ZITZWITZ, M., GERHARDT, M. (2006). Das Methan-Biostimulationsverfahren. In: TerraTech 10/2006.  
HAZEN, T. C., FLIERMANN, C. B. (1994). Bioremediation of contaminated groundwater. US Pat. No. 5,384,048.

**Bewertung durch den Arbeitskreis:**  
Mit diesem Verfahren liegen bisher in Deutschland erst in wenigen Fällen Erfahrungen vor. Das Verfahren kann eine Alternative zu Pump-and-treat-Verfahren in der Fahne darstellen, jedoch muss bei vorhandener Schadstoffquelle aufgrund der Schadstoffnachlieferung auch bei Anwendung dieses In-situ-Verfahrens von langen Laufzeiten ausgegangen werden. Daher ist eine Quellensanierung mit geeigneten Verfahren grundsätzlich zu empfehlen. Wichtig ist eine genaue Kenntnis der Schadstoffsituation und der Hydrochemie als Entscheidungs- und Planungsgrundlage. Die Wirksamkeit des Verfahrens ist nur bei niedrig chlorierten Kohlenwasserstoffen gegeben. Hoch chlorierte Kohlenwasserstoffe sind nicht aerob abbaubar. Durch das Einblasen des Methan-Luft-Gemisches setzt ein Strippeffekt ein, so dass Schadstoffe mobilisiert und über das Grundwasser oder in die Bodenluft transportiert werden können. Daher sind eine Sicherung des Abstroms und eine Bodenluftabsaugung erforderlich. Dadurch steigt der Aufwand des Verfahrens. Um die Wirksamkeit der biologischen Verfahrenskomponente überhaupt abschätzen zu können, ist der Anteil des Strippeffektes zu quantifizieren.

© VEGAS



**Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung**  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

25

## Anhang: Erforderliche Genehmigungen

Entwurf Arbeitshilfe  
Innovative In-situ-Sanierungsverfahren

ITVA

Verfahren	Wasserrecht			Abfallrecht			Baurecht			Immissions-schutzrecht			sonstige		
	Ja	Nein	u.U.	Ja	Nein	u.U.	Ja	Nein	u.U.	Ja	Nein	u.U.	Ja	Nein	u.U.
<b>Physikalische Verfahren</b>															
Physikalische Verfahren für die ungesättigte Bodenzone															
o TUBA Thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung			X		X			X			X				X
o THERIS Thermische In-Situ-Sanierung mit festen Wärmequellen			X		X			X			X				X
o Multi-Phase-Extraction / Dual Phase Extraction	X				X			X			X				X
o Elektrokinetik	X				X			X			X				X
Physikalische Verfahren für die gesättigte Bodenzone															
o Airsparging	X				X			X			X				X
o Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Bodenzone	X				X			X			X		X <sup>1)</sup>		
o Tensidspülung	X				X			X			X				X
o Alkoholspülung															
o Huminstoffzone															
<b>Biologische Verfahren</b>															
Stimulierung des Abbaus nicht chlorierter Kohlenwasserstoffe durch Zugabe von Elektronenakzeptoren															
o Stimulierung des aeroben Abbaus von Kohlenwasserstoffen durch Zugabe von Sauerstoff und Nährstoffen (Bio-sparging)	X				X			X			X				X
o Wasserstoffperoxid (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ), Calciumperoxid (CaO <sub>2</sub> )	X				X										X
o Nitrat	X				X			X			X				X
o ORC <sup>®</sup>	X				X			X			X				
o iSOC <sup>®</sup> , Oxytec	X				X			X			X				
o Oxywall	X				X			X			X				X

© VEGAS



**Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung**  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

26

# Anhang: Erforderliche Genehmigungen

ITVA

Entwurf Arbeitshilfe  
Innovative In-situ-Sanierungsverfahren

Verfahren	Wasserrecht			Abfallrecht			Baurecht			Immissions- schutzrecht			sonstige		
	Ja	Nein	u.U.	Ja	Nein	u.U.	Ja	Nein	u.U.	Ja	Nein	u.U.	Ja	Nein	u.U.
Stimulierung des Abbaus chlorierter Kohlenwasserstoffe durch Zugabe von Elektronendonatoren (Reduktive Dechlorierung)															
○ Melasse, organische Säuren, Alkohole	X				X			X			X			X	
○ HRC <sup>1)</sup>	X				X			X			X			X	
Stimulierung des aeroben LCKW-Abbaus (Methan-Biostimulation)	X				X			X			X			X	
<b>Chemische Verfahren</b>															
ISCO, In-situ-chemische Oxidation															
○ Kalium-/Natriumpermanganat	X				X			X			X		X <sup>2)</sup>		
○ Fentons Reagenz	X				X			X			X			X	
○ Persulfat															
○ Ozon	X				X			X							
In-situ-chemische Reduktion															
○ Eisen-Partikel								X			X			X	
○ In-situ-Reduktion von Chrom (VI)	X				X			X			X			X	
<b>Durchströmte Reinigungswände</b>	X					X			X		X				X

<sup>1)</sup> TÜV-Anlagenprüfung

<sup>2)</sup> Der Einsatz von Kaliumpermanganat ist erlaubnislos, wichtig beim Bundesamt für Arzneimittelforschung (BfArM), Bonn

<sup>3)</sup> In Baden-Württemberg liegt ein mit dem Umweltministerium abgestimmtes Papier vor, das die Einleitung von Alkoholen zum Zweck der Altlastensanierung aus wasserrechtlicher Sicht erlaubt, sofern gewisse Randbedingungen eingehalten werden.

#### Hinweis:

Die erforderlichen Genehmigungen und die Genehmigungsvoraussetzungen sind jeweils im Einzelfall mit den zuständigen Behörden abzustimmen. Zur Klärung des Genehmigungsweges und der Anforderungen an die Genehmigungsunterlagen ist die frühzeitige Einschaltung der Genehmigungs- und Fachbehörden unerlässlich.

© VEGAS



Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

27

## Fazit ITVA Arbeitshilfe

- ITVA-Arbeitshilfe soll helfen das Potential der In-situ-Verfahren aufzuzeigen und zu deren breiteren Anwendung beitragen
- ITVA-Arbeitshilfe „Innovative In-situ-Sanierungsverfahren“ soll einen Beitrag leisten zur Lösung einiger Altlastenprobleme
- Implementierung innovativer Sanierungsverfahren bedarf enger Zusammenarbeit zwischen Standorteignern, Verwaltung (Behörden) und Ingenieurbüros
  - Arbeitshilfe ist fertig gestellt, im AK und Fachausschuss H1 verabschiedet, ITVA-Vorstand soll es in Kürze verabschieden
  - Gelbdruck zum DECHEMA Symposium am 23. & 24.11.2009
  - Gelbdruckverfahren soll bis Januar 2010 abgeschlossen werden
  - Weißdruck zum ITVA-Symposium am 11.-12. März 2010 in Essen

© VEGAS



Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

28

# Dank an die Mitglieder des AK

- für die Ausarbeitung der verschiedenen Verfahrensblätter und Textbausteine
- für die konstruktiven und kritischen Diskussionen in den bisher 13 Sitzungen des AK
- Besonderer Dank gilt Frau Sabine Gier, die maßgeblich die Struktur der Arbeitshilfe mit geprägt hat und viele Details recherchiert, textlich ausgearbeitet und die zahlreichen Überarbeitungen immer wieder umsetzte.

© VEGAS



Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

29

## VEGAS – Revitalisierung von Brachflächen



„START-UP BRACHFLÄCHE“

Arbeitshilfe zur Erarbeitung von Projektplänen



© VEGAS



Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



10. Niedersächsisches Bodenschutzforum  
21. Oktober 2009, Hannover

30

# Danke für Ihr Interesse

## Gerne beantworte ich Ihre Fragen

[hans-peter.koschitzky@iws.uni-stuttgart.de](mailto:hans-peter.koschitzky@iws.uni-stuttgart.de)

<http://www.vegasinfo.de>

**Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky**, Technischer Leiter  
VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser-  
und Altlastensanierung, Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart  
Tel.: 0711 685-64716, Fax: 0711 685-67020

© VEGAS



**Weiche“ Methoden der Grundwassersanierung**  
ITVA Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



*10. Niedersächsisches Bodenschutzforum*  
21. Oktober 2009, Hannover