

# Thermische In-situ-Verfahren: Möglichkeiten und Fallbeispiele

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](http://www.vegas.uni-stuttgart.de)

**BEW** Das Bildungszentrum für die Ver- und Entsorgungswirtschaft

Altlastensanierung – Erfahrungen und aktuelle Aspekte zur Konzeption und Durchführung  
BEW – Fortbildung, 19. November 2014, Duisburg

## Was können Sie erwarten

### Entstehung von Schadensherden Grundlagen Thermische Sanierung Thermische In-Situ-Sanierungsverfahren Technologietransfer / Fallbeispiele

- Pilotierung und Sanierung „Karlsruhe Durlach“, CKW
- Standort Biswurm „Kluftgestein“ CKW, Pilotierung und laufende Sanierung
- Standort im Nagoldtal, CKW, Machbarkeitsstudie, Planung und aktuelle Umsetzung

### Stand der Entwicklungen

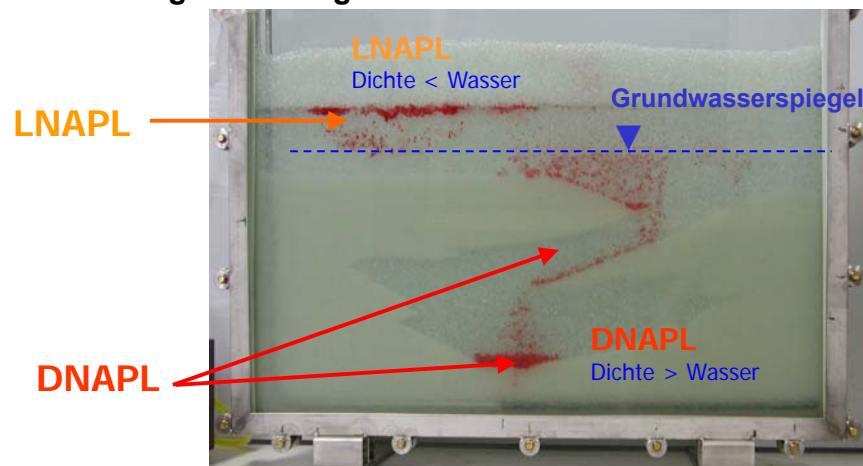


Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

© VEGAS  
**BEW** Seminar, Duisburg 19. November 2014 Kos 2

## Entstehung von Schadensherden: LNAPL – DNAPL

### Sanierungstechnologien erforderlich



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

© VEGAS

## VEGAS Große Rinne



Länge: 16 m  
Breite: 1 m  
Höhe: 3 m  
Seitenwände aus Glas

© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

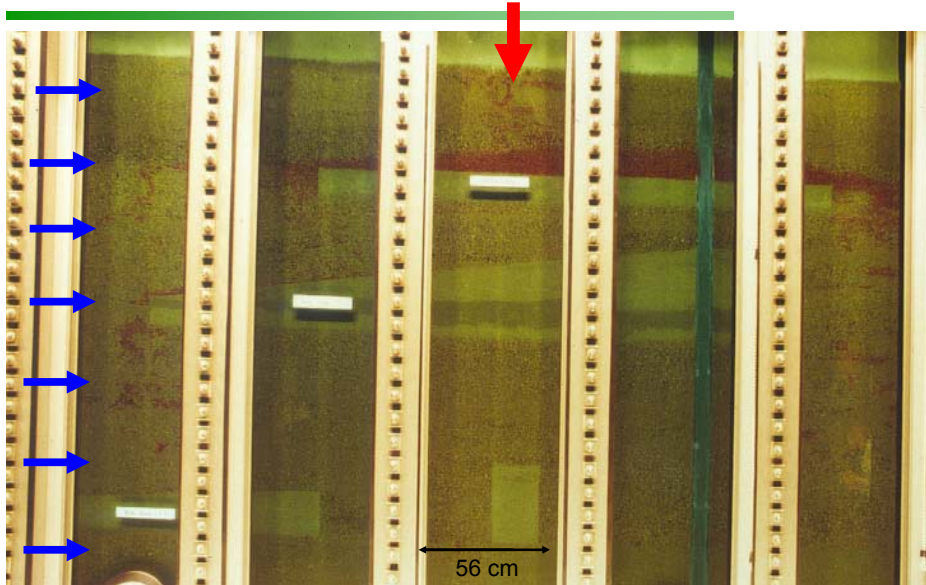
© VEGAS  
**BEW** Seminar, Duisburg 19. November 2014 Kos 3



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

**BEW** Seminar, Duisburg 19. November 2014 Kos 3

## CKW – Versickerung in einem inhomogenen Aquifer



VEGAS

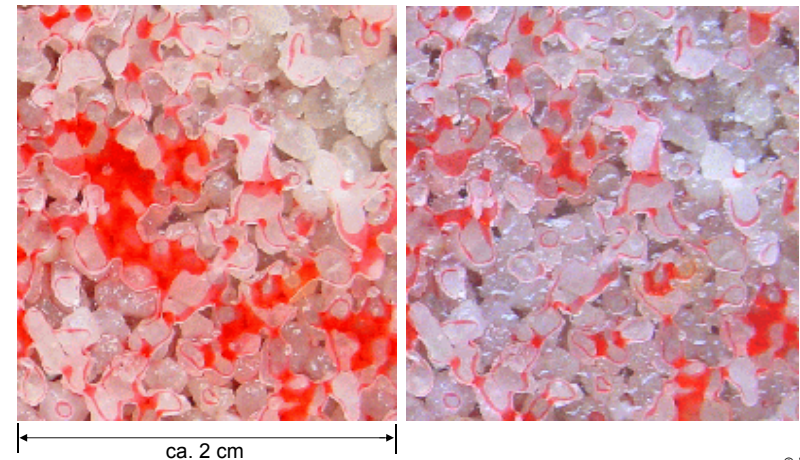
Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 5

## Fluideigenschaften - Temperaturabhängigkeit

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

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



VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

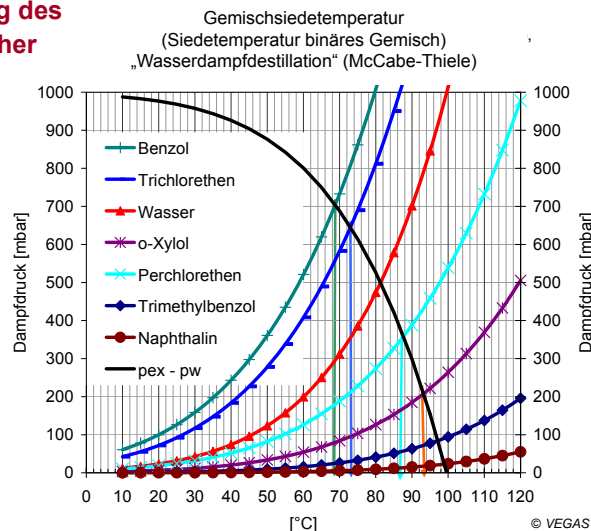
BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 6

## Grundlagen Thermische Sanierungsverfahren

**exponentielle Erhöhung des Dampfdrucks organischer Kontaminanten mit der Temperatur**

**Siedetemperaturniedrigung (Azetrop) durch Wasserdampfdestillation:**

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

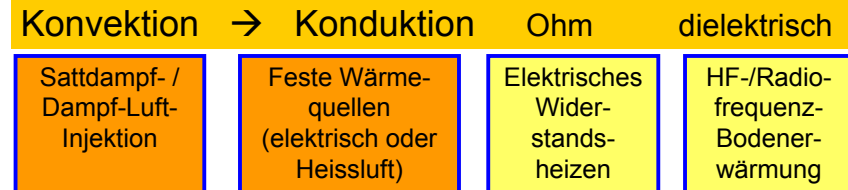


VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 7

## Thermische In-situ-Sanierungsverfahren, TlSS



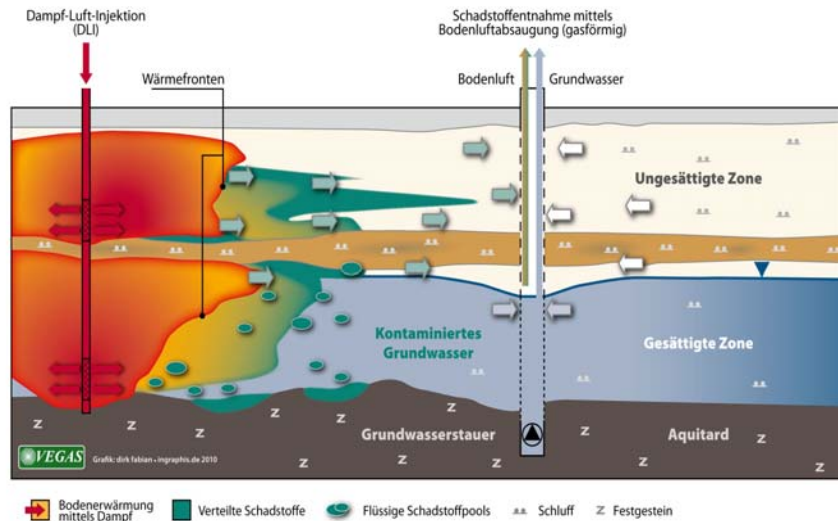
- Organische Schadstoffe (LNAPL & DNAPL)
- Erhöhung des Dampfdrucks der Schadstoffe durch Erwärmung des Untergrunds / Wasserdampfdestillation  
→ Erhöhung der Austragsraten (**gasförmig**) um mehrere Faktoren
- **Schadstoffaustrag über Bodenluftabsaugung**
- Schneller und zuverlässiger (kontrollierbarer)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

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 8

## TIS: Dampf-Luft-Injektion



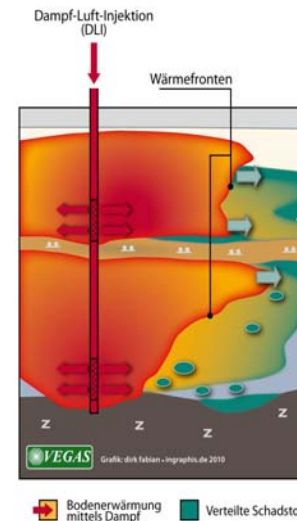
© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 9

## Einsatzbereiche Dampf-Luft-Injektion



### 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  $k_f$ :  $5 \times 10^{-5}$  bis  $1 \times 10^{-3}$  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

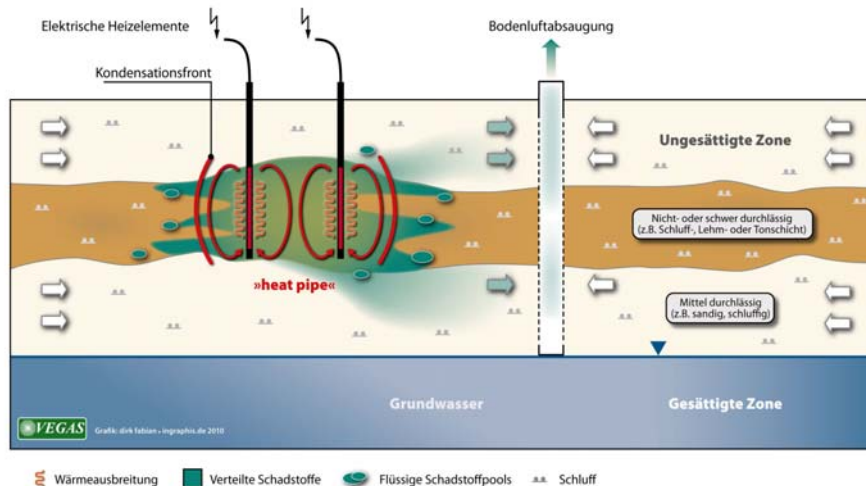
- Simultane Sanierung Grundwasserleiter und ungesättigte Bodenzone
- Mögliche Gefügeveränderungen bei stark organhaltige Böden (Torflagen) → Setzungen ?



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 10

## THERIS: Feste Wärmequellen Verfahrensprinzip



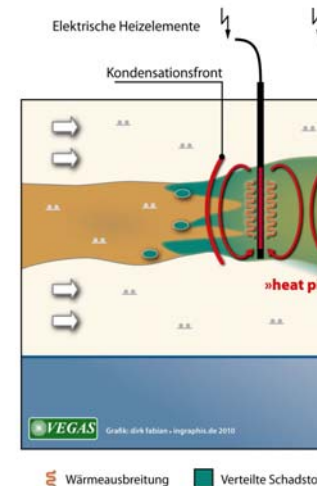
© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 11

## Einsatzbereiche THERIS: Feste Wärmequellen



### 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

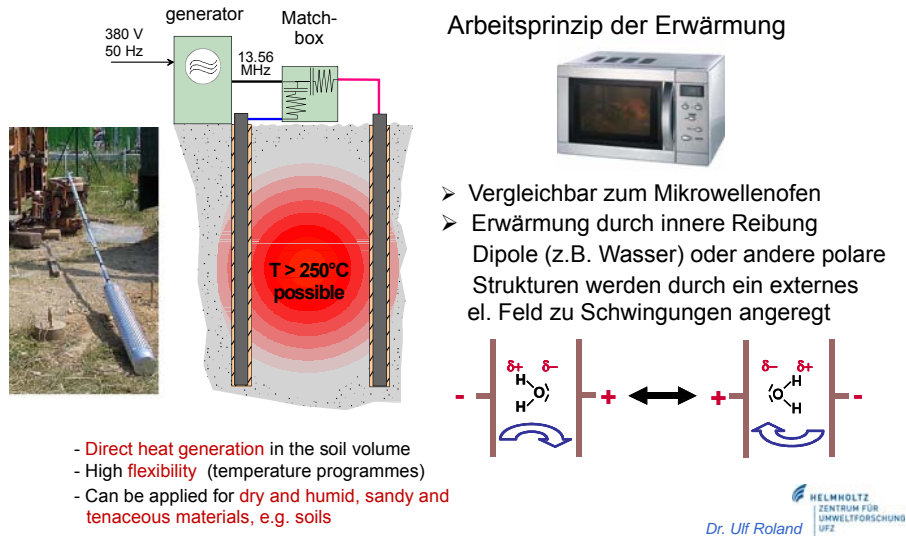
© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 12

## HF- / Radiowellen-Verfahren



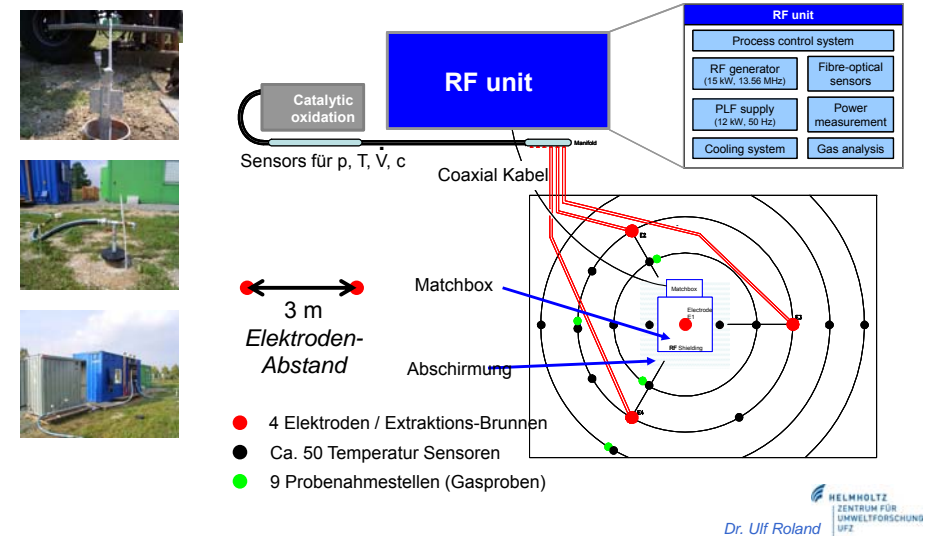
- Direct heat generation in the soil volume
- High flexibility (temperature programmes)
- Can be applied for dry and humid, sandy and tenaceous materials, e.g. soils

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 13

## Radiowellen-Erwärmung am Pilotstandort Zeitz



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 14

## 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 Mergelstein
  - 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  
Pilot. erfolgreich, Sanierungskonzept erstellt, wurde aber nicht umgesetzt
  - 2009 / 2015 Bismurm ehemalige Verbrennungsanlage (GZ, vadose, UZ)  
CKW, geklüfteter Sandsteinaquifer, (Tonsteinbasis -21 m)  
➔ Sanierungsbetrieb seit 06.08.2012 mit DLI (geplant DLI bis Ende 2015)
- © VEGAS

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 15

## TisS aktuelle Anwendungen

### Laufender Technologie-Transfer

- 2010 Oberursel, Altstadt unter einem Gebäude,  
CKW, schlecht durchlässiger Untergrund, Tonsschichten (UZ, vadose)  
➔ Feasibility, Pilotierung (Fj. 2013 bis Sept. 2013, Sanierung derzeit unterbrochen, Ziel Sanierungsende Herbst 2017)
  - 2011 / 2015 Sindelfingen Feasibility / Pilotierung unter einem Parkhaus  
➔ Abgeschlossen 30.09.2013, Gesamtsanierung in Bearbeitung (2015)
  - 2012 / 2014 EU-Projekt CityChlor: „Stuttgarter Str. 10“, LHS, Pilotversuch  
Feste Wärmequellen, CKW, (UZ, GZ), Wissenschaftliche Begleitung  
➔ Erfolgreich abgeschlossen 31.07.2013, Sanierung 12.2013-05.2014
  - 2012 / 2015 Schwarzwald Nagoldtal: Feasibility / Sanierungsvorschlag, Alternative zur Großbohrlochverfahren, CKW, GZ, (DLI Tool)  
➔ derzeit Aufbau Sanierung, Beginn DLI Fj. 2015
  - 2013 Frankfurt Höchst, Industriegelände: Pilotierung, CKW  
➔ Diplomarbeit Auslegung mit DLI Tool, August 2013 - Feb. 2014
  - 2013 / Planungen/Machbarkeitsstudien: Rhein-Main Gebiet: CKW unter Fabrikhalle, BaWü: CKW, ehemalige Kaserne, Aktuell NRW: CKW unter Wohngebäude
- © VEGAS

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 16

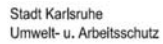
# Thermische In-situ-Sanierung eines CKW-Schadens unter einem denkmalgeschützten Gebäude - von der Planung bis zur erfolgreichen Sanierung



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



Stephan Denzel, dplan, Karlsruhe



Claudia Purkhold, Stadt Karlsruhe, Umwelt- und Arbeitsschutz



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



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

## Pilot-Standort Karlsruhe Durlach



Heutige Nutzung Galerie und Rahmenladen



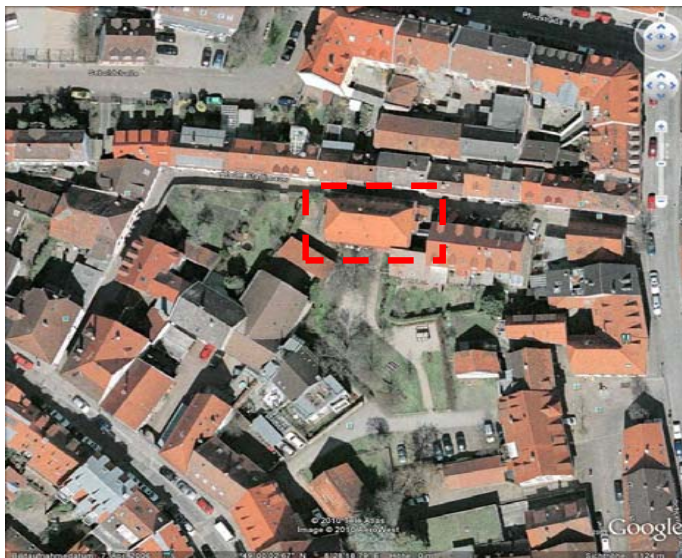
© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren: Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg 19. November 2014 Kos 18

## Pilot-Standort Karlsruhe Durlach



© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren: Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg 19. November 2014 Kos 19

## 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

**Grundwasserschaden**

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

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

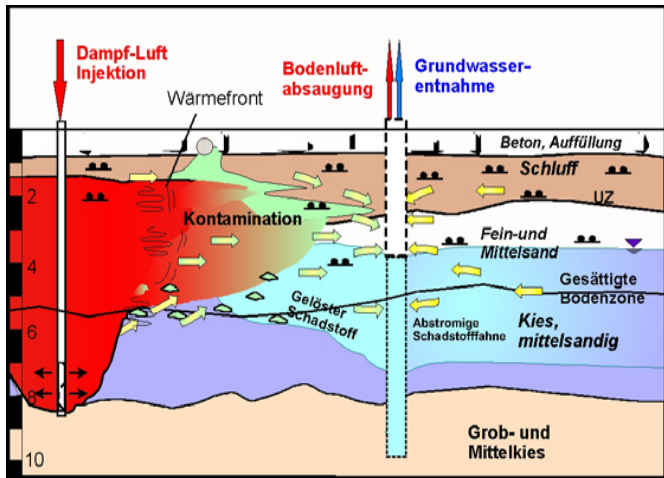
© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren: Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg 19. November 2014 Kos 20

# 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

Rheintanlage: Quartärer, fluvialer Aquifer

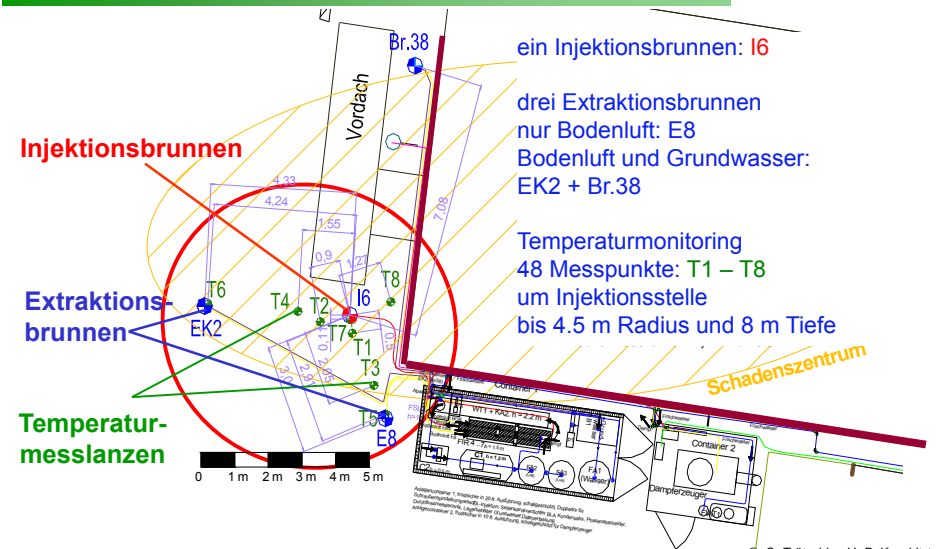
© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 21

# Pilot – Testfeld: Ausstattung



- ein Injektionsbrunnen: I6
- drei Extraktionsbrunnen  
nur Bodenluft: E8  
Bodenluft und Grundwasser:  
EK2 + Br.38
- Temperaturmonitoring  
48 Messpunkte: T1 – T8  
um Injektionsstelle  
bis 4.5 m Radius und 8 m Tiefe

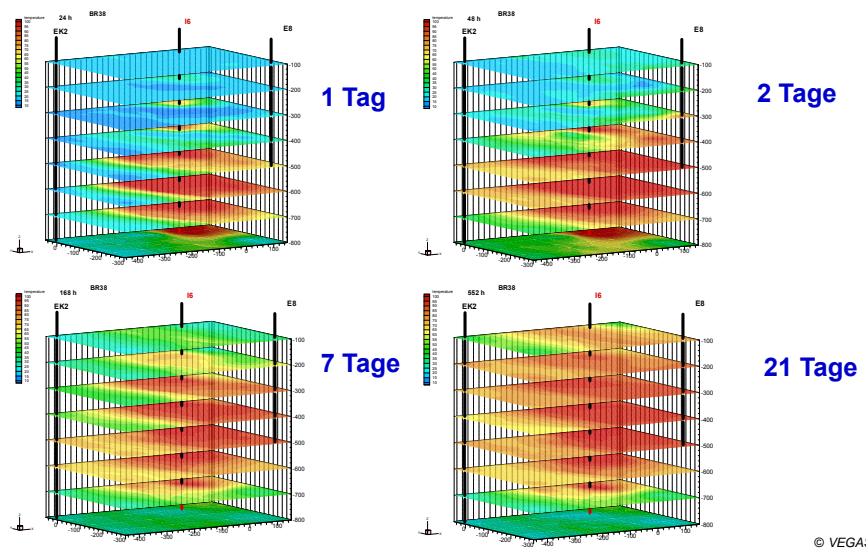
© O. Trötschler, H.-P. Koschitzki



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 22

# Dampfausbreitung - Temperaturmessungen



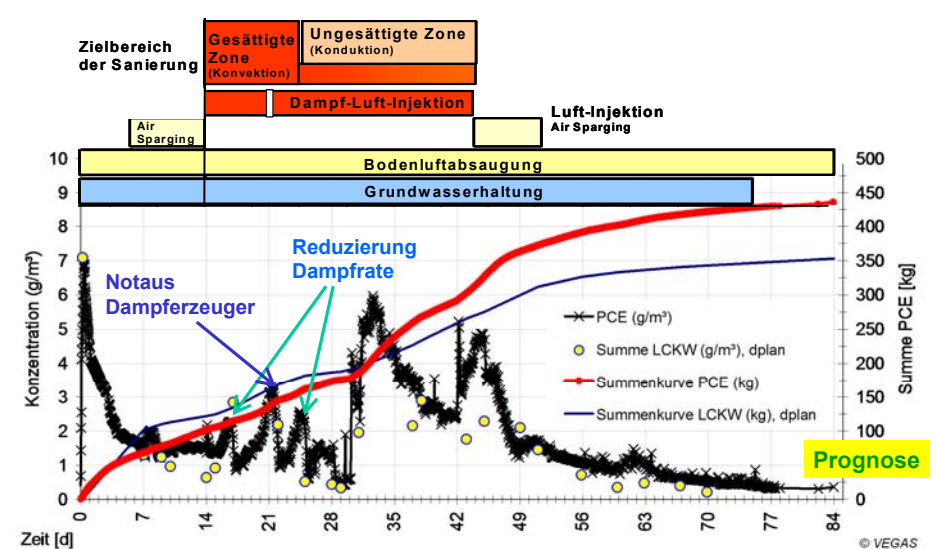
© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 23

# Massenbilanz Schadstoffaustrag



© VEGAS

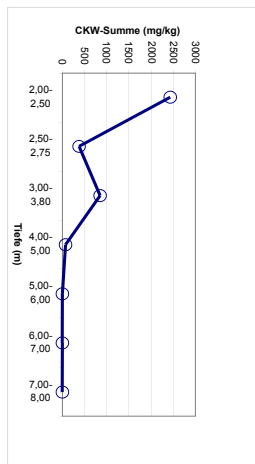


Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

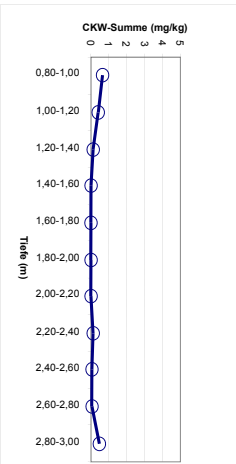
BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 24

## Bodenproben vor & nach Pilot-Sanierung

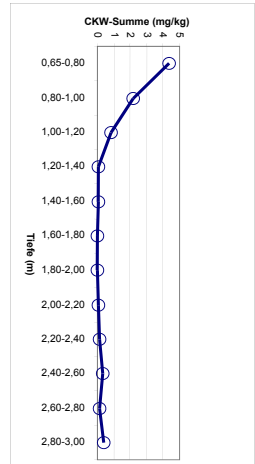
Sondierung Injektionsbr. 16 vor Pilot-Sanierung



Sondierung 1,5 m Abstand zu I6 nach Pilotierung



Sondierung 3 m Abstand zu I6 nach Pilotierung



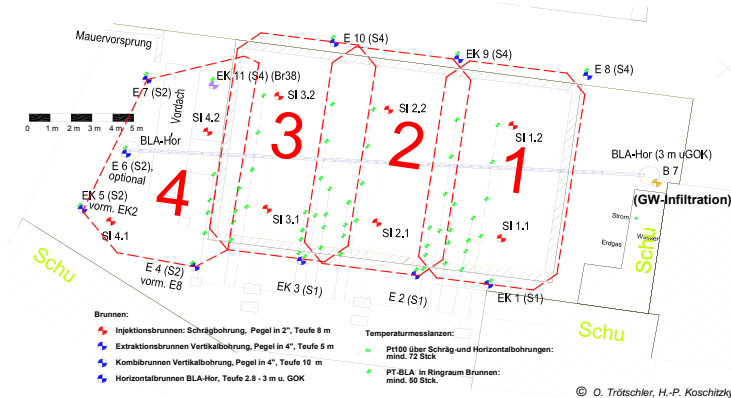
© VEGAS

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 25

## Vorschlag für Gesamtsanierung



- Sanierungsdauer: 10 Monate = 4 x 6 Wochen DLI
- Budget: 600.000 EUR
- Thermische Sanierung von ca. 1.600 m<sup>3</sup> Boden
- 300 kW Dampf-Injektionsleistung

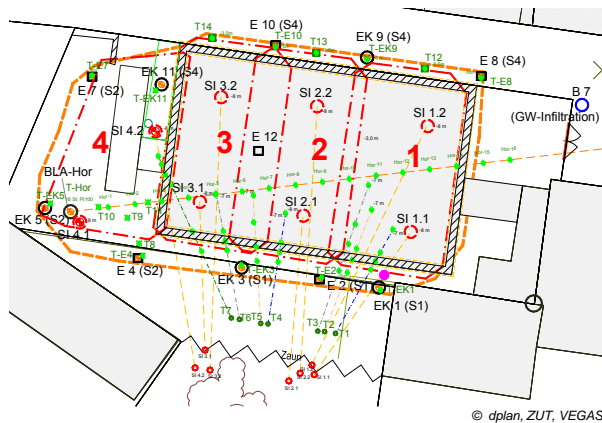
© VEGAS

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 26

## Sanierungsausführung



© dplan, ZUT, VEGAS

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

Stadt Karlsruhe  
Umwelt- u. Arbeitsschutz

dplan  
dplan GmbH

ZÜBLIN

VEGAS

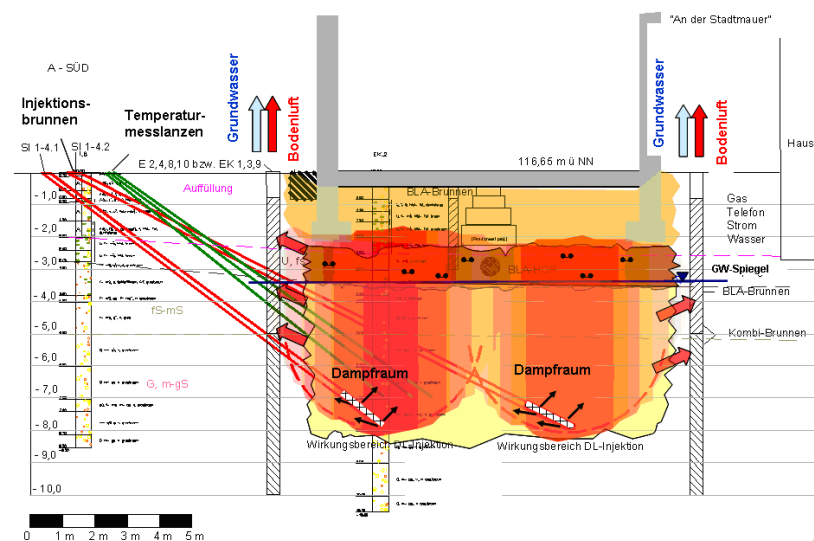
© VEGAS

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 27

## Realisierung DLI unter dem Gebäude



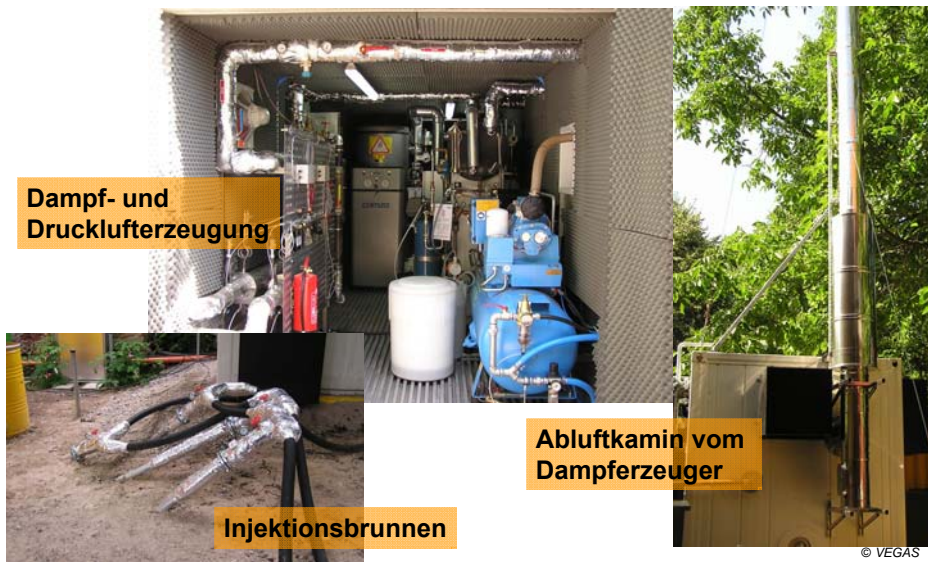
0 1m 2m 3m 4m 5m

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 28

dplan



Dampf- und Druckluftherzeugung

Abluftkamin vom Dampferzeuger

Injektionsbrunnen

© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg 19. November 2014 Kos 29



Grundwasserförderung, Bodenluftabsaugung und On-line-Datenerfassung

© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg 19. November 2014 Kos 30



Grundwasserförderung, Bodenluftabsaugung mit A-Kohleaufbereitung

Abluftkamin BLA

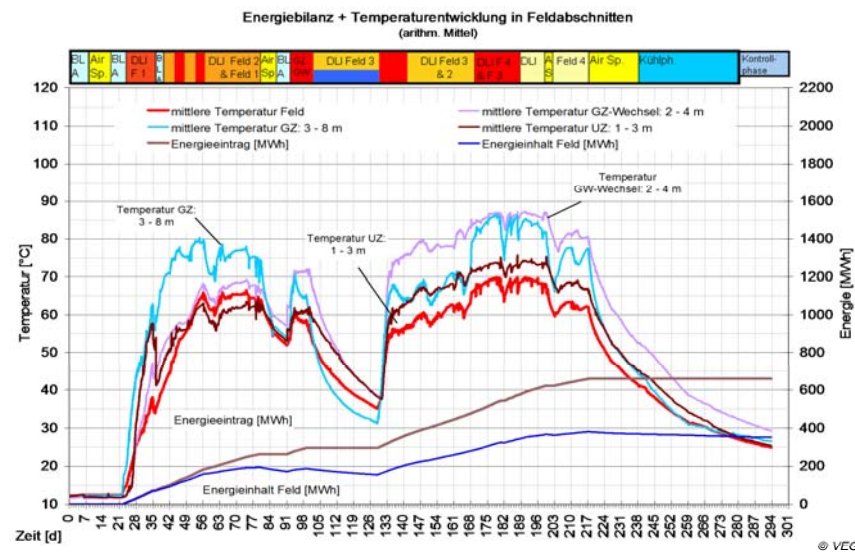
Extraktionsbrunnen und Temperaturmessung

© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg 19. November 2014 Kos 31



© VEGAS

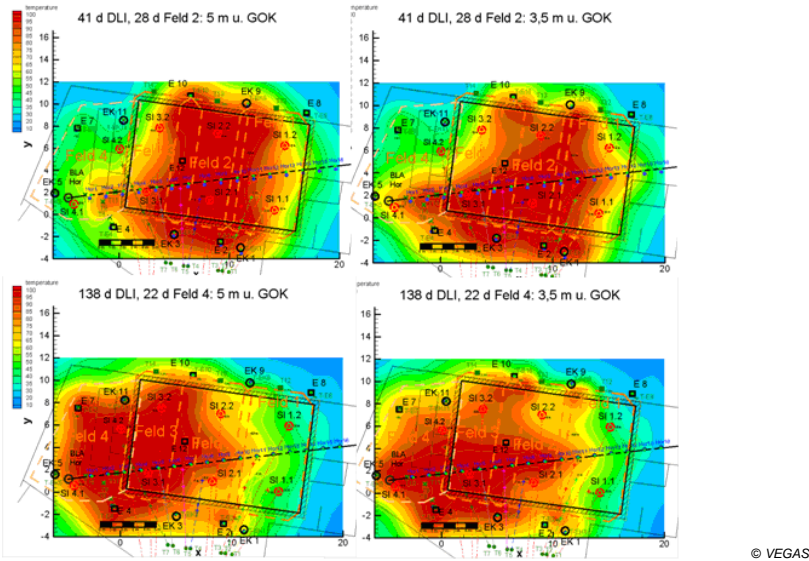


Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg 19. November 2014 Kos 32



## Temperaturausbreitung

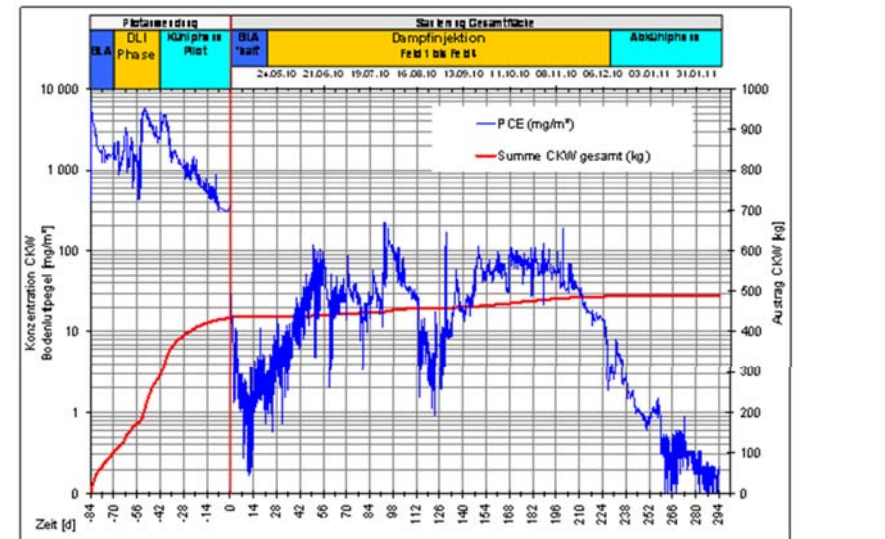


VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 33

## Schadstoffaustrag Bodenluft

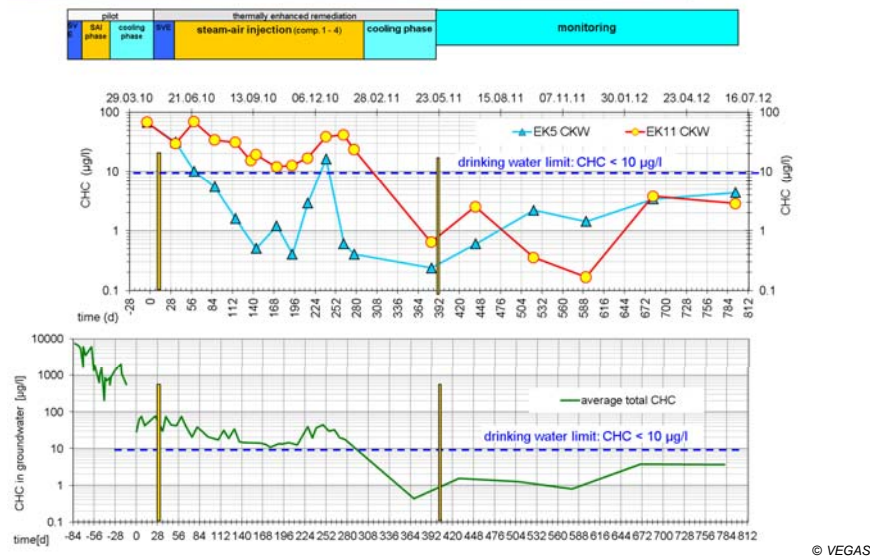


VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 34

## Entwicklung der CKW - Konzentrationen im Grundwasser



VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 35

## 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 (2012): 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

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 36



Standort nach der Sanierung (15.11.2011)



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 37

## Altstandort Biswurm - ehemaliger Verbrennungsplatz

### Thermische In-situ-Sanierung Dampf-Luft-Injektion im Kluftgestein

- Stadtbauamt Villingen-Schwenningen, Abteilung Wasser und Boden
- GEOsens, Ingenieurpartnerschaft, Ebringen
- VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung, Universität Stuttgart
- Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, UFZ Leipzig
- BAUER Umwelt GmbH, Schrobenhausen, Deutschland



© VEGAS



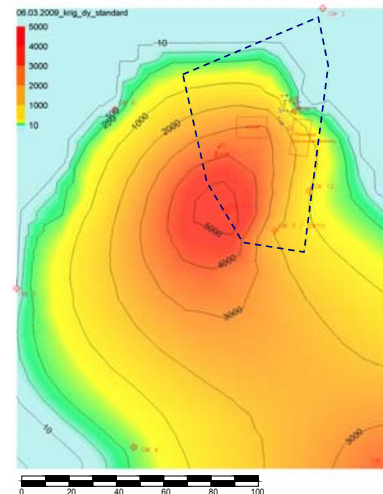
Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 38

## Schadenssituation Biswurm

### Schadensbild 2007 / 2009

- ➔ ca. 2.800 m<sup>2</sup> Kernbereich (Schadensquelle) bis 40 m Mächtigkeit
- ➔ CKW bis 40 mg/L im Grundwasser, bis 3.000 mg/m<sup>3</sup> 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

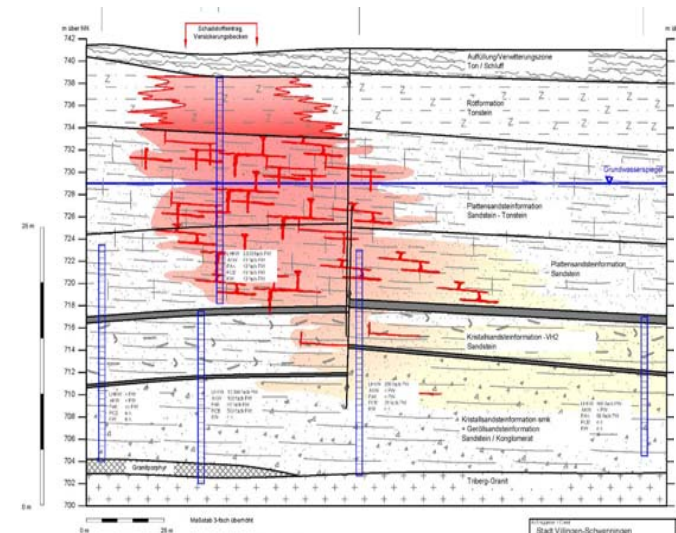
© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 39

## Geologie und Schadensbild in einem Kluftaquifer



**Komplexer, geklüfteter  
Festgesteinsaquifer**

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

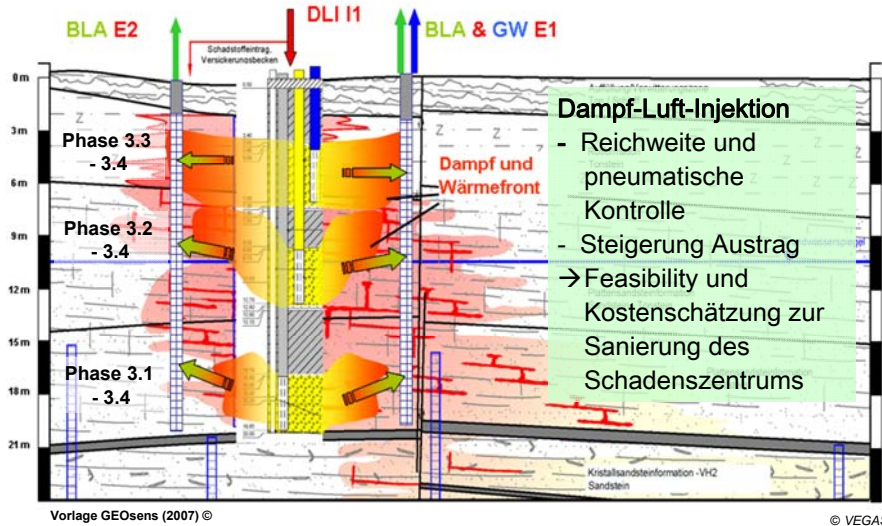
© VEGAS



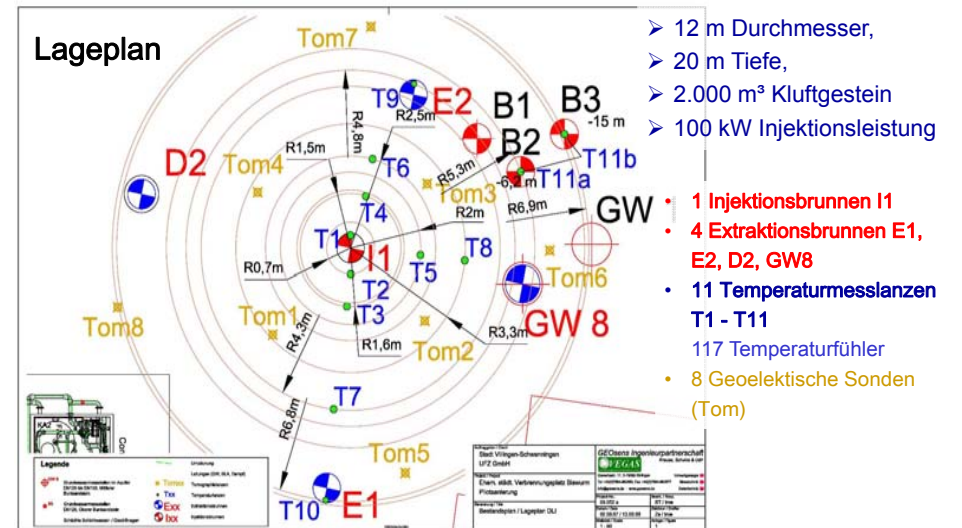
Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 40

## Geologie und thermische Erschließung



## Ausstattung Pilotfeld Biswurm



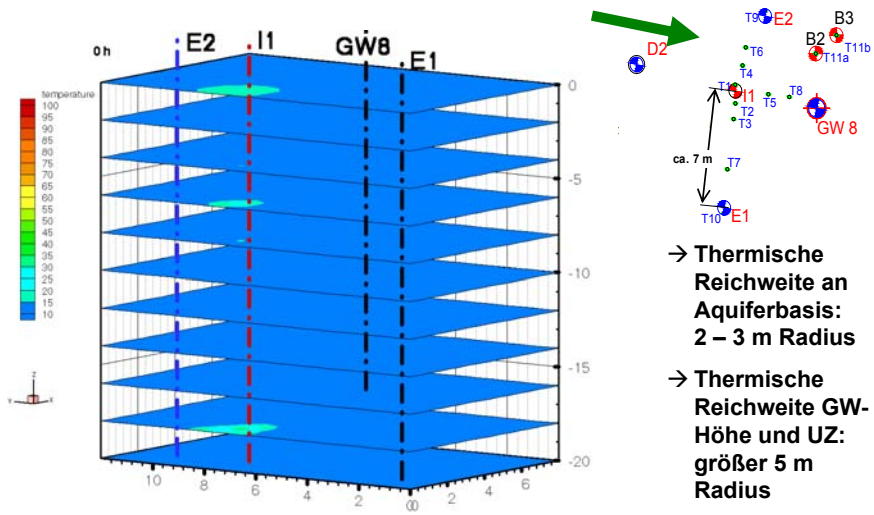
## Eindrücke vom Testfeld (I)



## Eindrücke vom Testfeld (II)



## Dampf- und Wärmeausbreitung



- Thermische Reichweite an Aquiferbasis: 2 – 3 m Radius
- Thermische Reichweite GW-Höhe und UZ: größer 5 m Radius

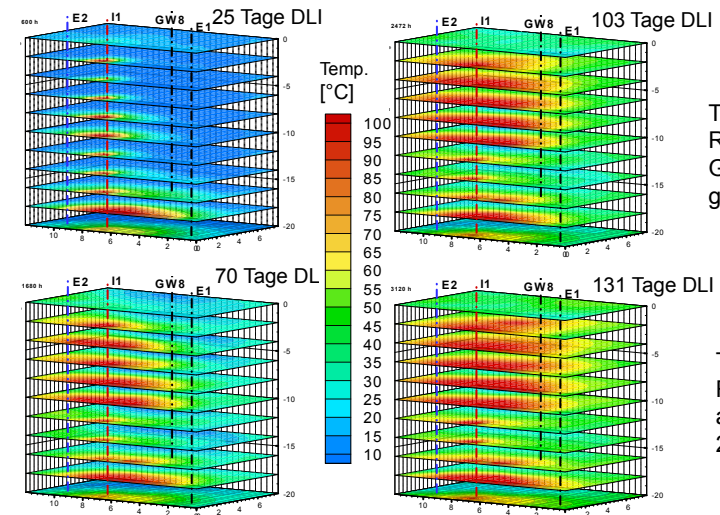
© VEGAS

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg 19. November 2014 Kos 45

## Überblick Wärmeausbreitung



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

Thermische Reichweite an Aquiferbasis: 2 – 3 m Radius

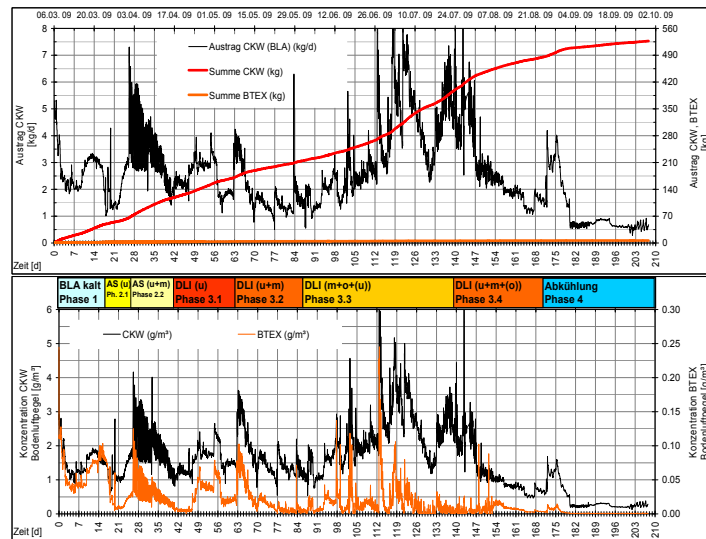
© VEGAS

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg 19. November 2014 Kos 46

## 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

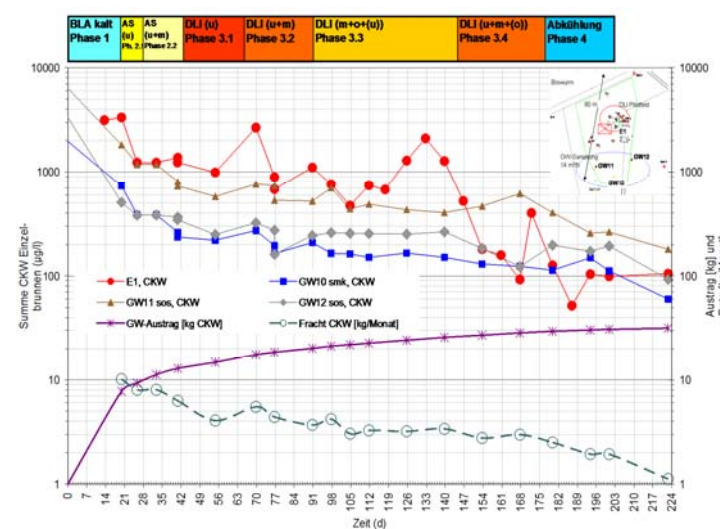
© VEGAS

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg 19. November 2014 Kos 47

## 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 Gesamtsaustrags

© VEGAS

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg 19. November 2014 Kos 48

## 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



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele



Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos  
49

## Empfehlung Biswurm

- **Sanierungsplanung** für eine thermische Sanierung des oberen Grundwasserbereichs und der ungesättigten Zone mittels DLI für eine Fläche von ca. 2.800 m<sup>2</sup> 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



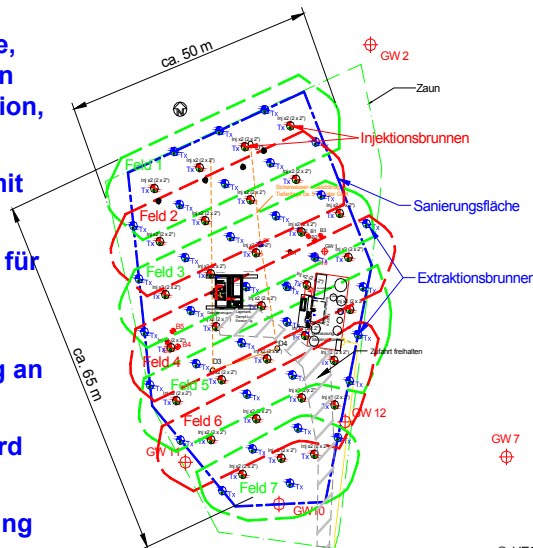
Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele



Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos  
50

## Planung Thermische In-situ-Sanierung Biswurm

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



© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele



Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos  
51

## 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. 1.900 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: 1.000 kg/h Sattdampf = 750 kW Wärmeleistung
- Installierte elektrische Leistung: 80 kW

© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele



Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos  
52

## Aufbau und Start Sanierung Biswurm



Okt. 2011 Bohrarbeiten nahezu abgeschlossen

April 2012 Aufbau nahezu abgeschlossen



© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 53

## Aktueller Stand Biswurm

Start DLI 8. August 2012



© VEGAS



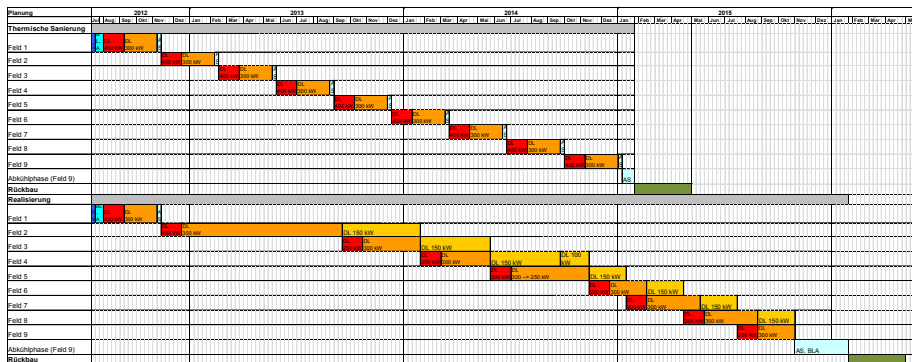
Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 54

## Zeitlicher Ablauf der Sanierung

### Anlagenbetrieb entsprechend Felderwärmung

- Start DLI im Juli 2012 → Ende DLI ursprünglich projektiert: Januar 2015
- entsprechend effektivem Wärmeeintrag und Schadstoffaustrag  
→ Ende DLI: aktuell Januar 2016



© VEGAS



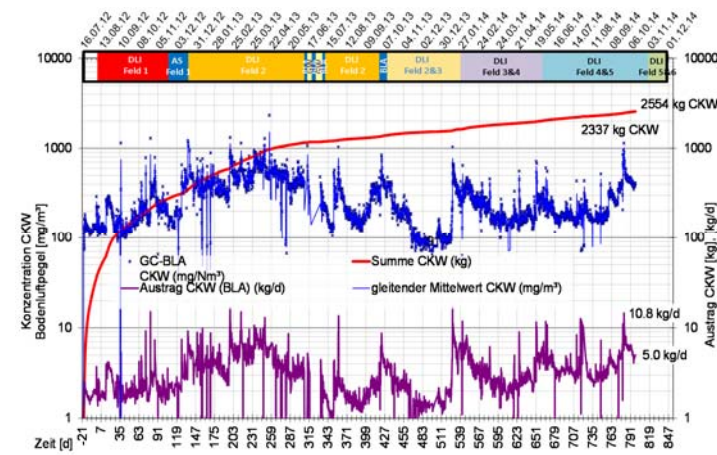
Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 55

## Schadstoffaustrag

### Aufheizphase = Anstieg Konzentrationen

### Austragsphase = Abklingen Schadstoffaustrag



Bis 11 kg LHKW täglich

nach 800  
Betriebstagen  
→ 2.550 kg  
LHKW Austrag

© VEGAS

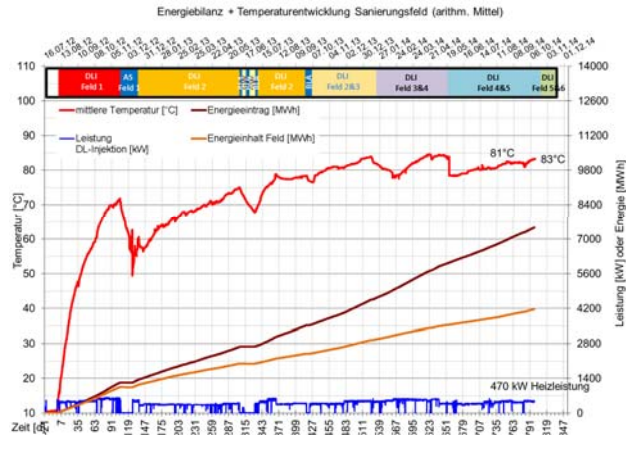


Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 56

## Wärmeeintrag

- Leistungseintrag im Klufftgestein: 350 – 450 kW
- Effektiver Wärmeeintrag: 150 – 250 kW
- Erwärmung Festgestein: 40 – 60 kW



- Zieltemperatur Festgestein: 83°C
- Im Plattensandstein größer als 86°C = Gemischsiedetemperatur

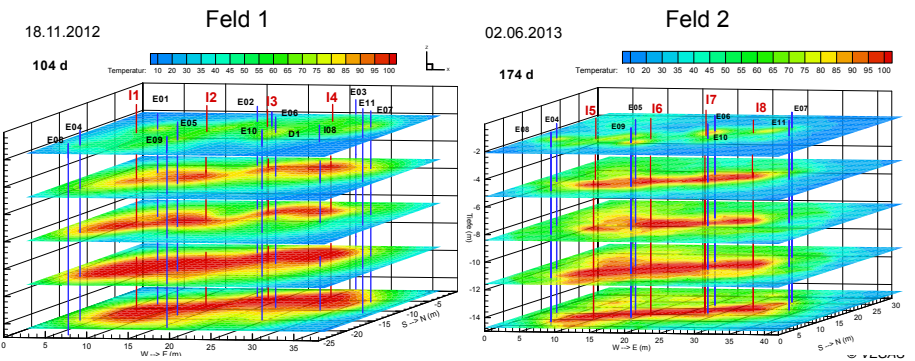
VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 57

## Wärmeausbreitung (I)

- Thermische Reichweite zwischen 5 – 15 m in Klufftgestein
- Wärmefeld umfasst ca. 13.000 m<sup>3</sup> Festgestein (ca. 3 Felder)
- projiziert waren 4.000 m<sup>3</sup> (1 Feld)



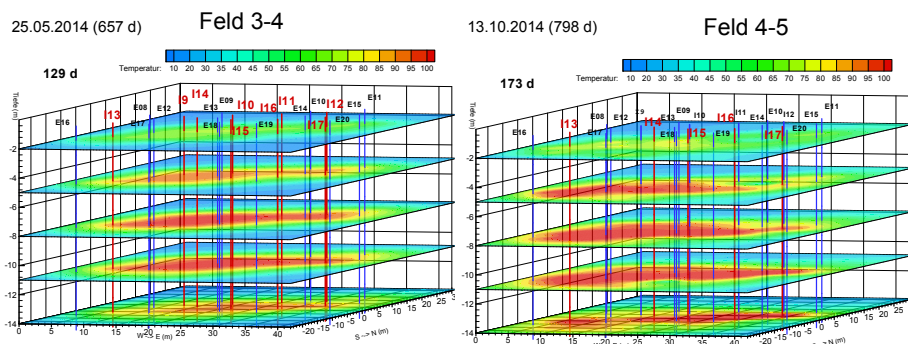
VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 58

## Wärmeausbreitung (II)

- Injektion in zwei Feldabschnitte simultan
- Bodenluftabsaugung umfasst 6 Feldabschnitte



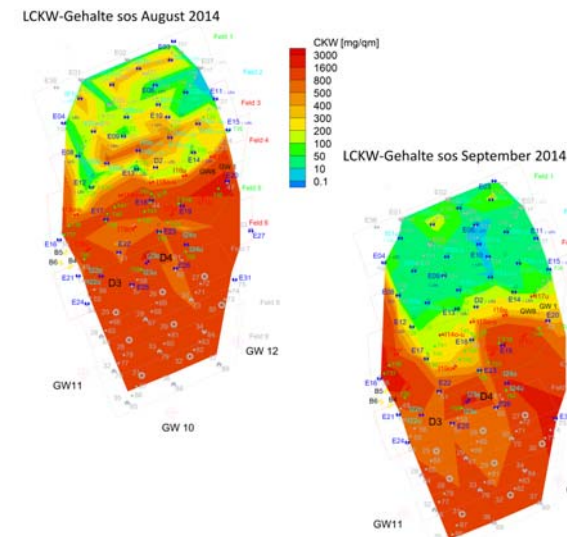
© VEGAS

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 59

## Aktuelle Verteilung LHKW (Sept. 2014)



Wärmespeicherung erzeugt lange Austrags- und Desorptionsdauer aus Sandstein (sos)  
➔ Nutzbar für LHKW-Austrag

Absaugung aus derzeit 37 BDL-Brunnen an Stelle 10 Brunnen

- ➔ Nachbehandlung von z.B. Feld 1
- ➔ Temperaturen > 35°C nach ca. 12 Monaten ohne Erwärmung

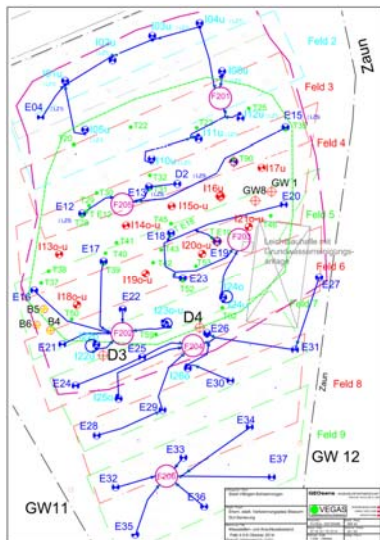
© VEGAS

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 60

## Anwendungsgrenzen – „Lessons learned“



**Festgestein zu erwärmen und Schadstoffe verdampfen dauert 40% länger als projiziert**

- Injektion in 2 Feldabschnitte
- Absaugung aus mindestens fünf Abschnitten
- ➔ Energieeinsatz ist optimiert

**Dampfausbreitung in Klüften schwierig kontrollierbar**

- Absaugung aus derzeit 37 BDL-Brunnen an Stelle 10 Brunnen
- ➔ Massenstrom Absaugung mind. 1,5 x Injektionsleistung

**Wärmespeicherung erzeugt und garantiert lange Austragsdauer**

© VEGAS

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 61

## Aktueller Stand Biswurm

**Eindrücke vom Standort  
Mitte Januar 2014**



© VEGAS

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 62

## Aktueller Stand Biswurm

**Eindrücke vom Standort  
Mitte Oktober 2014**



© VEGAS

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 63

## Zwischenresümée nach 2 Jahren DLI Biswurm

- **Geklüftetes Festgestein** kann nicht wie **Lockergestein** in räumlich klar begrenzten Sanierungsabschnitten behandelt werden
- **Wärme- und Schadstoffaustragsverhalten** während **Sanierung** nur eingeschränkt durch **Pilotanwendung** wiedergegeben
- **Sanierung** muss **flexibel** an Wärmeausbreitung und Schadstoffaustragsverhalten **anpassbar** bleiben (Zeit- und Finanzreserven vorhalten)
- **Schadstoffaustrag von 3 kg LHKW täglich** im Mittel 50% geringer als durch Pilotierung erwartet, vergleichbar mit 50% geringerer Erwärmung
- **Desorption** aus Sandsteinmatrix verläuft **langsam**
- **Intermittierende DLI** ist aufgrund Wärmespeicherung und langsamer Desorptionsdauer **möglich**

© VEGAS

VEGAS

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 64



# Regula King, Bad Liebenzell

Sanierung von Untergrundverunreinigungen



Wasser  
Umwelt  
Infrastruktur  
Energie  
Bauwerke  
Geotechnik



## Untergrundverunreinigungen – woher?

- Fotoapparatehersteller Regula King (1942 – 1963)
- Einsatz LCKW-haltiger Mittel zur Reinigung, Entfettung
- Gefahr von LCKW damals nicht bekannt
- Sorgloser Umgang
- Keine Sicherheitsvorkehrungen
- Handhabungsverluste



Quelle: google maps

© VEGAS

➔ **Untergrundverunreinigungen**



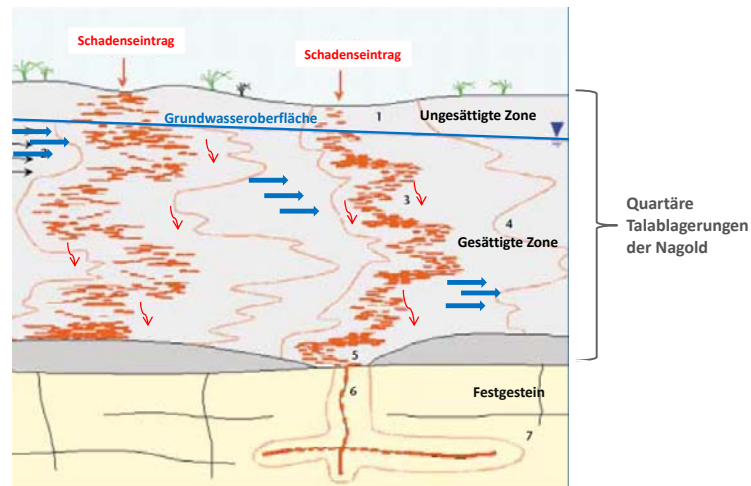
Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele



Seminar, Duisburg  
19. November 2014

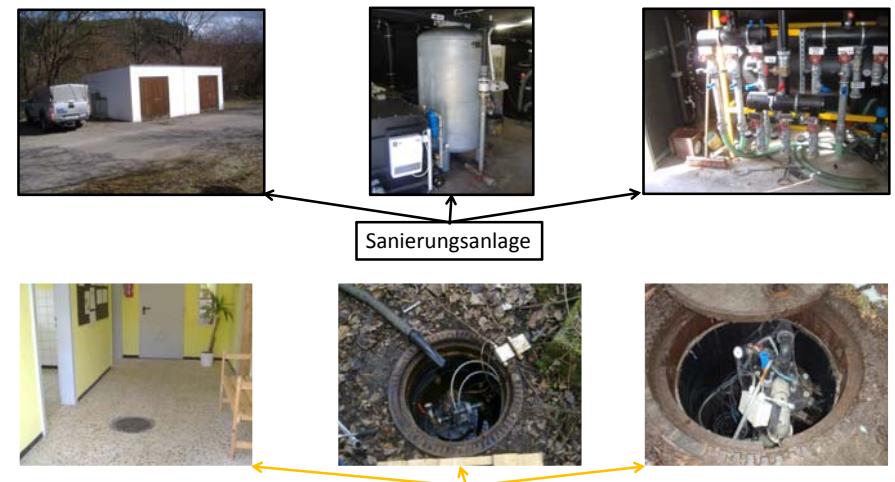
Kos  
66

## Untergrundverunreinigungen – wie, was?



© VEGAS

## Laufende Sanierung



Sanierungsanlage

Sanierungsbrunnen

© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele



Seminar, Duisburg  
19. November 2014

Kos  
67



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

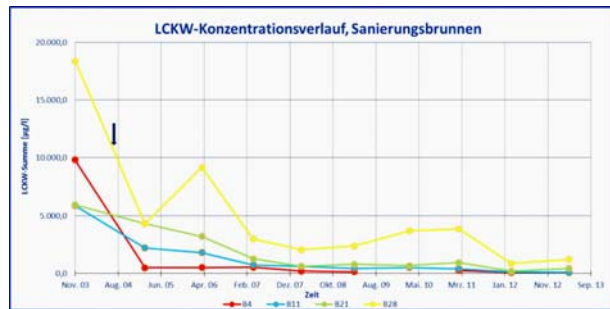


Seminar, Duisburg  
19. November 2014

Kos  
68

## Änderung Sanierungsverfahren - warum?

- Geschätztes Schadstoffpotential 1,5 – 3 t LCKW ↔ 660 kg LCKW entfernt
- Stagnierende Schadstoffkonzentrationen
- Hohes verbleibendes Schadstoffpotential
- Keine zeitliche und finanzielle Perspektive
- Regierungspräsidium („Hauptfinanzgeber“) fordert Sanierungsoptimierung mit zeitlich absehbaren Sanierungserfolg



© VEGAS

VEGAS

CDM Smith

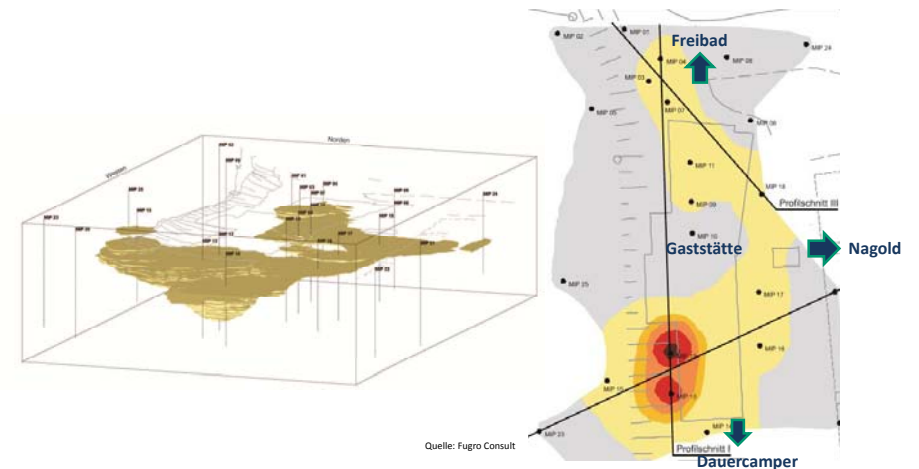
Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW

Seminar, Duisburg  
19. November 2014

Kos  
69

## Untergrundverunreinigungen – wo?



➔ Schadensschwerpunkt unterhalb Gaststätten-/Sanitärgebäude

© VEGAS

VEGAS

CDM Smith

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW

Seminar, Duisburg  
19. November 2014

Kos  
70

## Sanierungsdurchführung – zeitlicher Ablauf

1. Ausführungsplanung
2. Ausschreibung
3. Baufeldfreimachung
4. Bohrarbeiten
5. Aufbau und Betrieb der Sanierungsanlage
6. Abbau Sanierungsanlage, Brunnenrückbau
7. Wiederherstellung ursprünglicher Zustand

➔ Ziel: Abschluss aller Arbeiten bis April 2016

© VEGAS

VEGAS

CDM Smith

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

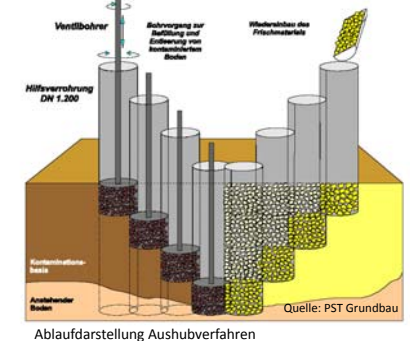
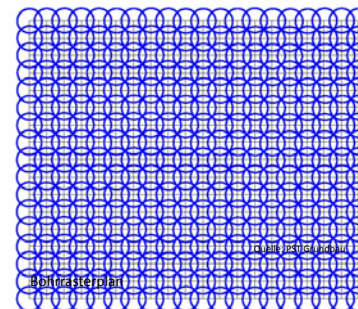
BEW

Seminar, Duisburg  
19. November 2014

Kos  
71

## Großlochbohrungen Verfahrensbeschreibung

- Ausbohren mittels 750 -800 Bohrungen
- 25% - 30% Überschritt
- Bohren mit Wasserauflast zur Verhinderung hydraul. Grundbruch
- Abreinigung Auflastwasser + GW aus Abstomsicherung
- Maßnahmen zur Emissionsreduzierung
- Wiederverfüllung: Fremdmaterial über Schütttrichter
- Nachverdichtung erforderlich



© VEGAS

VEGAS

CDM Smith

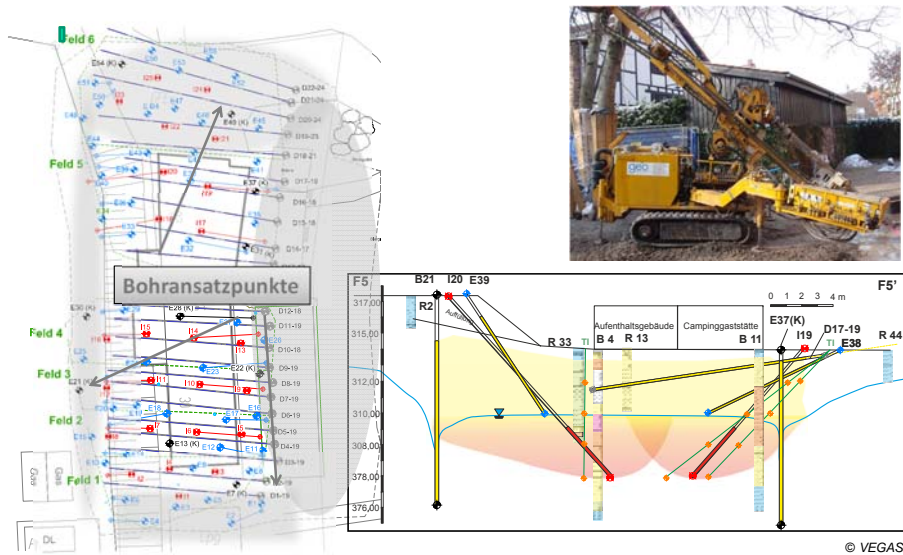
Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW

Seminar, Duisburg  
19. November 2014

Kos  
72

## Bohrarbeiten – Beeinträchtigungen?



VEGAS

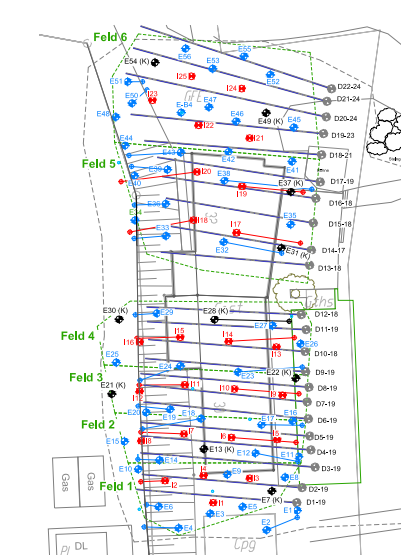
CDM Smith

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

B-E-W

Seminar, Duisburg  
19. November 2014  
Kos 73

## Dampf-Luft-Injektion - Grunddesign 700 kW



### Sanierungsfeld unterirdisch

- 25 St. Injektionsbrunnen Dampf-Luft-Injektion
- 46 St. Extraktionsbrunnen Bodenluft
- 22 St. Bodenluftdrainage (400 m)
- 10 St. Kombinationsbrunnen + 6 vorh. Br.
- 90 Temperaturmesslanzen

### Leistungsgrößen

- 500 – 750 kW Dampfleistung
- 1000 m³/h Bodenluftabsaugung
- 20 – 30 m³/h Grundwasserförderung

### Zeitdauer

- Aufheizphase je Abschnitt : 14 d
- Austragsphase je Abschnitt: mind. 30 d
- Austragsphase gesamt, 210 Tage
- Abkühlphase mind. 30 Tage
- Sanierungsdauer **14 – 17 Mo.** (zzgl. Anlagenbau)

VEGAS

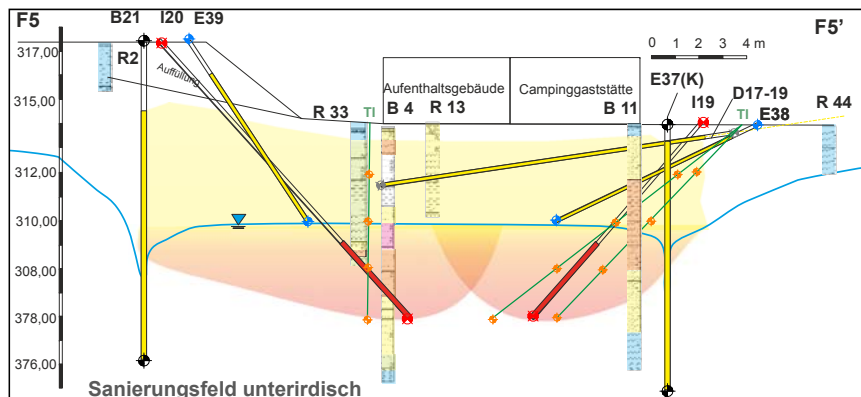
CDM Smith

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

B-E-W

Seminar, Duisburg  
19. November 2014  
Kos 74

## DLI - Erschließung Sanierungsfeld



### Sanierungsfeld unterirdisch

- 25 St. Injektionsbrunnen Dampf-Luft-Injektion
- 46 St. Extraktionsbrunnen Bodenluft
- 22 St. Bodenluftdrainage (400 m)
- 10 St. Kombinationsbrunnen + 6 vorh. Br.
- 90 Temperaturmesslanzen

VEGAS

CDM Smith

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

B-E-W

Seminar, Duisburg  
19. November 2014  
Kos 75

## Geplanter Zeitablauf

Maßnahme	2014												2015												2016			
	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr			
Planung, Ausschreibung, Vergabe																												
Anlagenbau																												
Bohr- und Grundbaubarbeiten																												
Anlagenaufbau																												
Installation Feldmesstechnik																												
Inbetriebnahme Anlage																												
Süd: Sanierung Feld 1																												
Süd: Sanierung Feld 2																												
Süd: Sanierung Feld 3																												
Süd: Sanierung Feld 4																												
Umbau südliches → nördliches Feld																												
Nord: Sanierung Feld 5																												
Nord: Sanierung Feld 6																												
Abkühlphase																												
Anlagenrückbau, Messtechnik																												
Rückbau Brunnen u. Feld																												
Vorbereitende Arbeiten																												
Vorbereitende Arbeiten (auf Standort)																												
Dampf-Luft-Injektion																												
Anlagenbetrieb																												
Gesamt (zzgl. Summe Pufferzeiten)																												
Pufferzeiten																												
Betriebszeiten																												

© VEGAS

VEGAS

CDM Smith

Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

B-E-W

Seminar, Duisburg  
19. November 2014  
Kos 76

## Kostenvergleich

Maßnahme	Großlochbohrungen* [Netto-Kosten in €]	DLI-Verfahren [Netto-Kosten in €]
Verfahrenskosten	2.679.600	2.097.900
Sanierungsplan	40.000	40.000
Vorbereitung, Mitwirkung Vergabe, Leistungsverzeichnis	35.000	35.000
Fachtechnische Kontrolle	15.000	15.000
Gesamtsumme, ca.	<b>2.769.600</b>	<b>2.187.900</b>

\* zzgl. Neubaukosten von 650.000 € bis 900.000 €

© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos  
77

## 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
- **Vollständige und nachhaltige Sanierung von Schadensherden innerhalb definierten und bestimmbarer Zeiträumen möglich**
- **„intensive“ Sanierungsbegleitung und -steuerung (Online-Datenerfassung, Anlagensteuerung) erforderlich**
- **Einsatzbereiche und Anwendungsgrenzen werden „erweitert“ bzw. „ausgereizt“**

© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos  
78

## Zusammenfassung & Ausblick Dampf-Luft-Injektion

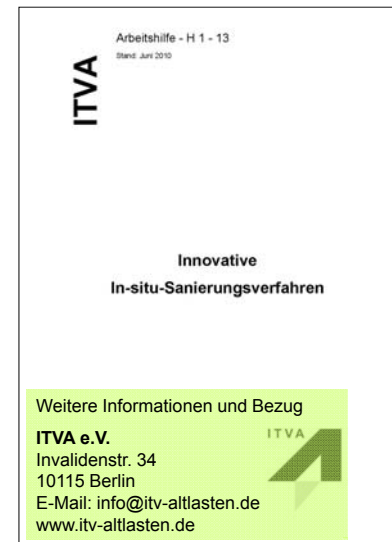
- **Bestimmung der Einsatzgrenzen über Pilotanwendungen**  
Kluftaquifere, dampfunterstützte konduktive Sanierung gering durchlässiger Sedimente (Schluffe, Tone), Tiefen über 20 m, große Aquifermächtigkeiten .....
- Durch zahlreiche **Referenzprojekte** immer **neue Erkenntnisse** und Erfahrungen („Lessons learned“)
- ➔ **Entwicklung war / ist nur möglich durch viele Beteiligte und Geldgeber**



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos  
79

## Informationen zu den Verfahren




© VEGAS



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele


BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos  
80

Entsteht im Auftrag des Terra-, Aqua- und Sanierungskompetenzzentrums - TASK



### Leitfaden

Thermische In-situ-Sanierungsverfahren (TisS) zur Entfernung von Schadensherden aus Boden und Grundwasser



In deutsch und englisch  
Download: [www.task-leipzig.info](http://www.task-leipzig.info)

Gefördert von:  
Bundesministerium für Bildung und Forschung  
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ

### Grundlagen der Dampf-Luft-Injektion

© 2012 VEGAS, Universität Stuttgart

### DLI-Tool

zur Dimensionierung einer thermischen In-situ-Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion



In deutsch  
Download: [www.task-leipzig.info](http://www.task-leipzig.info)

© VEGAS

ÖVA-Sanierungsreport SR 001 Oktober 2011

### 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 innerhalb der Räumlichkeiten einer ehemaligen Chemischen Fabrik das Stadtmuseum eines CKW-Schadens (v. A. PCE), der sich über die vergangenen bis in die geringste Zone erstreckt. Ein Kabinen eines Vorratsbehälters (Pflanzenernährung) 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 vor 500 kg CKW aus der gefährigten und der ungesättigten Zone entfernt werden. Die Sanierungslänge betrug rund 220 m<sup>2</sup> unterhalb einer ehemaligen chemischen Fertigung und dem Gebäudebereich, die vertikale Ausdehnung des Schadens konnte auf 7 m in GÜT eingegrenzt werden. Das denkmalgeschützte Gebäude wird im Erdgeschoss als Atelier genutzt, die oberen Stockwerke sind bewohnt.

Beiden Sanierungen im Jahr 2010 konnten vor 500 kg CKW aus der gefährigten und der ungesättigten Zone entfernt werden. Die Sanierungslänge betrug rund 220 m<sup>2</sup> unterhalb einer ehemaligen chemischen Fertigung und dem Gebäudebereich, die vertikale Ausdehnung des Schadens konnte auf 7 m in GÜT eingegrenzt werden. Das denkmalgeschützte Gebäude wird im Erdgeschoss als Atelier genutzt, die oberen Stockwerke sind bewohnt.

ÖVA-Sanierungsreport SR 001 Oktober 2011

### 10. PROJEKTZUSAMMENFASSUNG

**Auftraggeber:** Stadt Karlsruhe / Umwelt- und Arbeitschutz / Pflanzenernährung  
**Planer:** Ayan Özgen / Umwelttechnik / Ingenieurbüro und Umweltsanierung / Herr Dörmann  
**Ausführender:** Zoltan Urszuly-Nachrich / Gerd / Herr Peter  
**Beschreibung:** Umwelttechnik / Pflanzenernährung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)  
**Begleitung:** Herr Fischer, Herr Kowalski

### 11. ANSCHLIESSENDE BEWERTUNG

11.1 STANDORTCHARAKTERISTIKEN, RISIKO UND SONSTIGE STANDORTCHARAKTERISTIKEN  
Für die Stadt Karlsruhe als Grundstücksbesitzer war bei der Entscheidung für das Verfahren sowohl die kurze Sanierungslänge als auch die wirtschaftliche Variante im Vergleich zu anderen Verfahren ausschlaggebend.  
Auch die Eignung vor dem Hintergrund der schwierigen baulichen Randbedingungen (Altstadtlage, enge Straßensituation, Denkmalschutz) spielte eine Rolle. Des Weiteren wurden langjährige Nutzungserfahrungen wie z. B. bei punktförmigen Maßnahmen vorhanden. 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 -fähigkeit. Die Vorgehensweise der Sanierung im Vorfeld, wie 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 räumlich abgegrenzten Schadstoffquelle. Jede Anwendung des Verfahrens bedarf zwingend einer standortspezifischen, detaillierten Untersuchung der Maßnahme.



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 81



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 82



Thermische In-situ-Verfahren:  
Möglichkeiten und Fallbeispiele

BEW Seminar, Duisburg  
19. November 2014 Kos 83