

Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren

Hans-Peter Koschitzky
Oliver Trötschler et al.



Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung
Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart
vegas@iws.uni-stuttgart.de; www.vegas.uni-stuttgart.de



Seminar 04/2012
Aktuelle Grundlagen für die Bearbeitung von Altlasten und
schädlichen Bodenveränderungen in Baden-Württemberg
Karlsruhe, 19. Juni 2012

- Entstehung von Schadensherden
- Grundlagen Thermische Sanierung
- Thermische In-Situ-Sanierungsverfahren
- Technologietransfer / Fallbeispiele
 - Pilotierung und Sanierung Karlsruhe Durlach, CKW
 - Pilotierung BTEX-Sanierung Zeitz → Vorschlag
 - Pilotierung „Kluftgestein“ Biswurm, CKW → Sanierung
- Stand der Entwicklungen
- Laufende und zukünftige Projekte



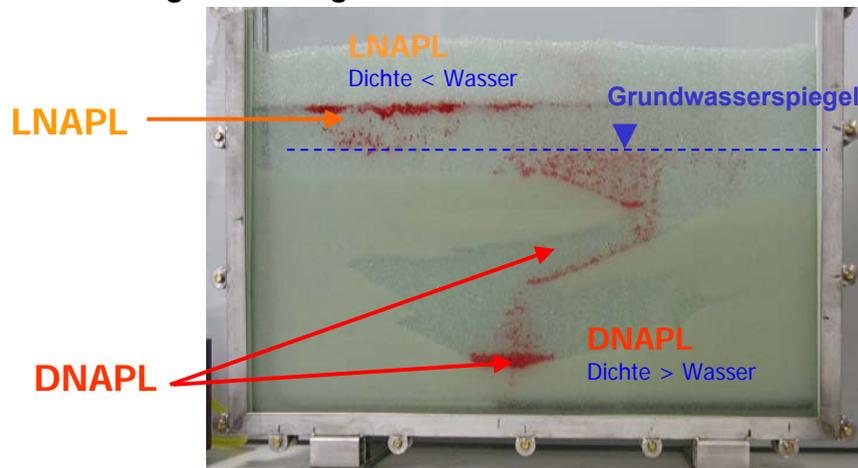
Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



© VEGAS
Karlsruhe 2
19. Juni 2012

Entstehung von Schadensherden: LNAPL – DNAPL

Sanierungstechnologien erforderlich



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

© VEGAS

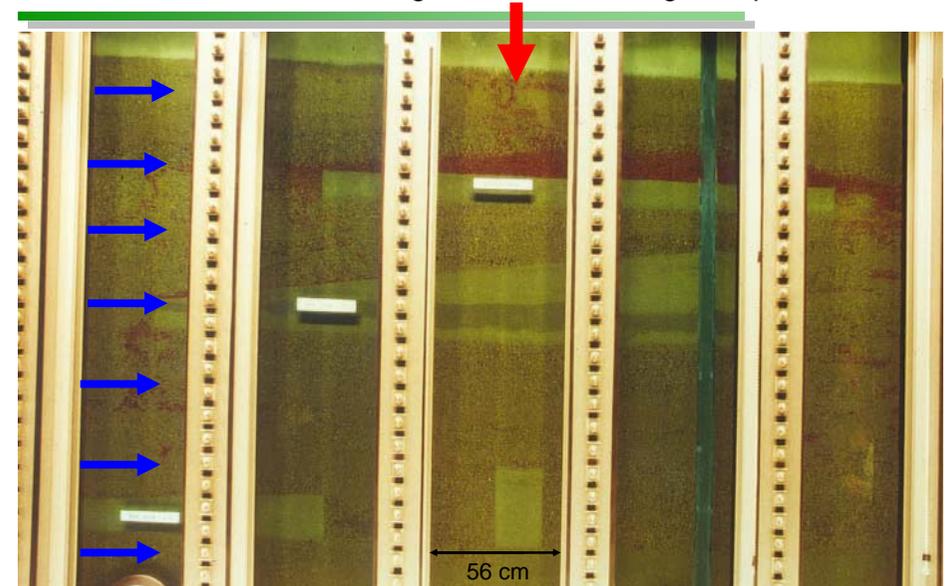


Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 3
19. Juni 2012

CKW – Versickerung in einem inhomogenen Aquifer

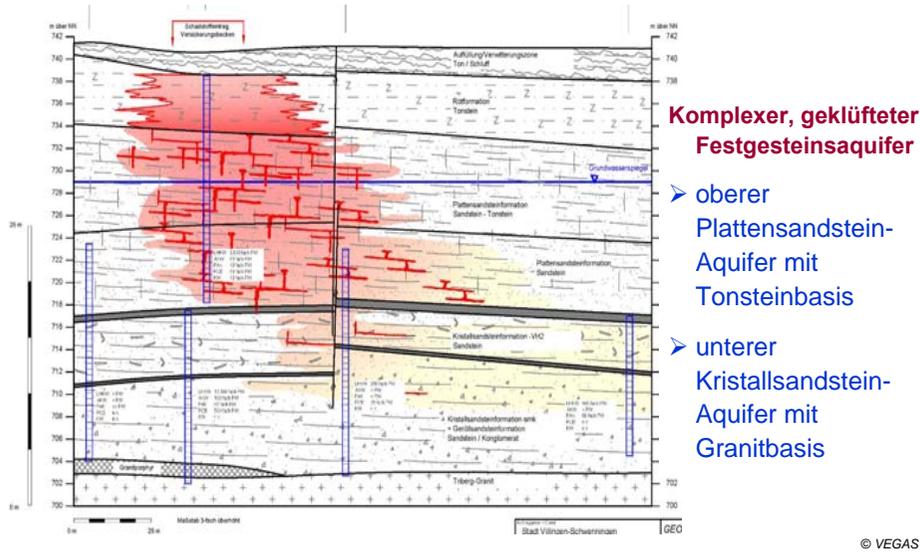


Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 4
19. Juni 2012

Geologie und Schadensbild in einem Kluftaquifer



Komplexer, geklüfteter Festgesteinsaquifer

- oberer Plattenkalkformation-Aquifer mit Tonsteinbasis
- unterer Kristallsandstein-Aquifer mit Granitbasis



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren

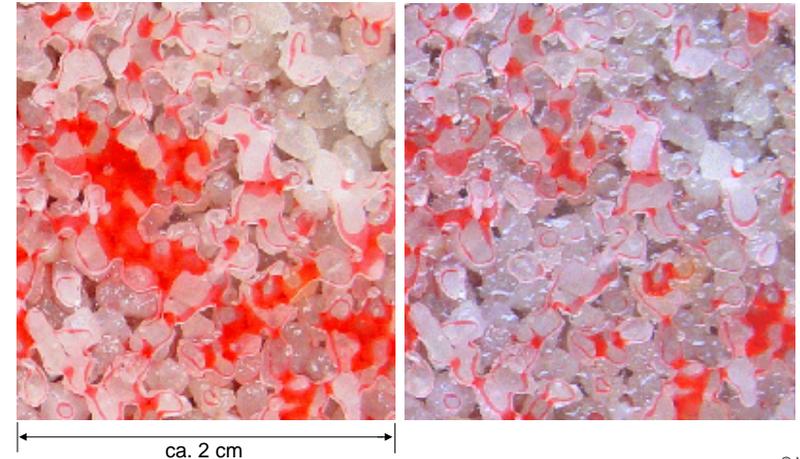


Karlsruhe 5
19. Juni 2012

Fluideigenschaften - Temperaturabhängigkeit

$T_1 = 20^\circ\text{C}$

$T_2 = 70^\circ\text{C}$



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



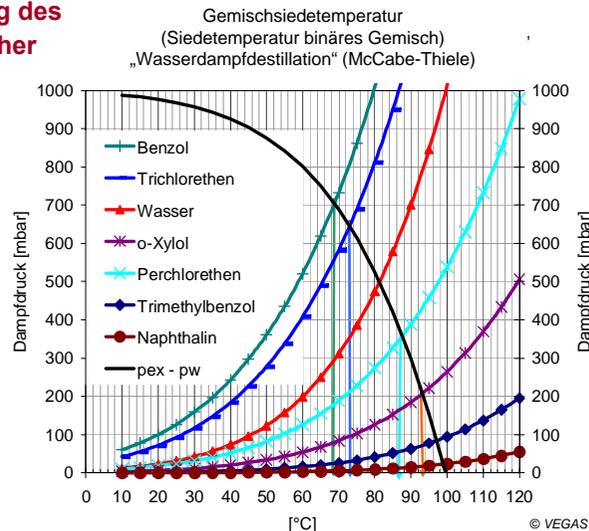
Karlsruhe 6
19. Juni 2012

Grundlagen Thermische Sanierungsverfahren

exponentielle Erhöhung des Dampfdrucks organischer Kontaminanten mit der Temperatur

Siedetemperaturerniedrigung (Azetrop) durch Wasserdampfdestillation:

- Benzol 80 → 69°C
- TCE 87 → 74°C
- PCE 121 → 87°C
- m-Xylol 144 → 93°C

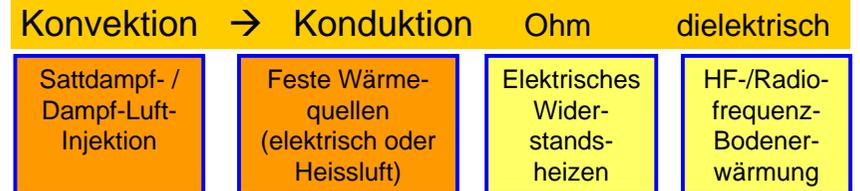


Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 7
19. Juni 2012

Thermische In-situ-Sanierungsverfahren



- Organische Schadstoffe (LNAPL & DNAPL)
- Erhöhung des Dampfdrucks der Schadstoffe durch Erwärmung des Untergrunds / Wasserdampfdestillation
→ Erhöhung der Austragsraten (**gasförmig**) um mehrere Faktoren
- **Schadstoffaustrag über Bodenluftabsaugung**
- Schneller und zuverlässiger (kontrollierbarer) Sanierungsverlauf
→ Auswahl der Technologie hängt von den Standortverhältnissen und vom Schadstoffspektrum ab
→ „Expertenwissen“ erforderlich

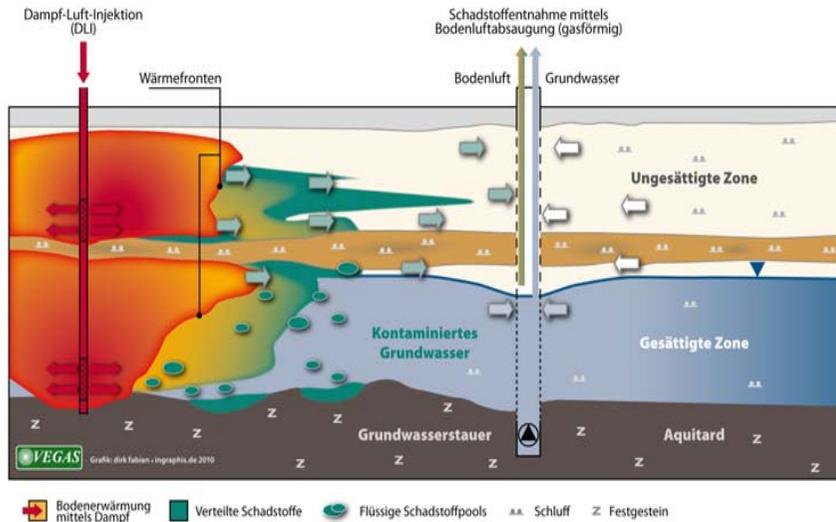


Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 8
19. Juni 2012

Thermisches In-situ-Sanierungsverfahren, Dampf-Luft-Injektion



■ Bodenerwärmung mittels Dampf
 ■ Verteilte Schadstoffe
 ■ Flüssige Schadstoffpools
 ■ s.s. Schluff
 ■ z. Festgestein

© VEGAS

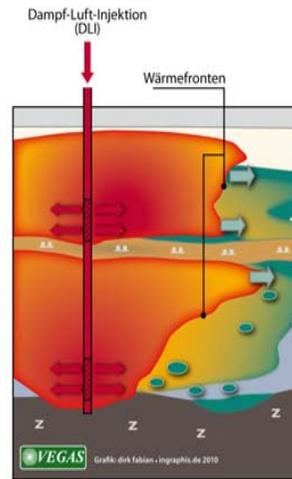


Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 9
19. Juni 2012

Einsatzbereiche Dampf-Luft-Injektion



■ Bodenerwärmung mittels Dampf
 ■ Verteilte Schadstoffe

Einsatzbereiche

DNAPL und LNAPL, leicht- und mittelflüchtig, Siedetemperaturen < 180°C

UZ: Lockergestein mit mittlerer bis guter Durchlässigkeit (Schluff → Kies)

GZ: Porengrundwasserleiter (Sand bis Schluff) mit k_f : 5×10^{-5} bis 1×10^{-3} m/s

Thermische Reichweite GZ

- Durchlässigkeiten: $0,5 - 5 \times 10^{-4}$ m/s
- Dampfausbreitung: 3 - 5 m Radius mit 150 kg/h Sattdampf anisotrope Schichtung vorteilhaft

Besonderheiten

- Simultane Sanierung Grundwasserleiter und ungesättigte Bodenzone
- Mögliche Gefügeveränderungen bei stark organhaltige Böden (Torflagen) → Setzungen ?

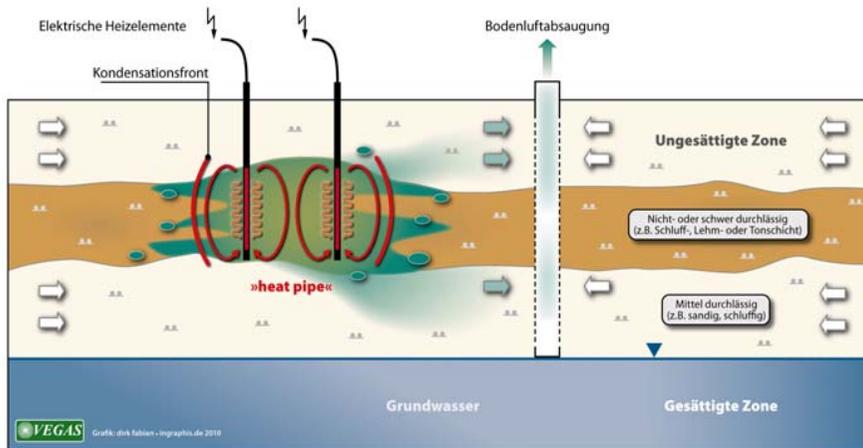


Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 10
19. Juni 2012

THERIS: Feste Wärmequellen Verfahrensprinzip



■ Wärmeausbreitung
 ■ Verteilte Schadstoffe
 ■ Flüssige Schadstoffpools
 ■ s.s. Schluff

© VEGAS

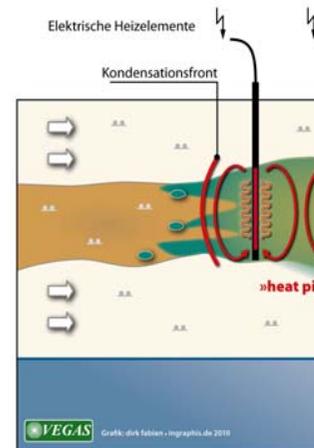


Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 11
19. Juni 2012

Einsatzbereiche THERIS: Feste Wärmequellen



■ Wärmeausbreitung
 ■ Verteilte Schadstoffe

Einsatzbereiche

DNAPL und LNAPL, leicht- und schwerflüchtig, Siedetemperaturen < 250°C (?)

UZ: gering durchlässige Bodenschichten (Feinsedimente, Schluffe, Tone, Lehm, Durchlässigkeiten: bis 10^{-9} m/s

GZ: unter best. Bedingungen möglich, durch Großversuche Eignung nachgewiesen

Abstand der Heizelemente im m-Bereich (Standort- und Projektabhängig)

Besonderheiten

- Nach Austrocknung des Bodens kann sich die Durchlässigkeit für BLA deutlich erhöhen
- Mögliche Setzungen (Tonlagen) beachten
- Geringer Betriebs- und Wartungsaufwand



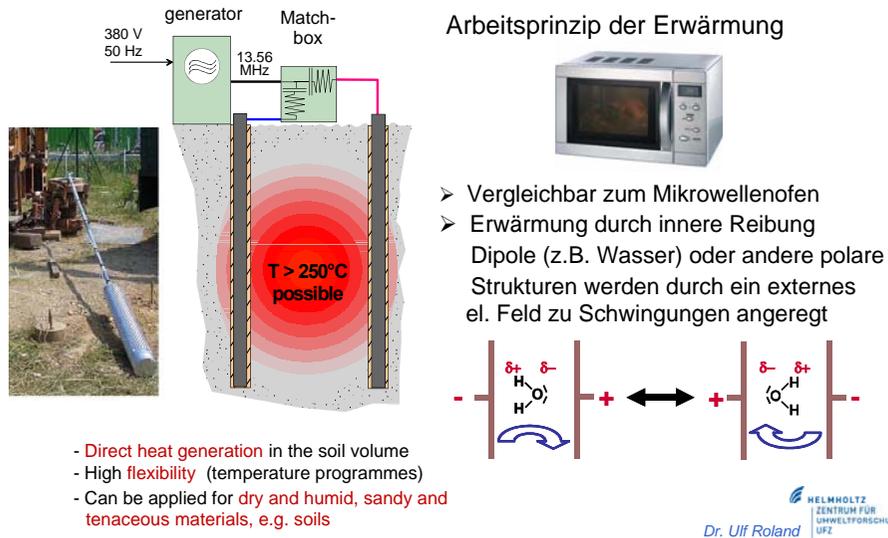
Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 12
19. Juni 2012

© VEGAS

HF- / Radiowellen-Verfahren



- Direct heat generation in the soil volume
- High flexibility (temperature programmes)
- Can be applied for dry and humid, sandy and tenaceous materials, e.g. soils

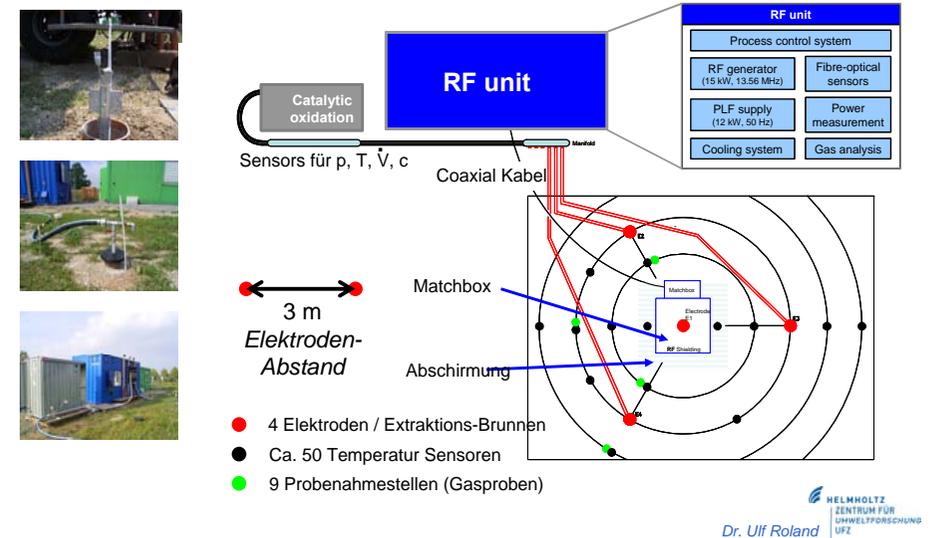


Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband Boden und Altlasten Baden-Württemberg Karlsruhe 13 19. Juni 2012

Radiowellen-Erwärmung am Pilotstandort Zeitz



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband Boden und Altlasten Baden-Württemberg Karlsruhe 14 19. Juni 2012

Dampf-Luft-Injektion: von der Forschung zur Anwendung

Technologie-Transfer durch Pilot Anwendungen Seit 1998

- 1998 **Plauen ehemalige Benzol-Verladestation (UZ, vadose)** : BTEX, sandiger Schluff (UZ, -2,5 bis -4,5 m) über kiesig/sandigem GWL
 - 1998 **Mühlacker Sondermülldeponie (UZ)** :
 - 2000 CKW, verwitterte Ton-/Mergelsteine (Gipskeuper) getrennt durch Schichtwasserhorizont (-15m u. GOK, DRM-Aquifer bei -30 m)
 - 2004 **Albstadt ehemalige metallverarbeitender Betrieb (UZ / GZ)**: CKW, schluffig/tonig (-3,8 m), durchlässiger Kalkstein (-5,6 m) über Mergelgestein
 - 2005 **Durlach ehemalige chemische Reinigung (GZ, vadose, UZ)**: CKW (PER) in schluffig, sandigem Kies mit Schlufflagen (bis -9 m)
➔ 2010/2011 Gesamtsanierung erfolgreich abgeschlossen
 - 2008 **Zeitz, ehemaliges Hydrierwerk & Verladestation (GZ, vadose, UZ)**: Benzol, kiesig/sandig, Schlufflage, sandig/kiesig (-12 m) über Kohlekomplex
 - 2009 / **Biswurm ehemalige Verbrennungsanlage (GZ, vadose, UZ)**: CKW, geklüfteter Sandsteinaquifer, (Tonsteinbasis -21 m)
➔ Juni 2012, Abnahme der Anlage, Sanierungsbetrieb steht in Kürze an
- © VEGAS



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband Boden und Altlasten Baden-Württemberg Karlsruhe 15 19. Juni 2012

Thermische In-situ-Sanierung eines CKW-Schadens unter einem denkmalgeschützten Gebäude - von der Planung bis zur erfolgreichen Sanierung



Hans-Peter Koschitzky, Oliver Trötschler, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung, Universität Stuttgart



Stephan Denzel, dplan, Karlsruhe

Stadt Karlsruhe Umwelt- u. Arbeitsschutz



Claudia Purkhöld, Stadt Karlsruhe, Umwelt- und Arbeitsschutz



Wolfgang Maier-Oßwald, Steffen Hetzer (2010) Züblin Umwelttechnik GmbH, Stuttgart



Symposium Strategien zur Boden- und Grundwasseranierung 21. & 22. November 2011

Pilot-Standort Karlsruhe Durlach



Heutige Nutzung
Galerie und
Rahmenladen

Das 1574 von Herzogin-Anna
Schlachthaus
wurde im Dreißigjährigen Krieg zerstört und 1620 bis
1624 von der Stadt wieder erbaut.
Nach dem Brand von 1870 wurde es 1926 wiederholt
abgebrennt und 1930/31 neu gebaut. Bis in die
Mitte der 1950er Jahre wurde hier geschlachtet. 1959 wurde das
Küchlein entfernt.

© VEGAS



Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 17
19. Juni 2012

Pilot-Standort Karlsruhe Durlach



© VEGAS



Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 18
19. Juni 2012

Standortbeschreibung

Altstadt Karlsruhe-Durlach

historisches Gebäude, eng bebautes Wohngebiet



Ehemalige chem. Reinigung

Schadstoffquelle PCE

Schluffschicht in ungesättigter Zone,
Kapillarsaum und gesättigte Zone
bis ca. 5 m u. GOK

Schadstoffgehalte

bis 3800 mg/kg (in Schluff),
bis 60 mg/l im GW

Grundwasserschaden

Fahnenlänge: > 300 m
PCE Konzentration bis 350 µg/L

© VEGAS

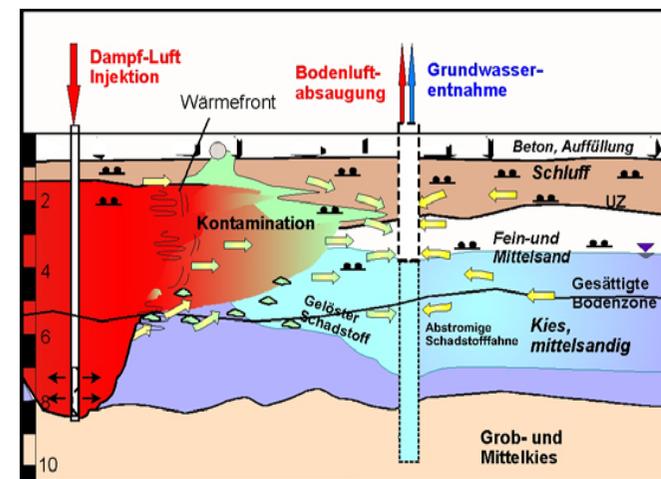


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 19
19. Juni 2012

Geologie und Sanierungskonzept Pilotierung



DL-Injektion
7- 8 m u. GOK,
max. 200 kg/h

**Bodenluft-
absaugung**
100 - 150 m³/h

**GW-Haltung
(Kühlwasser)**
1- 3 m³/h

Rheintallage: Quartärer, fluvialer Aquifer

© VEGAS

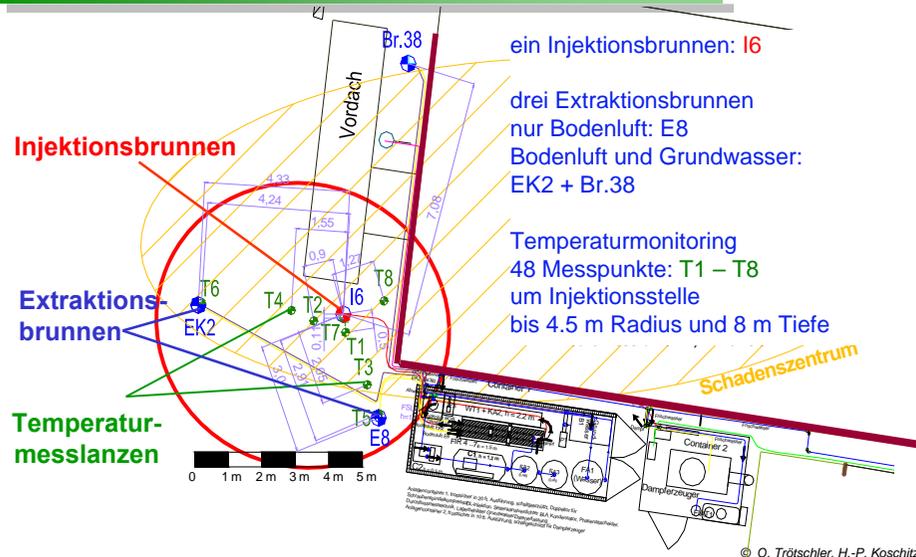


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 20
19. Juni 2012

Pilot – Testfeld: Ausstattung

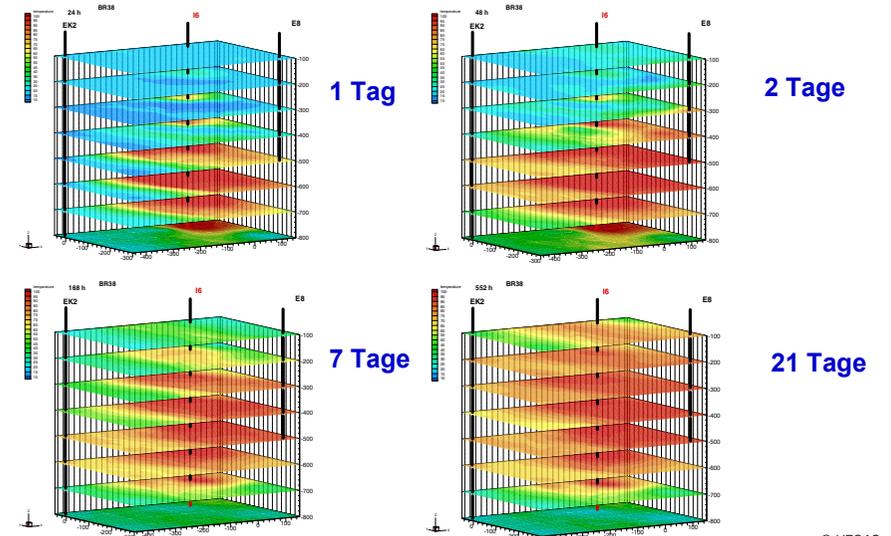


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband
Boden und Altlasten
Baden-Württemberg
Karlsruhe 21
19. Juni 2012

Dampfausbreitung - Temperaturmessungen

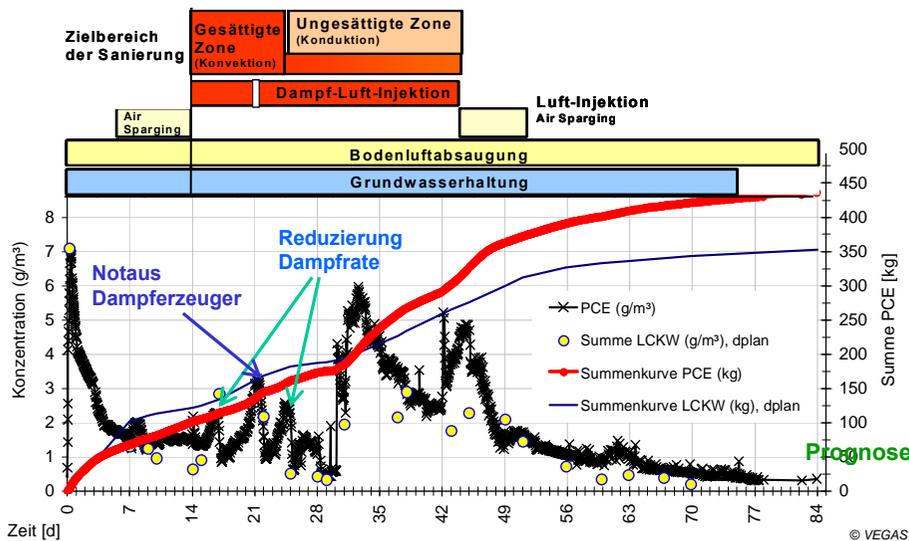


Stand der Technik bei
hermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband
Boden und Altlasten
Baden-Württemberg
Karlsruhe 22
19. Juni 2012

Massenbilanz Schadstoffaustrag



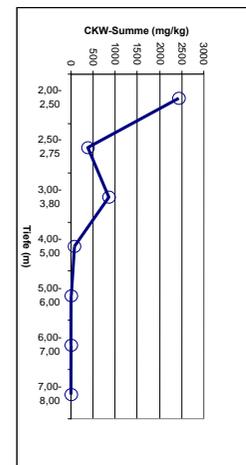
Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



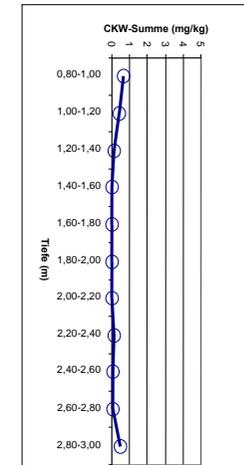
Fortbildungsverband
Boden und Altlasten
Baden-Württemberg
Karlsruhe 23
19. Juni 2012

Bodenproben vor & nach Pilot-Sanierung

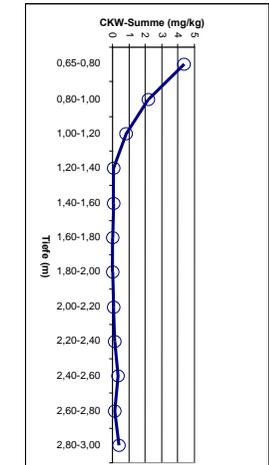
Sondierung Injektionsbr. I6
vor Pilot-Sanierung



Sondierung 1,5 m Abstand
zu I6 nach Pilotierung



Sondierung 3 m Abstand
zu I6 nach Pilotierung

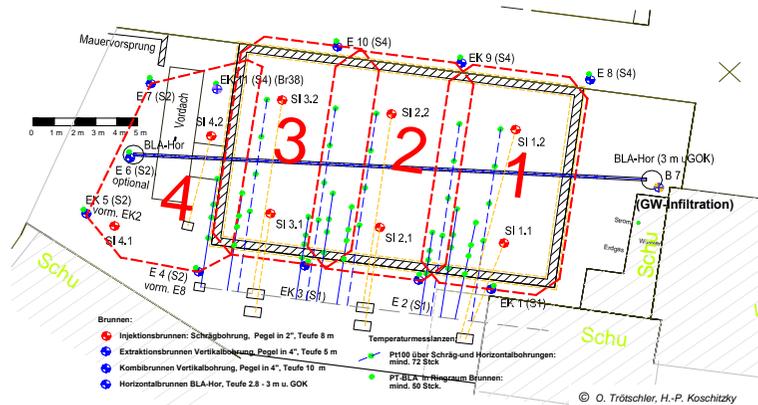


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband
Boden und Altlasten
Baden-Württemberg
Karlsruhe 24
19. Juni 2012

Vorschlag für Gesamtsanierung



- Sanierungsdauer: 10 Monate = 4 x 6 Wochen DLI
- Budget: 600.000 EUR
- Thermische Sanierung von ca. 1.600 m³ Boden
- 300 kW Dampf-Injektionsleistung

© VEGAS

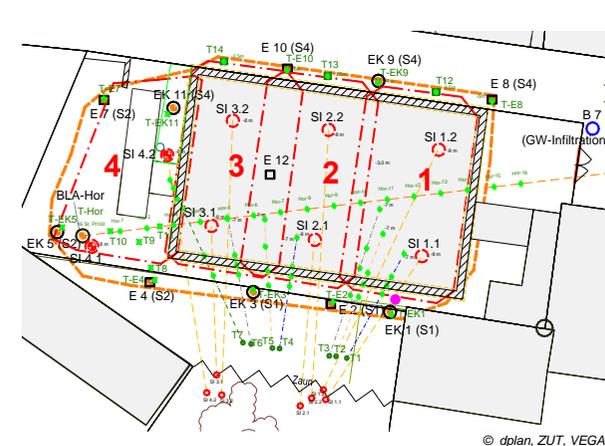


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 25
19. Juni 2012

Sanierungsausführung



- Ausführungsplanung und Ausschreibung: Standortgutachter dplan (& VEGAS)
- Auftraggeber: Stadt Karlsruhe
- Ausführung: Züblin Umwelttechnik
- Wissenschaftliche Begleitung/Beratung, Sanierungsüberwachung und -steuerung: VEGAS & dplan

- Begleitzkreis
RP-Ka, Stadt, LUBW...

Stadt Karlsruhe
Umwelt- u. Arbeitsschutz



© VEGAS

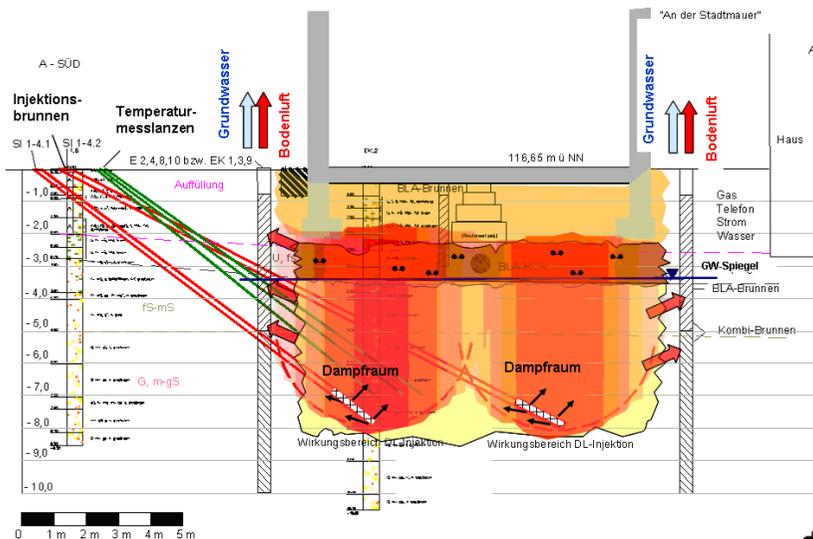


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 26
19. Juni 2012

Realisierung DLI unter dem Gebäude



Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 27
19. Juni 2012

Sanierungssteuerung / Kriterien

Steuerung / Bilanzierung

- Bestimmung / Überwachung der Dampfausbreitung mit ca. 120 Temperatursonden im Feld
- Überwachung des Schadstoffaustrags in der abgesaugten Bodenluft über GC-PID

Zwei Kriterien

1. Zieltemperatur von 92°C im Feld (gesättigte Zone) muss erreicht sein (Gemischtsiedetemperatur Wasser-PCE)
2. Schadstoffgehalt in Bodenluftabsaugung muss abfallen und gegen konst. Wert gehen
→ Feld gilt als saniert
→ Umschalten auf das nächste Feld

© VEGAS

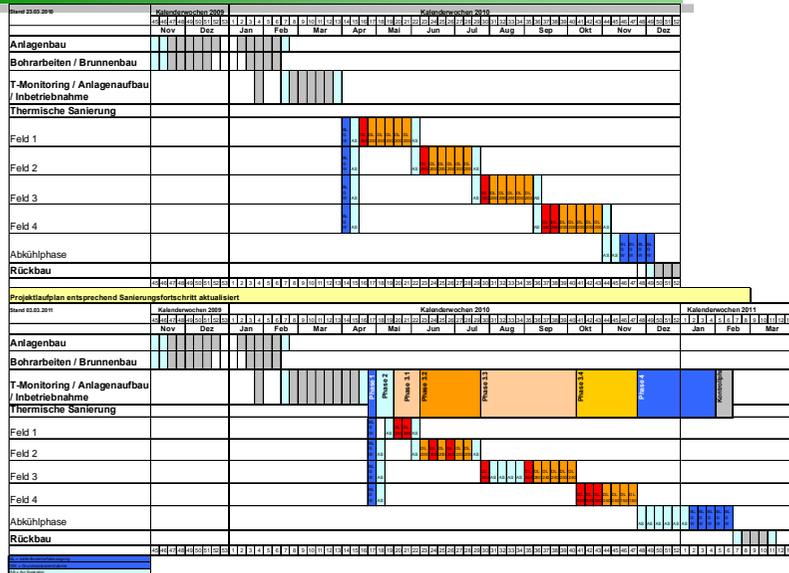


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 28
19. Juni 2012

Projektverlauf geplant - ausgeführt



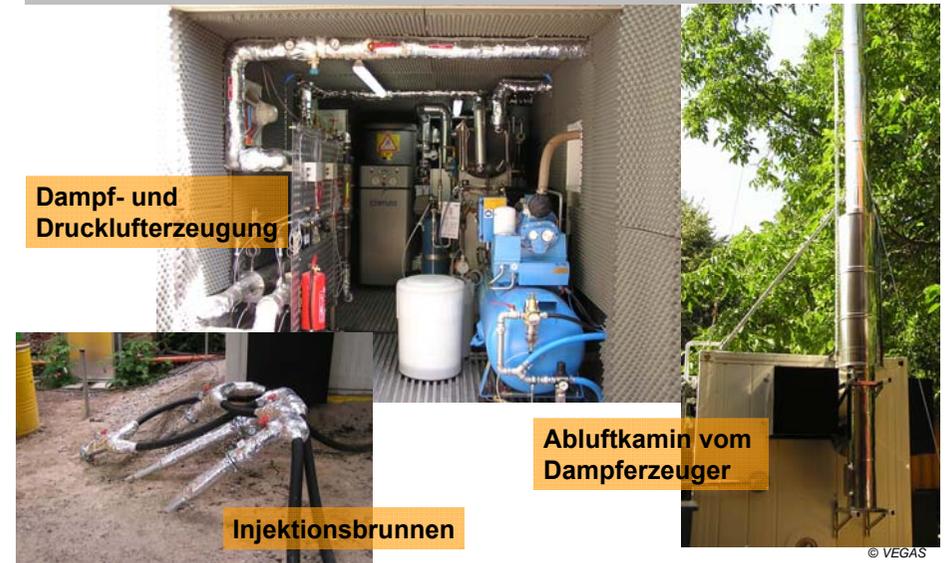
Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband Boden und Altlasten Baden-Württemberg
Karlsruhe 29
19. Juni 2012

© VEGAS

Betrieb Mai - Juli 2010



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband Boden und Altlasten Baden-Württemberg
Karlsruhe 30
19. Juni 2012

© VEGAS

Betrieb Mai - Juli 2010



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband Boden und Altlasten Baden-Württemberg
Karlsruhe 31
19. Juni 2012

© VEGAS

Betrieb Mai - Juli 2010



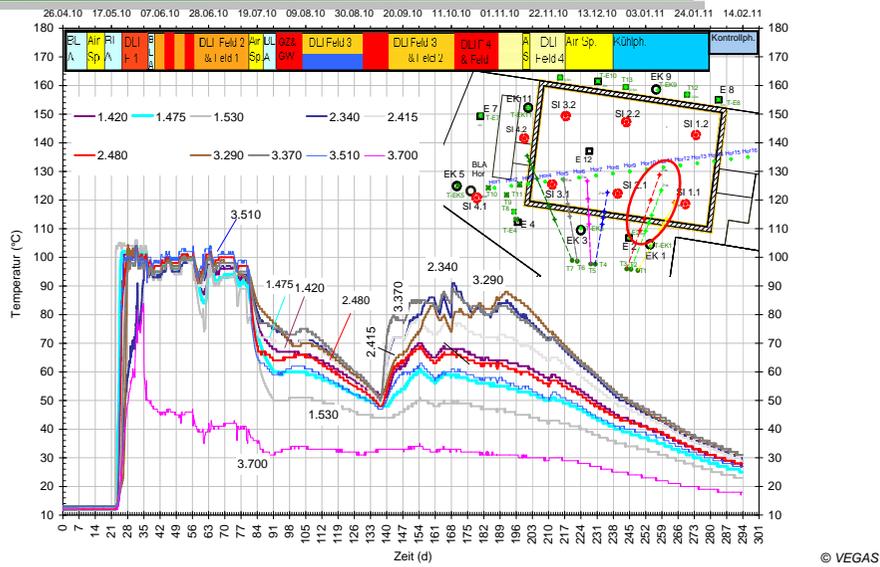
Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband Boden und Altlasten Baden-Württemberg
Karlsruhe 32
19. Juni 2012

© VEGAS

Temperaturen im Sanierungsfeld 1



© VEGAS

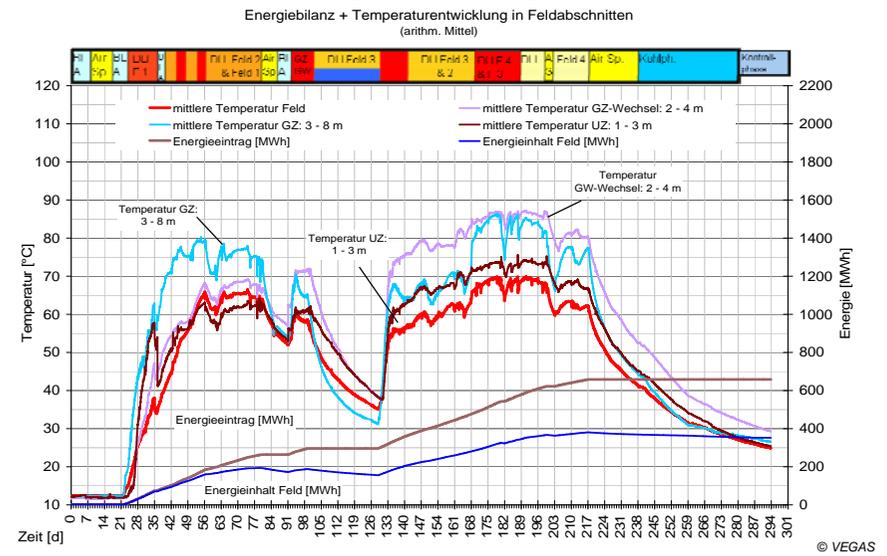


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 33
19. Juni 2012

Mittlere Temperaturen im Sanierungsfeld



© VEGAS

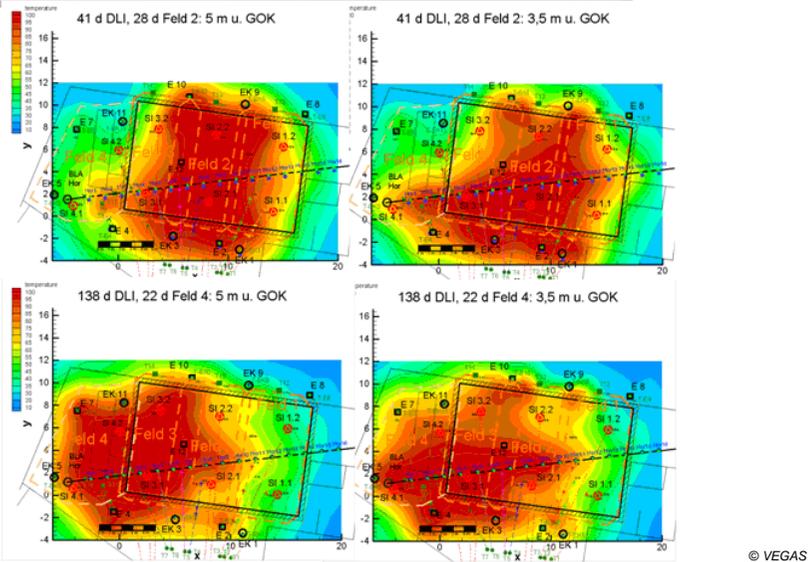


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 34
19. Juni 2012

Temperaturausbreitung



© VEGAS

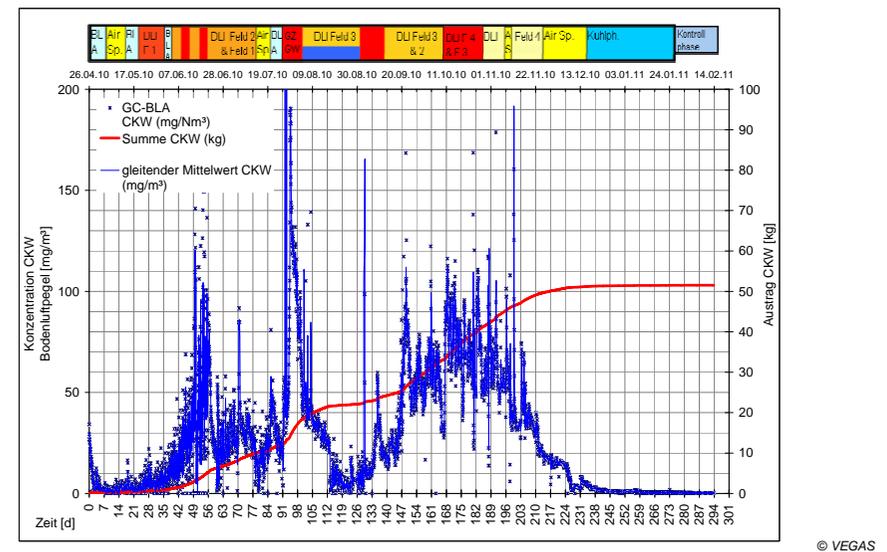


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 35
19. Juni 2012

CKW-Austrag über die Bodenluft



© VEGAS

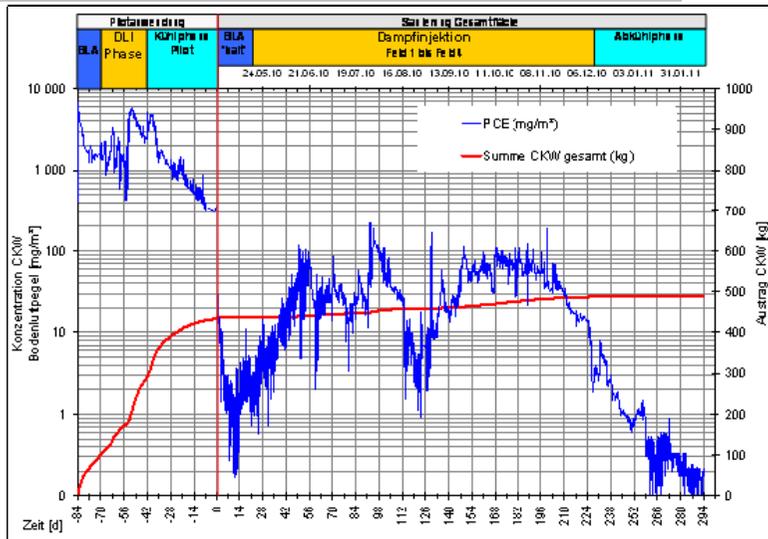


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 36
19. Juni 2012

Schadstoffaustrag Bodenluft



© VEGAS



Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsbund
Boden und Altlasten
Baden-Württemberg
Karlsruhe 37
19. Juni 2012

Zusammenfassung / Kennwerte der Sanierung

- **Gesamtdauer** inkl. Bauarbeiten ca. 70 Wochen
- **Sanierungsdauer** 42 Wochen (ca. 30 Wochen DLI)
- **Schadstoffentfernung** 50 kg LCKW, (500 kg inkl. Pilotversuch)
- **Sanierungszielwerte** wurden erreicht
(10 mg/m³ in der Bodenluft, << 10 µg/L im Grundwasser)
- **Drastischer Rückgang der Grundwasserbelastung**
- vorher: 60.000 µg/L
- aktuell: < 1,0 µg/L bis n.n.
- **Rückgang der Raumluftbelastung**
- vorher: LCKW bis 10 mg/m³
- während und nach Sanierung: LCKW = 0 mg/m³
- **Kosten** Auftragswert: ca. 600.000 € 
- 25% Bauleistung
- 25% Verbrauchsstoffe (Hauptanteil Gas zur Dampferzeugung)
- 50% Anlagenbau + Sanierungsbetrieb
→ Spezifische Betriebskosten ca. 180 €/to Boden (Anhaltswert)
- **Energiebilanz** 470 kWh/m³ Boden (84% thermisch; 16% elektrisch)
Gesamtverbrauch: 780 MWh (thermisch aus Primärenergie), 153 MWh elektrisch

© VEGAS

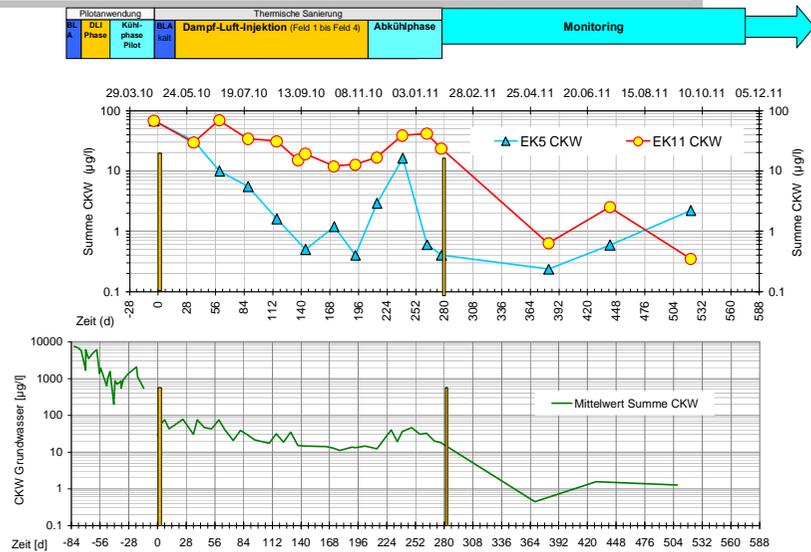


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsbund
Boden und Altlasten
Baden-Württemberg
Karlsruhe 38
19. Juni 2012

Entwicklung der CKW - Konzentrationen im Grundwasser



© VEGAS



Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsbund
Boden und Altlasten
Baden-Württemberg
Karlsruhe 39
19. Juni 2012



Standort nach der
Sanierung (15.11.2011)



Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsbund
Boden und Altlasten
Baden-Württemberg
Karlsruhe 40
19. Juni 2012

Dampf-Luft-Injektion Pilotanwendung bei einem Benzolschaden

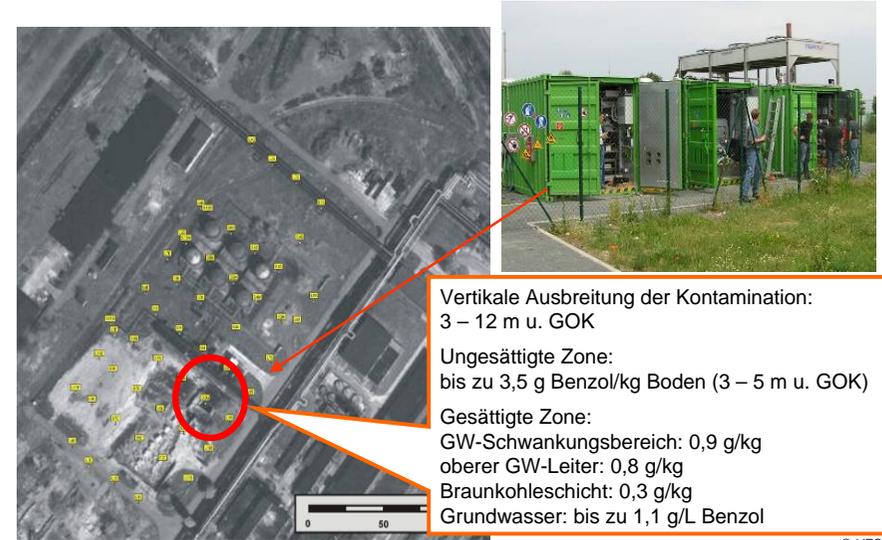
Hans-Peter Koschitzky¹
Oliver Trötschler¹ & Berit Limburg¹
Markus Hirsch², Holger Weiß²



¹ VEGAS, Universität Stuttgart,
² Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig



© VEGAS



Vertikale Ausbreitung der Kontamination:
3 – 12 m u. GOK
Ungesättigte Zone:
bis zu 3,5 g Benzol/kg Boden (3 – 5 m u. GOK)
Gesättigte Zone:
GW-Schwankungsbereich: 0,9 g/kg
oberer GW-Leiter: 0,8 g/kg
Braunkohleschicht: 0,3 g/kg
Grundwasser: bis zu 1,1 g/L Benzol

© VEGAS



Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband
Boden und Altlasten
Baden-Württemberg
Karlsruhe 41
19. Juni 2012

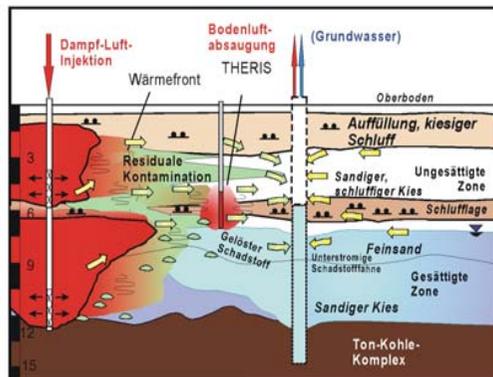


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband
Boden und Altlasten
Baden-Württemberg
Karlsruhe 42
19. Juni 2012

Geologie / DLI Sanierungskonzept



- Injektion Dampf-Luft auf zwei Ebenen:
 - oberhalb Schlufflage
→ ungesättigte Zone
 - oberhalb Ton-Kohle-Komplex
→ gesättigte Zone und Schlufflage über Konvektion

„Sanierungsziel“ in 5 - 6 Monaten Betrieb mit 4 Monaten DLI:
→ Erwärmung Kubatur (ca. 1600 m³) über Gemischsiedetemperatur (70°C)
→ Reduzierung Schadstoffmasse um 99%
→ Reduzierung Benzolkonzentrationen > 99%

© VEGAS



Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband
Boden und Altlasten
Baden-Württemberg
Karlsruhe 43
19. Juni 2012

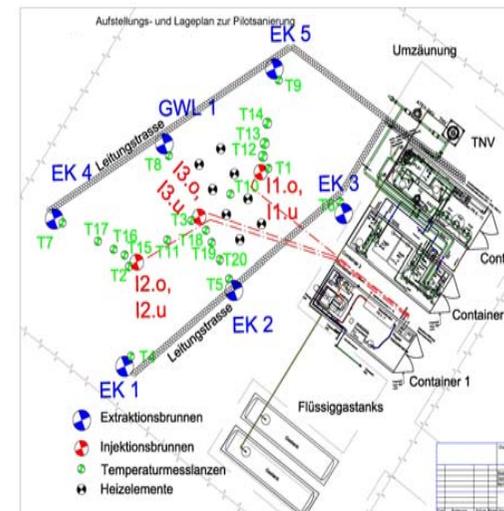


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband
Boden und Altlasten
Baden-Württemberg
Karlsruhe 44
19. Juni 2012

Testfeld Zeitz



- 3 Injektionsbrunnen (2 Teufen)
- 6 BLA-Brunnen mit GW-Haltung
- 8 elektrische Heizelemente (1,5 kW, „Feste Wärmequelle“)
- 20 Temperaturmesslanzen (Pt100) auf Messachsen und im Ringraum der Brunnen zur Temperaturüberwachung
→ insgesamt 121 Messstellen

© VEGAS

Eindrücke vom Testfeld



© VEGAS



Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 45
19. Juni 2012

Eindrücke vom Testfeld



© VEGAS

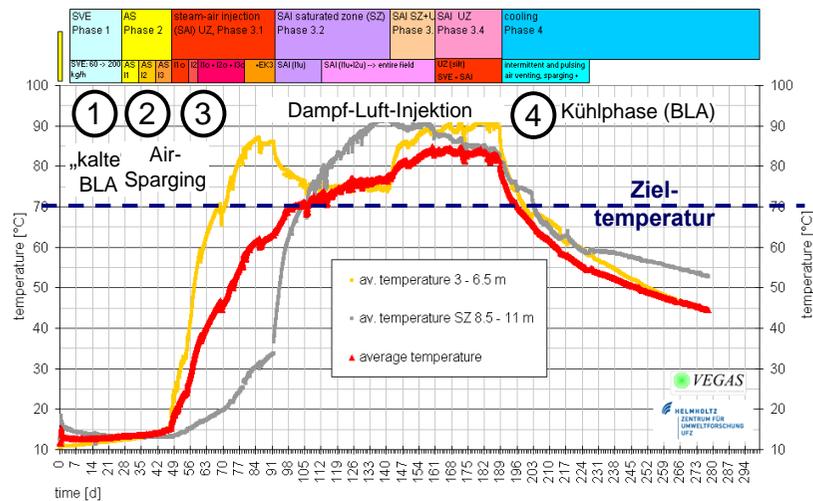


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 46
19. Juni 2012

Erwärmung im Sanierungsfeld

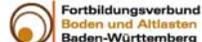


Ziel → mittlere Temperatur im Sanierungsfeld > 75°C

© VEGAS

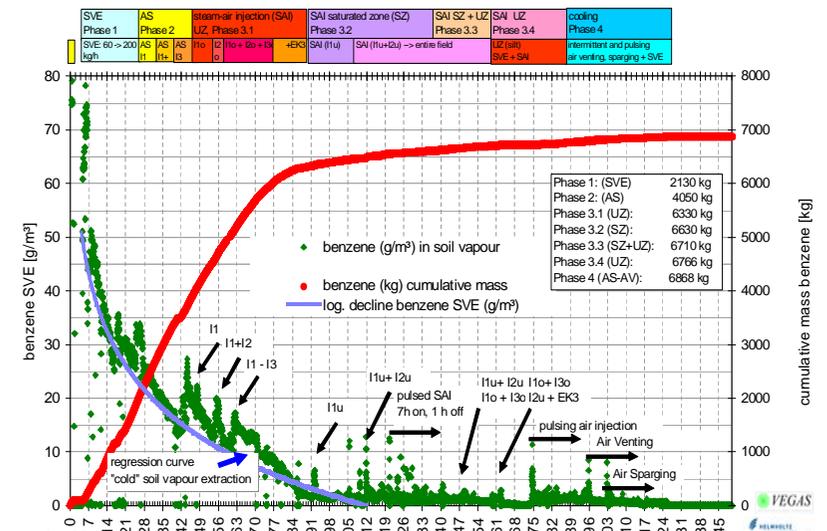


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 47
19. Juni 2012

DLI Zeit: Schadstoffaustrag



© VEGAS

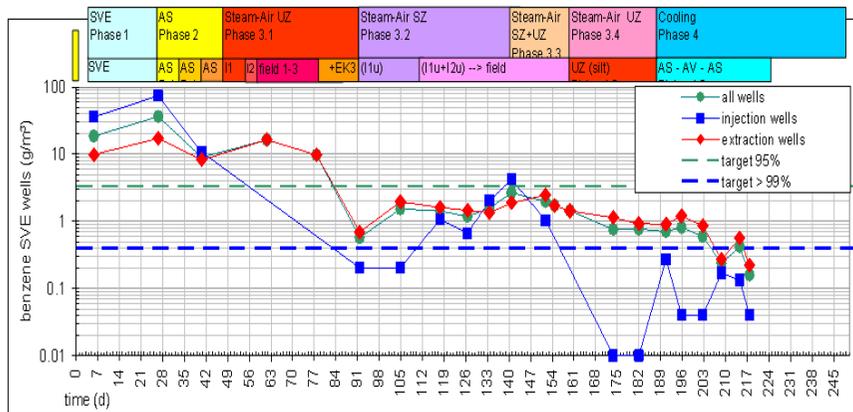


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 48
19. Juni 2012

Benzol-Konzentration in Bodenluftabsaugung



- Rückgang der Benzolgehalte um 99%
- Minderung der Benzolgehalte im Boden > 99% basierend auf Gleichgewichtsberechnung Bodenluft-Porenwasser-Boden

© VEGAS



Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 49
19. Juni 2012

Zusammenfassung Zeit (1)

Erwärmung Untergrund

- **Ungesättigte Zone**
 - Dampffortschritt und Erwärmung entsprechend dem Energieeintrag, (ca. 30 % Verluste)
 - Zieltemperatur (>75° C) um 10 K übertroffen in 5 Wochen
- **Gesättigte Zone**
 - Reichweiten der Dampfausbreitung größer 5 m, d.h. ca. doppelt so groß als für anisotrope Verhältnisse berechnet (2 m)
 - Zieltemperatur (>75° C) nach 6 Wochen um 15 K übertroffen
- **Dampfausbreitung**
 - Asymmetrisch, d.h. kein voller Dampfdurchbruch am EK2

© VEGAS



Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 50
19. Juni 2012

Zusammenfassung Zeit (2)

Sanierungsfortschritt

- **Schadstoffaustrag über „kalte“ Bodenluftabsaugung**
Entfernung von ca. 4.000 kg Benzol (~ 59% der Gesamtmasse), in 5 Wochen, d.h. bereits mehr Masse als über Bodenanalysen abgeschätzt (1,7 t)
- **Schadstoffaustrag über DLI, in UZ**
 - mehrtägige Erhöhung des Schadstoffaustrags
 - ca. 2.400 kg Benzol (~ 35%) in 7 Wochen Betrieb
- **Schadstoffaustrag über DLI, GZ**
 - ca. 300 kg Benzol (~ 5%) in 7 Wochen, → nicht sehr effektiv

© VEGAS



Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 51
19. Juni 2012

Zusammenfassung Zeit (3)

Sanierungserfolg

- **Massenausrag**
 - über 99% Benzol über SVE entfernt
- **Grundwasser**
 - Reduzierung der Benzolkonzentration im Grundwasser um 75%, aber immer noch hohe Werte (ca. 100 mg/L)
 - Komplexes hydraulisches System, Lang-Zeit Monitoring erforderlich

© VEGAS

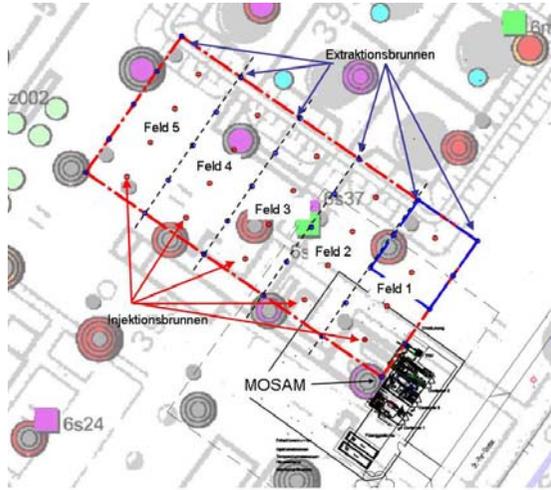


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 52
19. Juni 2012

Sanierungsvorschlag und Kostenschätzung Zeitz



Vorschlag thermische Sanierung April 2008

- 14.000 m³ Boden
- Fläche von 1.700 m²
- Laufzeit ca. 1,5 bis 3 Jahre je nach Leistung der Aggregate
- Geschätzte Sanierungskosten ca. 1,8 Mio EUR
- spezifische Sanierungskosten 130 EUR/m³ bzw. 80 EUR/to Boden

➔ **Wurde nicht umgesetzt**

© VEGAS



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 53
19. Juni 2012

Altstandort Biswurm - ehemaliger Verbrennungsplatz

Thermische In-situ-Sanierung Dampf-Luft-Injektion im Kluffgestein

Hans-Peter Koschitzky¹, Oliver Trötschler¹

Bernd Lidola², Michaela Epp²

Stefan Schulze³ Markus Hirsch⁴



¹ VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung, Universität Stuttgart

² Stadtbauamt Villingen-Schwenningen, Abteilung Wasser und Boden

³ GEOsens, Ingenieurpartnerschaft, Ebringen

⁴ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, UFZ Leipzig



© VEGAS



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren

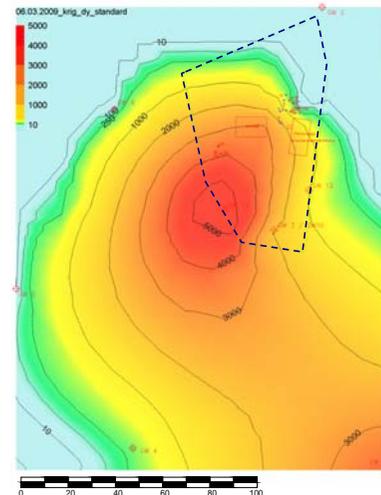


Karlsruhe 54
19. Juni 2012

Schadenssituation

Schadensbild 2007 / 2009

- ➔ ca. 2.800 m² Kernbereich (Schadensquelle) bis 40 m Mächtigkeit
- ➔ CKW bis 40 mg/L im Grundwasser, bis 3.000 mg/m³ in der Bodenluft
- ➔ Länge Schadstofffahne unbekannt, mind. 1 ha Fläche kontaminiertes Grundwasser
- ➔ Schadstoffe mit hohem Potenzial in UZ und geringerem Potenzial in gesättigter Zone

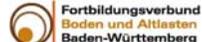


Stichtag: 06.03.2009

© VEGAS

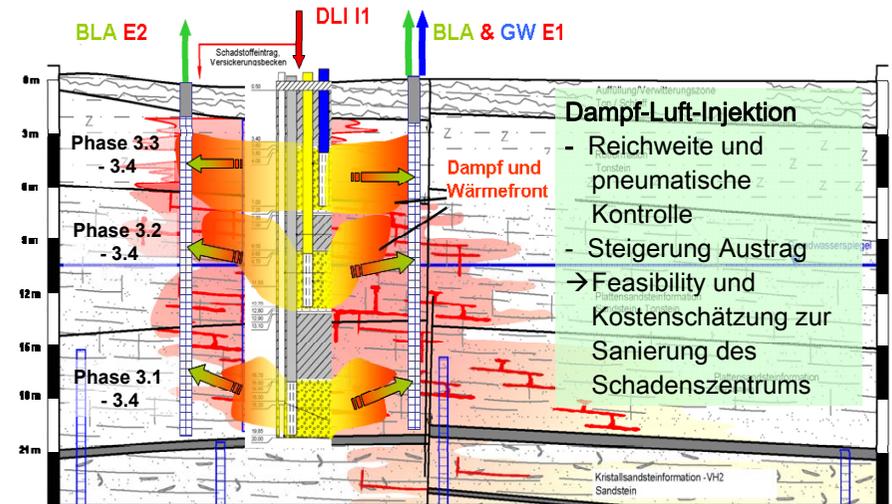


Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 55
19. Juni 2012

Geologie und thermische Erschließung



Vorlage GEOsens (2007) ©

© VEGAS

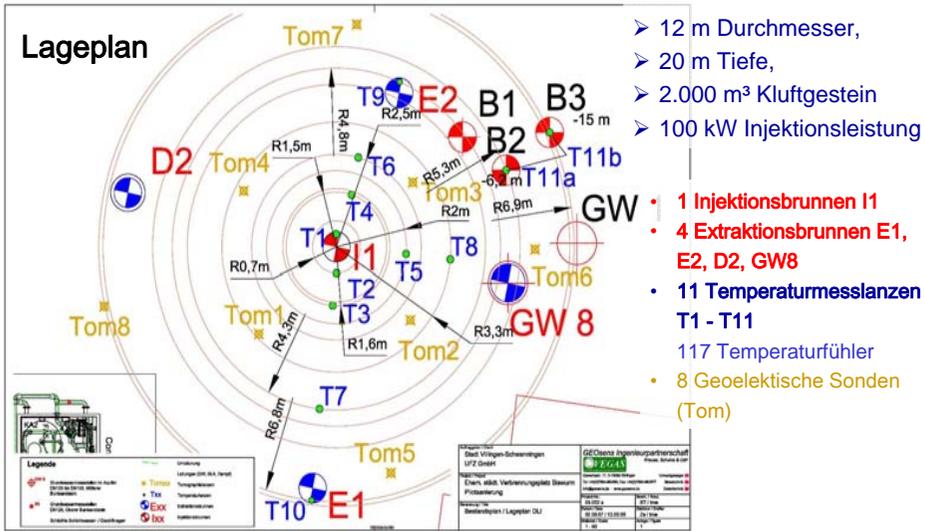


Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 56
19. Juni 2012

Ausstattung Pilotfeld Biswurm



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 57
19. Juni 2012

Eindrücke vom Testfeld (I)



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 58
19. Juni 2012

Eindrücke vom Testfeld (II)

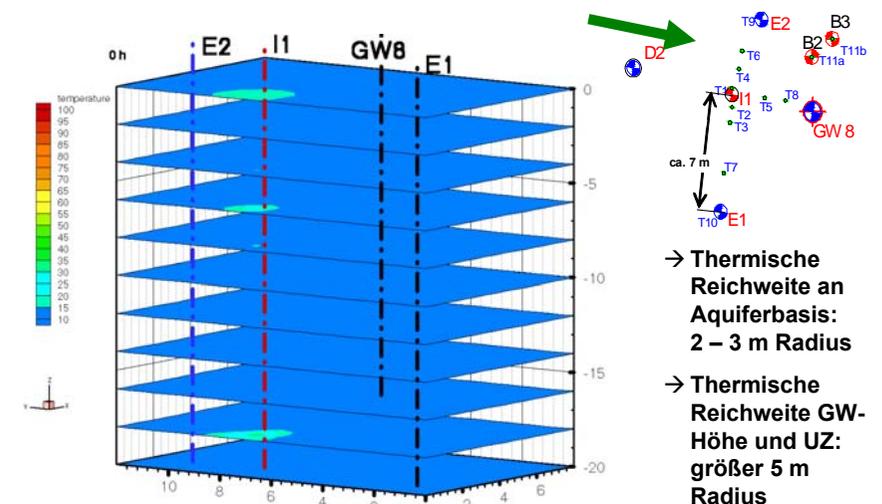


Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 59
19. Juni 2012

Dampf- und Wärmeausbreitung



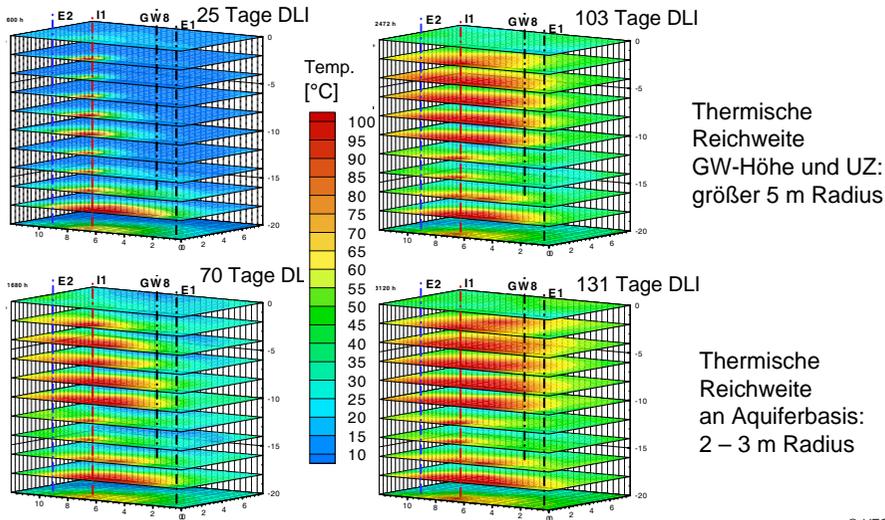
Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 60
19. Juni 2012

© VEGAS

Überblick Wärmeausbreitung



Thermische Reichweite GW-Höhe und UZ: größer 5 m Radius

Thermische Reichweite an Aquiferbasis: 2 – 3 m Radius

© VEGAS

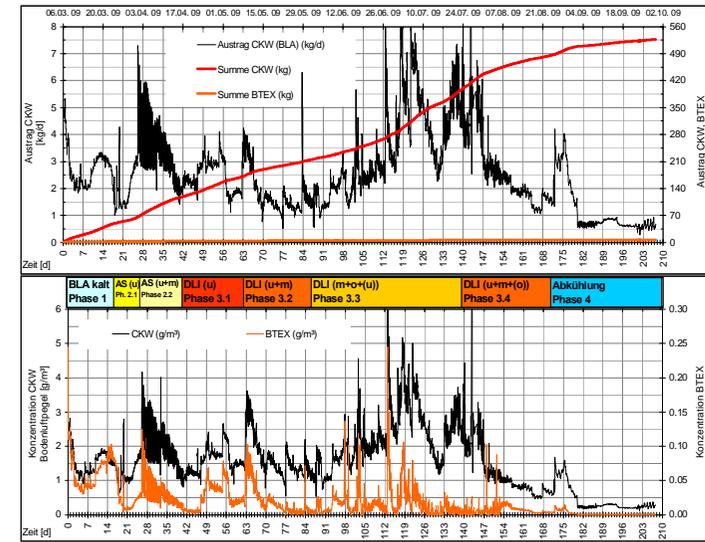


Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 61
19. Juni 2012

Schadstoffaustrag Bodenluft



- Hohes Schadstoffpotenzial GW-Wechsel und UZ
- Air-Sparging mit zeitlich limitierter, hoher Austragsleistung
- Höchste Austragsleistungen DLI auf GW-Höhe und in UZ
- CKW-Gehalt um Faktor 15 reduziert

© VEGAS

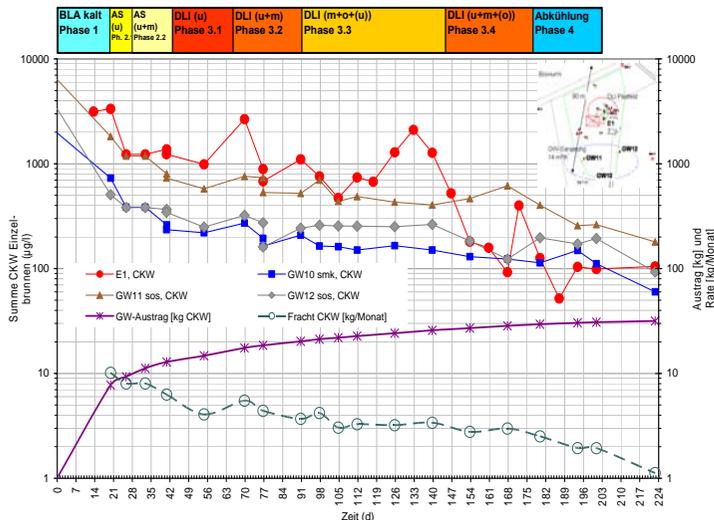


Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 62
19. Juni 2012

Entwicklung CKW-Gehalte Grundwassersanierung

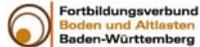


- Rückgang an E1 (Abstrom Pilotfläche) auf 100 µg/l
- Kein Wiederanstieg nach Sanierung
- Emission Schadensherd bei 1,1 kg CKW je Monat
- CKW-Austrag über GW „nur“ 6% des Gesamtaustrags

© VEGAS



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 63
19. Juni 2012

Zusammenfassung Pilotierung Biswurm

- Eignung der thermischen In-situ-Sanierung mit DLI für den vorliegenden oberen Kluftaquifer (Plattensandstein) wurde bestätigt
- Steigerung des Schadstoffaustrags um einen Faktor 2 – 5 im Vergleich zum Air-Sparging, bzw. zur „kalten“ Bodenluftabsaugung
- Dampfausbreitung auf Höhe der Aquiferbasis mit 4 – 6 m Durchmesser fiel deutlich geringer aus als für die oberen Bereiche
- Im oberen Aquifer und in der ungesättigten Zone thermische Reichweite von mehr als 10 m Durchmesser möglich

© VEGAS



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 64
19. Juni 2012

Empfehlung Biswurm

- **Sanierungsplanung** für eine thermische Sanierung des oberen Grundwasserbereichs und der ungesättigten Zone mittels DLI für eine Fläche von ca. 2.800 m² und einer Mächtigkeit von 15 m:
Kostenrahmen für ca. 80.000 to Festgestein:
2,6 Mio. EUR netto in 3 Jahren Betriebszeit
- **Kostenparität** der DLI mit der Grundwassersicherung **nach 20 – 25 Jahren Betriebsdauer**
- Geschätzte **Betriebsdauer Grundwassersicherung** länger als **100 Jahre**
- Im **oberen Plattensandsteinaquifer** kann eine **kosten- und zeiteffiziente Thermische Sanierung** erfolgen
- Aus **Kosten-Nutzen Erwägungen keine Empfehlung für DLI im unteren Aquiferbereich**, wengleich dies technisch möglich ist

© VEGAS



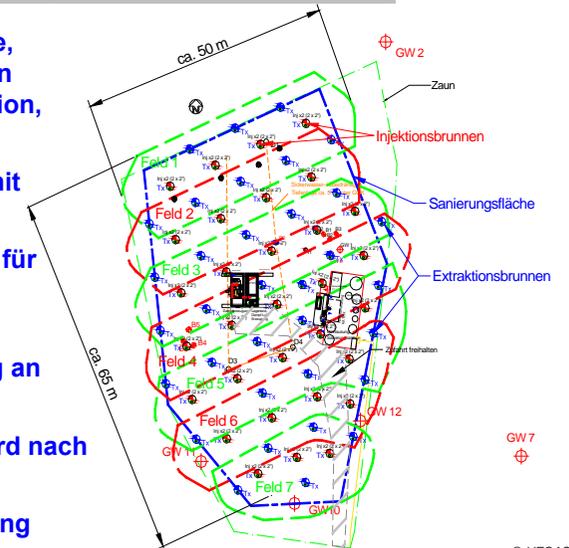
Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband
Boden und Altlasten
Baden-Württemberg
Karlsruhe 65
19. Juni 2012

Planung Thermische In-situ-Sanierung Biswurm

- **7 Sanierungsabschnitte, je 4-5 Injektionsbrunnen**
33 Monate Dampf-injektion, 4 Jahre Projektdauer
- **31 Injektionsbrunnen mit 2 Ebenen**
- **34 Extraktionsbrunnen für Bodenluft**
- **Betrieb der Grundwassersicherung an Gelände-grenze**
- **abschnittsweise von Nord nach Süd**
- **400 kW Injektionsleistung**



© VEGAS

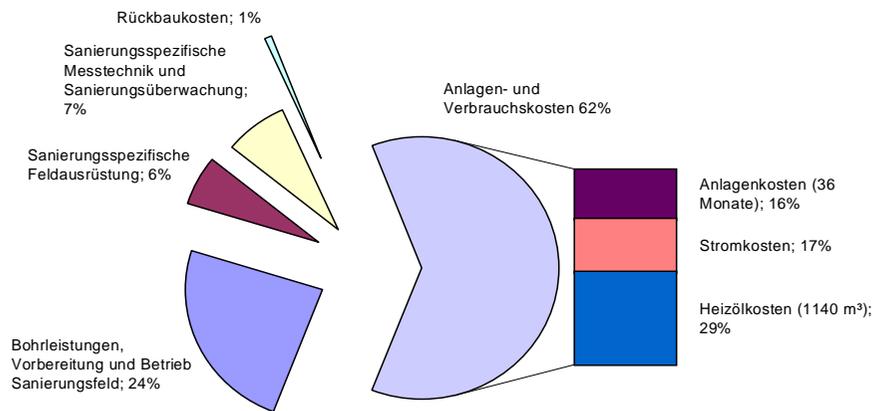


Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband
Boden und Altlasten
Baden-Württemberg
Karlsruhe 66
19. Juni 2012

Kostenschätzung Sept. 2009 Thermische Sanierung Biswurm



- ➔ **4 Jahre Projektdauer**
- ➔ **Kosten Thermische Sanierung: 2,6 Mio. EUR netto**
- ➔ **Jährliche Betriebskosten Grundwassersicherung: 98.000 EUR**

© VEGAS



Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband
Boden und Altlasten
Baden-Württemberg
Karlsruhe 67
19. Juni 2012

Aktueller Stand Biswurm

Ausschreibung Mai 2011

Für die Stadt Villingen-Schwenningen wird auf der Grundlage der VOB/A für die Maßnahme „Ehem. städt. Verbrennungsplatz Biswurm; Bodensanierung mittels Dampf-Luft-Injektion“ im Stadtbezirk Villingen die Bereitstellung und der 3-jährige Betrieb einer Dampf-Luft-Injektionsanlage mit Messstellen- und Brunnenbau wie folgt öffentlich ausgeschrieben:

Vergabe Sommer 2011

Umsetzung seit Herbst 2011

- 37 x BLA (4"), 89 x Temperaturlanzen, 5 x Grundwassersicherungsbrunnen (5")
➔ Bohrmeter: ca. 1900 m;
- 9 Sanierungsfelder / je 3 Monate DLI
- mittlere Injektionsleistung 400 kW (500 kg/h Dampf + 40 kg/h Luft)
- Abluftbehandlung mit Katox und Wäscher
- Installierte Leistung DLI: 1000 kg/h Sattdampf = 750 kW Wärmeleistung
- Installierte elektrische Leistung: 80 kW

© VEGAS



Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Fortbildungsverband
Boden und Altlasten
Baden-Württemberg
Karlsruhe 68
19. Juni 2012

Bohrarbeiten nahezu „abgeschlossen“



© VEGAS



Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 69
19. Juni 2012

Aufbau nahezu „abgeschlossen“, endgültige Abnahme und Inbetriebnahme stehen noch aus



© VEGAS



Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 70
19. Juni 2012

Zusammenfassung & Ausblick Dampf-Luft-Injektion

- **Dimensionierung Dampf-Luft-Injektion entsprechend Stand der Technik** - Sanierungsplanung möglich (Sicherheitsfaktoren)
 - ➔ standortspezifische Pilotierung (Machbarkeitsstudie)
- **Dimensionierungstool** zur Auslegung einer Sanierung wurde erarbeitet und wird „public“ zur Verfügung stehen (Vorstellung TASK Praxistage 17.-18. September 2012, UFZ Leipzig)
- **Vollständige und nachhaltige Sanierung von Schadensherden innerhalb definierten und bestimmbarer Zeiträume** möglich
- „intensive“ Sanierungsbegleitung und -steuerung (Online-Datenerfassung, Anlagensteuerung) erforderlich
- **Mehrere Referenzprojekte liegen vor**

© VEGAS



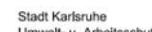
Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 71
19. Juni 2012

Zusammenfassung & Ausblick Dampf-Luft-Injektion

- **Kosten stark abhängig von Standortbedingungen, Feldgröße und Schadstoffverteilung**
- **Einsatzbereiche und Anwendungsgrenzen werden stetig erweitert** (z.B. Durchlässigkeitsbereich der Aquifere, Schadstoffspektren)
- **Bestimmung der Einsatzgrenzen über Pilotanwendungen**
Kluftaquifere, dampfunterstützte konduktive Sanierung gering durchlässiger Sedimente (Schluffe, Tone), Tiefen über 20 m, große Aquifermächtigkeiten
- ➔ **Entwicklung war nur möglich durch viele Beteiligte und Geldgeber**



© VEGAS



Stand der Technik bei
thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 72
19. Juni 2012

Wie geht's weiter: laufende und zukünftige Projekte

Technologie-Transfer durch Pilot-Anwendungen

2009 / **Biswurm ehemalige Verbrennungsanlage (GZ, vadose, UZ):**
 2011 CKW, geklüfteter Sandsteinaquifer, (Tonsteinbasis -21 m)
 → Juni 2012 Abnahme der Anlagen, Sanierungsbetrieb wird in Kürze aufgenommen

Seit 2010 Feasibility, Planung Oberursel, CKW, Altstadt unter einem Gebäude, schlecht durchlässige Bodenschicht
 → derzeit **Anlagenaufbau**

Seit 2011 Feasibility / Pilotierung unter einem Parkhaus
 → derzeit **Pilotinjektion**

2012 ff: einige Anfragen NRW, Schweiz,

© VEGAS



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 73
19. Juni 2012

Aktuelle Informationen zu den Verfahren

© VEGAS



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 74
19. Juni 2012

Aktuelle Informationen zu den Verfahren

© VEGAS



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 75
19. Juni 2012

Informationen und Weiterbildung

© VEGAS



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 76
19. Juni 2012

Dank an alle Beteiligten und Ihnen für Ihr Interesse

Gerne beantworte ich Ihre Fragen

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



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 77 19. Juni 2012

ÖVA-Sanierungsreport SR 001 (Oktober 2012)

CKW-Boden- und Grundwasseranierung unter einem historischen, bewohnten Gebäude mittels Dampf-Luft-Injektion ins Grundwasser

1. ERGEBUNG | ÜBERSICHT
Mitten in der Altstadt von Karlsruhe befindet sich unterhalb der Rückwärtsterrasse einer ehemaligen Chemischen Fabrikung das Schadstoffzentrum eines CKW-Schadens (v. A. PCE), der sich über die gesamte Länge bis in die geringste Zone erstreckt. Im Rahmen eines Vorversuchs (Pilotanwendung) des innovativen Verfahrens der Dampf-Luft-Injektion (DLI) zur Prüfung der Durchführbarkeit und der optimalen Auslegung im Jahr 2005 sowie der anschließenden Sanierung im Jahr 2010 konnten rd. 500 kg CKW aus der gestrigsten und der ungestrigsten Zone entfernt werden. Die Sanierungslänge betrug rund 220 m² unterhalb einer ehemaligen chemischen Fertigung und dem Gebäudebereich, die vertikale Ausdehnung des Schadens konnte auf 7 m u. G. begrenzt werden. Das denkmalgeschützte Gebäude wird im Erdgeschoss als Atelier genutzt, die oberen Stockwerke sind bewohnt.

10. PROJEKTZUSAMMENFASSUNG
Auftraggeber: Stadt Karlsruhe / Umwelt- und Arbeitsschutz / Fachbereich
Planer: Alwin Grottel / Umwelttechnik / Ingenieurbüro und Umweltplanung / Karlsruhe
Ausführender: Zöllner Umwelttechnik GmbH / Karlsruhe
Betreiber/Anfertiger: Henric Herzer
Wissenschaftliche Begleitung: Umwelttechnik / Umweltanwendung für Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) / Henric Herzer, Henric Herzer, Henric Herzer

11. ABSCHLIEßENDE BEWERTUNG
11.1 STANDORTCHARAKTERISTIK, BODEN- UND GROUNDWATERCHARAKTERISTIK
Für die Stadt Karlsruhe als Grundstücksbesitzer war bei der Entscheidung für das Verfahren sowohl die kurze Sanierungsdauer als auch die wirtschaftliche Vorteil im Vergleich zu anderen Verfahren ausschlaggebend. Auch die Eignung vor dem Hintergrund der schwierigen baulichen Randbedingungen (Altstadtlage, enge Wohnbebauung, Denkmalschutz) spielte eine Rolle. Des Weiteren wurden langjährige Nutzungseinschränkungen wie z.B. bei punktförmigen Maßnahmen vermeiden. Durch die gute Zusammenarbeit und das hohe Engagement aller Beteiligten konnte die Sanierung innerhalb der zeitlichen und finanziellen Vorgaben erfolgreich abgeschlossen werden.

11.2 PLANEN
Die Anwendung innovativer Verfahren gelingt nur mit einem hohen Maß an Transparenzhaftigkeit oder -berätigung. Die Vorschaffung eines Pilotversuchs, neben der bereit angelegten Information der Betroffenen im Vorfeld, war hier wesentlich für die Akzeptanz des Verfahrens. Die zeitlichen und finanziellen Vorteile des Verfahrens waren maßgebliche Parameter für die Auswahl des Verfahrens zur Sanierung der ebenfalls abgegrenzten Schadstoffquelle. Jede Anwendung des Verfahrens bedarf zurecht einer standortspezifischen, detaillierten Untersuchung der Maßnahme.

11.3 ERGEBNIS-PANEELE | „TECHNOLOGIEINFORMATION“
Ziel von ÖVA-Sanierungsreports ist, einen zeitnahen Informationsanreicherer zum erfolgreichen Einsatz innovativer Verfahren zu ermöglichen. Auf Basis der vorliegenden Informationen ist die dargestellte Anwendung als vorbildlich zu beurteilen, was durch intensive wissenschaftliche Begleitung und gute Interaktion aller Beteiligten begründet ist. Seitens des ÖVA wurde mit der Methode dieser Ansicht zum Sachstand klar erörtert und ein Experte konnte im Zuge der Suchen der Sanierung einen Ortsausdrachen durchführen. Mit Dampf-Luft-Injektionen in der wassergesättigten Bodenzone wurde eine neue Technologie zur Verfügung, die im Vergleich zu bisherigen Lösungen („Luftinjektion“) eine rasche Dekontamination am Schadensherd ermöglicht. Die Technologie kann unter Beachtung möglicher Setzungen auch bei bestehender Bebauung eingesetzt werden. Auch unter engen in Österreich häufigen hydrogeologischen Randbedingungen ist eine Anwendung möglich. Eine hydraulische Absorptionszone wird auch für Dünnschicht als Grundwasseranierung für die Genesung des Verfahrens gesehen. Das gängige Beispiel zeigt, dass eine in-situ-Technologie entwickelt wurde, die bei entsprechenden Standortbedingungen sowie sorgfältiger Planung und Begleitung eine wirksame Dekontamination ermöglicht.

© VEGAS



Stand der Technik bei thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren



Karlsruhe 78 19. Juni 2012

© VEGAS