

Thermische In-situ-Sanierung in geklüftetem Festgestein mittels Dampf-Luft-Injektion – Auslegung, Anwendung, Erfahrungen und Empfehlungen –

*Dipl.-Ing. (FH) Oliver Trötschler, Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky, Stuttgart,
Dipl.-Ing. Bernd Lidola, Dipl. Geoökologin (TU) Isabell Kleeberg, Villingen-
Schwenningen, Dipl.-Geologe Stefan Schulze, Schallstadt*

Inhaltübersicht

	Rdnr.
Zusammenfassung	1 – 16
1 Sanierungstechnologie Dampf-Luft-Injektion	17 – 28
1.1 Verfahrensprinzip	17 – 24
1.2 Anlagentechnik	25, 26
1.3 Einsatzbereich	27, 28
2 Auslegung einer Sanierung mittels DLI	29 – 48
2.1 DLI Dimensionierungstool	29, 30
2.2 Gemischsiedetemperatur	31, 32
2.3 Reichweite der Dampfausbreitung und Zeitbedarf	33 – 48
3 DLI im geklüfteten Festgestein	49 – 62
3.1 Ausgangslage	49 – 51
3.2 Pilotstudie	52 – 56
3.3 Sanierungskonzept	57 – 62
4 DLI Biswurm: Sanierungsablauf und Erfahrungen	63 – 81
4.1 Anpassung des Sanierungsverlaufs	63 – 68
4.2 Wärmeausbreitung	69
4.3 Betrieb der Sanierung	70 – 73
4.4 Schadstoffaustrag	74 – 79
4.5 Sanierungsabschluss	80, 81
5 Lessons Learned	82 – 90
5.1 Konsequenzen aus dem Sanierungsverlauf auf zukünftige thermischen Sanierungen im Klüftgestein	82 – 86
5.2 Sanierungskosten	87 – 90
6 Beteiligte und Finanzierung	91
7 Schlussfolgerungen und generelle Empfehlungen zum Einsatz	92 – 95
8 Literaturverzeichnis	

Zusammenfassung

- 1 Das In-situ-Sanierungsverfahren der Dampf-Luft-Injektion (DLI) ist zur Schadensherdsanierung von organischen Stoffen mit einer Siedetemperatur unter 280 °C (BTXE, LCKW, Mineralöl) in der gut bis mitteldurchlässigen, ungesättigten Bodenzone und der mitteldurchlässigen, gesättigten Bodenzone anwendbar.
- 2 Die Dimensionierung der DLI basiert auf der Bestimmung des maximalen Injektionsdrucks und der entsprechenden Dampf-Luft-Rate zur Berechnung der Aufheizzeit des Sanierungsgebiets auf die sogenannte Gemischsiedetemperatur. Bei Erreichen der Gemischsiedetemperatur sieden die Schadstoffe gemeinsam mit dem Wasser und werden somit verdampft. Die strömungstechnische Dimensionierung beinhaltet die Bestimmung der erforderlichen Absaugleistung zur Absaugung der verdampften Schadstoffe. Die Zeitdauer zur Verdampfung der Schadstoffe hängt von der Schadstoffmasse, der Menge injizierter Luft, dem Fortschritt der Dampffront und der Bodenluftabsaugrate, sowie dem Dampfdruck der Schadstoffe ab. Die Desorption der Schadstoffe vom Boden ist schadstoff-, standort- und bodenspezifisch und limitiert zumeist die Sanierungsdauer.
- 3 In der gesättigten Bodenzone spielen Auftriebskräfte eine entscheidende Rolle für die horizontale Reichweite der Dampfausbreitung, die sogenannte Thermische Reichweite. In flachen Aquiferen können Thermische Reichweiten von 3–8 m erzielt werden.
- 4 Zur Dimensionierung einer DLI wurde ein Softwarepaket, das DLI-Tool entwickelt. Die erforderlichen Parameter wie Standortgröße, Schadstoffart und -menge, hydraulische Durchlässigkeit, Grundwasserstand, gewünschtes Sanierungslayout und Schadensgeometrie werden abgefragt und eine thermische In-Situ-Sanierung (TisS) dimensioniert. Das Tool berechnet mit guter Genauigkeit die Wärmemengen und erforderliche Aufheizzeiten, die Sanierungsdauer wird derzeit noch mit Hilfe einer angenommenen Desorptionsdauer (Erfahrungswerte) berechnet, was zu größeren Bandbreiten führt. Die Kenntnis der standortspezifischen Desorptionsdauer ist daher von großem Vorteil. Daher wird empfohlen die Desorptionsdauer im Rahmen einer Pilotanwendung zu bestimmen.
- 5 Der Einsatz der DLI zur Sanierung des Standorts „Biswurm“ einer der größten Altlasten im geklüfteten Festgestein mit organischen Schadstoffen in Baden-Württemberg, wird beispielhaft näher beschrieben. Am Standort wurde sowohl eine Pilotanwendung durchgeführt, als auch das DLI-Tool zur

Sanierungsplanung eingesetzt. Dabei zeigte sich eine gute wärmetechnische Übereinstimmung von Theorie und Praxis. Die Schadstoffaustragszeiten wurden jedoch unterschätzt ebenso die thermische Reichweite.

Auf dem ehemaligen städtischen Verbrennungsplatz „Biswurm“ wurden in den sechziger und siebziger Jahren flüssige und feste Abfallstoffe (Lösemittel (BTXE), LCKW, Mineralöle, Elektro- und Galvanikabfälle) gelagert und verbrannt. Ein Teil der Chemikalien versickerte hierbei in den Untergrund. Die dadurch entstandene, in bis zu 37 m Tiefe reichende Boden- und Grundwasserverunreinigung im klüftigen Sandstein mit einem Schadenszentrum von 2.900 m² Fläche und 15 m Tiefe wurde mittels Dampf-Luft-Injektion saniert. 6

Der behandelte Untergrund besteht unter ca. 3 m u. GOK aus einer Schichtenfolge von Tonstein bis ca. 9 m u. GOK und fein geklüftetem Plattensandstein bis 20 m Tiefe. Von der Schadstofffahne ist sowohl der Plattensandstein wie auch der darunter liegende Kristallsandstein bis zu 37 m Tiefe betroffen. Der obere Bodenkörper bis 3 m u. GOK wurde 2004 ausgetauscht und ca. 1.600 kg LCKW entfernt. 7

Aufbauend auf einer Machbarkeitsstudie wurde im Rahmen der SU eine Pilotanwendung zur Bestimmung der Reichweite der Dampfausbreitung und der Desorptionsdauer des Festgesteins in 2009 durchgeführt. Die erzielte thermische Reichweite, die horizontale, radiale Dampfausbreitung betrug 7,5 m. 8

Die Dimensionierung der Sanierung erfolgte aufbauend auf den Ergebnissen der Pilotanwendung mit Hilfe des DLI-Tools. Das DLI-Tool unterschätzte dabei die erzielte thermische Reichweite: 2,4 m Radius an Stelle von 7,5 m Radius. Für die Auslegung der Sanierung wurde daher eine Reichweite von 5 m zu Grunde gelegt und somit die Injektionsbrunnen im Abstand von 10 m abgeteuft. 9

Die erforderlichen Desorptionszeiten (6 Wochen Aufheizung und 8 Wochen Desorptionsdauer) und die Zeitdauer der Sanierung wurden in guter Übereinstimmung berechnet. Das DLI-Tool überschätzte die tatsächlich erzielten Werte der Pilotanwendung um 5 %. Während der Pilotanwendung wurden 560 kg LHKW aus ca. 2.900 m³ Festgestein in 3 Monaten Sanierungsdauer entfernt. 10

Nach Detailplanung, öffentlicher Ausschreibung und Vergabe (2011–2012), wurde im Sommer 2012 die thermische In-Situ-Sanierung begonnen. Insgesamt wurden 43.500 m³ Sand- und Tonstein behandelt. Die Sanierung ist in 11

9 Feldabschnitte unterteilt. In die sukzessiv zu behandelten Feldabschnitte sollten über 33 Monate ein Dampf-Luft-Gemisch mit 400 kW Wärmeleistung und ca. 5–10 % Luft eingeleitet werden. Hierzu wurden 32 Injektionsbrunnen und 37 Absaugbrunnen installiert. Die Kosten waren auf 3,3–3,6 Mio. EUR brutto kalkuliert.

- 12 Einige Monate nach Start der DLI wurde eine weitreichende Dampf- und Wärmeausbreitung sowie eine Mobilisierung gasförmiger LHKW in den Klüften festgestellt. Die Desorptionsdauer in den nördlichen Feldern 1–3 war um einen Faktor 2–2,5 größer als während der Pilotanwendung beobachtet. Zur Kompensation wurde der Dampf in zwei Behandlungsfelder, ab 2015 in 3 Felder zeitgleich eingeleitet. Eine Ausweitung der Bodenluftabsaugung auf mindestens fünf Abschnitte wurde erforderlich. An Stelle von 10 Injektionsbrunnen wurden 20 Brunnen betrieben und Bodenluft an bis zu 40 Brunnen (inkl. vormaliger Injektionsbrunnen) abgesaugt. Die Sanierungsdauer erhöhte sich um 35 %, die Energiekosten um 25 %. Der simultane Betrieb erlaubte eine Desorptionsdauer von 7 Monaten je Feld. Über diesen Zeitraum wurden Temperaturen oberhalb der Gemischsiedetemperatur von 80 bzw. 88 °C im Sanierungsbereich gehalten.
- 13 Das Sanierungsziel wurde im Sommer 2016 mit Unterschreitung einer LCKW Massenfracht von 10 g/h erreicht und die DLI beendet. Die Felder 6–9 kühlen bei aktiver Bodenluftabsaugung und Grundwasserförderung ab. Die Grenztemperatur von 40 °C im Festgestein zum Ausschalten der aktiven Sanierung wird im März 2017 erreicht werden. Während der 48-monatigen DLI wurden rd. 4.800 kg LCKW über die Bodenluft und rd. 200 kg LCKW über das Grundwasser entfernt. Insgesamt wurden inklusive der Pilotanwendung nahezu 5.600 kg LCKW aus 43.500 m³ Festgestein über die DLI entfernt.
- 14 Im Vergleich zur Sanierung des Standortes mittels Grundwasserreinigungsanlage (pump & treat) konnten Zeitvorteile von mindestens 80 Jahren und Kostenvorteile von mehr als 3 Mio. EUR bestimmt werden.
- 15 Die Sanierung des geklüfteten Festgesteins gestaltete sich aufgrund der längeren Desorptionsdauer und dem weitreichenden Netz der Klüfte schwieriger als auf Grundlage der Pilotanwendung zu erwarten war. Die Sanierungsanlage musste erweitert und die Sanierungsstrategie den aktuellen Unterdruckverhältnissen und Schadstoffkonzentrationen regelmäßig angepasst werden. Ein erhöhter Aufwand im Engineering war erforderlich. Die letztendlichen Kosten von 4,4–4,5 Mio. EUR lagen um ca. 1 Mio. EUR höher als 2012 geplant.

Mehrkosten und -zeiten traten auf, obwohl im Rahmen der Pilotanwendung (ca. 5 % des Gesamtvolumens) eine standorttypische DLI dimensioniert werden konnte. Eine Weiterentwicklung zur Bestimmung der standorttypischen Desorptionsdauer wird daher angestrebt. Die derzeitigen Unsicherheiten sollten bei Folgeanwendung finanziell mit ca. 30 % eingeplant werden

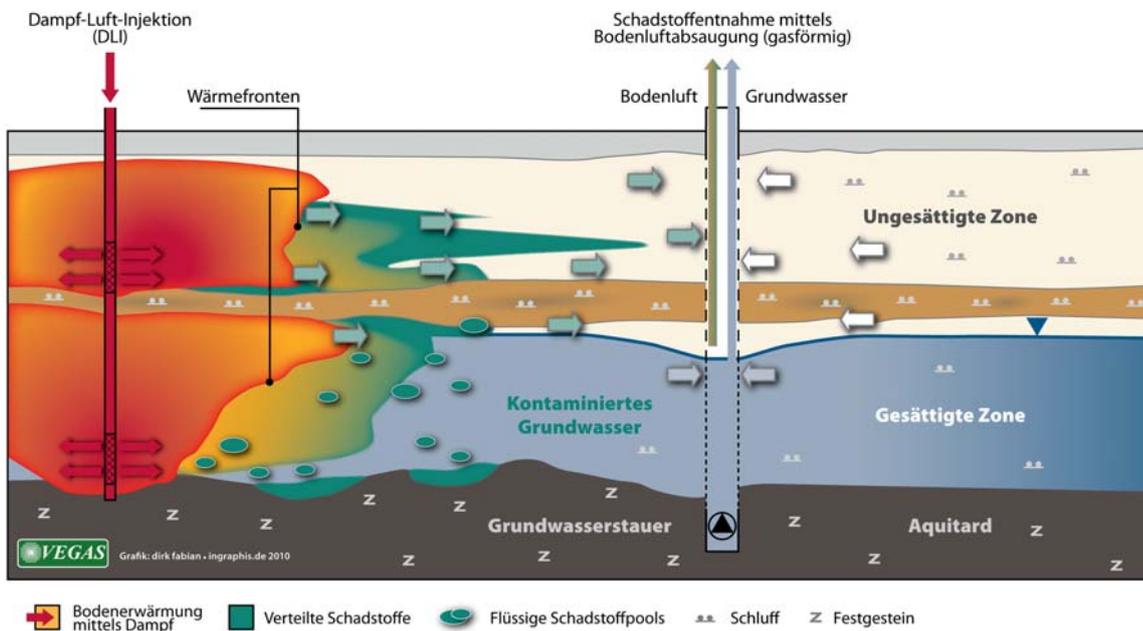
1 Sanierungstechnologie Dampf-Luft-Injektion

1.1 Verfahrensprinzip

Die Sanierungstechnologie kann zur Behandlung der ungesättigten Bodenzone über Injektion eines Dampf-Luft-Gemischs oder zur simultanen Sanierung der gesättigten und ungesättigten Bodenzone durch Injektion eines Wasserdampf-Luft-Gemisches in die gesättigte Zone unterhalb des Schadenszentrums eingesetzt werden (Abb. 1). Die Schadstoffe werden infolge der sich um die Injektionsbrunnen im Idealfall radialsymmetrisch ausbreitenden Dampf- und Wärmefronten verdampft (in die Gasphase übergeführt).

Abbildung 1: Prinzipskizze DLI mit Kenngrößen

18



Dampf-Luft-Injektion	Bodenluftabsaugung	Grundwasserentnahme
Schadstoffverdampfung 0.1–0.2 kW/m ³ Boden	Spez. Absaugrate 0.1–0.2 m ³ /(m ³ × h)	(Kühlwasser) Abhängig vom Standort

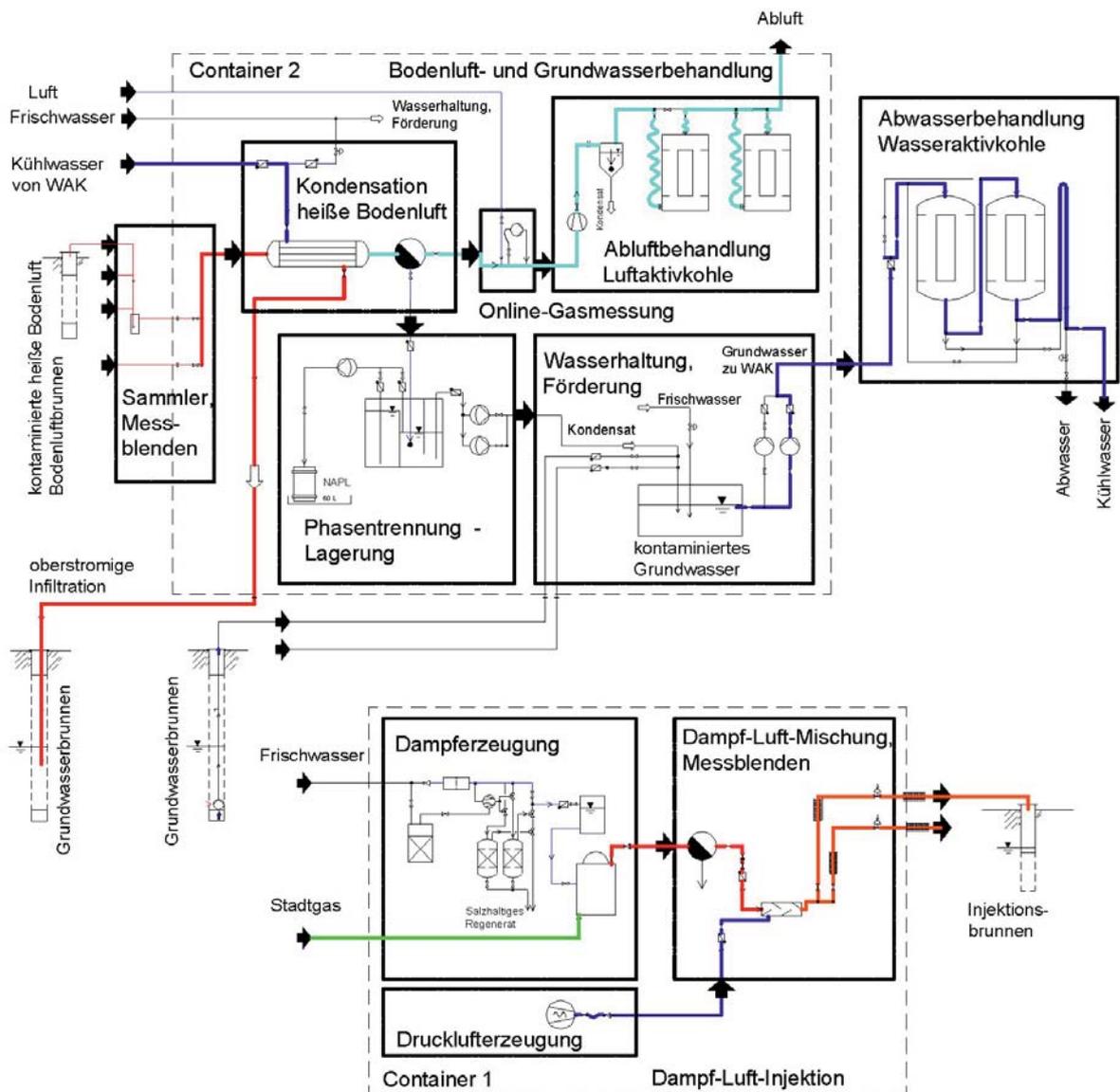
- 19 Die mit dem Dampf injizierte Luft transportiert die gasförmig gewordenen Kontaminanten in Richtung der ungesättigten Zone und über eine Bodenluftabsaugung werden die Schadstoffe entfernt. Eine aktive Grundwasserhaltung sichert die Entnahme der wassergelösten Schadstoffe und schützt vor einer eventuellen abstromigen Verfrachtung.
- 20 Durch die Injektion von Satttdampf oder der Dampf-Luft-Mischung beginnen die Schadstoffe bereits bei Temperaturen unterhalb der Dampftemperatur von 100 °C (bei Atmosphärendruck), bei der so genannten Gemischsiedetemperatur zu siedeln. Diese liegt im Falle des Schadstoffs Perchlorethylen bei ca. 92 °C (bei Atmosphärendruck). Zunächst muss diese Temperatur erreicht und über einen gewissen Zeitraum, der Verdampfungs- oder Desorptionsdauer gehalten werden, um die Schadstoffe annähernd restlos zu entfernen. Schadstoffe, die in schlecht durchlässigen Bereichen oder in Festgesteinslagen migriert sind werden infolge der konduktiven Erwärmung des Bodens entsprechend den anstehenden Temperaturen verdampft und über diffusive Prozesse in die besser durchlässigen Bereiche und schlussendlich über die Bodenluftabsaugung ausgetragen.
- 21 Da sich bei reiner Dampf-injektion an der Kondensationsfront Schadstoffe anreichern und in ungünstigen Fällen bis auf den Grundwasserspiegel absinken können, ist eine reine Dampf-injektion nur bei organischen Schadstoffen mit einer Dichte $< 1 \text{ kg/L}$ (LNAPL) möglich und erfordert den Einsatz einer Phasenabschöpfung vom Grundwasser. Im Falle von „schweren“ organischen Schadstoffen (DNAPL, z. B. LCKW) muss ein Dampf-Luft-Gemisch zur Vermeidung der Flüssigverfrachtung injiziert werden.
- 22 Die Vorteile des Verfahrens liegen in geringen Sanierungszeiten, sowie einer vollständigen Reinigung der auf die Gemischsiedetemperatur des entsprechenden Schadstoffs erwärmten Bereiche. Die Sanierung schlecht durchlässiger Bereiche über konduktive Verdampfung führt zu verlängerten Sanierungszeiten bei gleichzeitig verringertem Energieeintrag.
- 23 Da sich der Dampf in der gesättigten Zone durch Auftriebseffekte nicht nur horizontal im Aquifer sondern verstärkt vertikal nach oben ausbreitet, ist die Reichweite eines Injektionsbrunnens begrenzt. Vorteil ist, dass das Verfahren zur simultanen Sanierung der gesättigten und ungesättigten Zone eingesetzt werden kann. Heterogene Strukturen, also Schichtungen oder Linsen geringerer Durchlässigkeit wirken sich in der Regel positiv auf die horizontale Dampfausbreitung aus.

Weitere Merkmale der Sanierungstechnologie sind eine Temperaturüberwachung zur Kontrolle und Steuerung der Sanierung und eine verfahrensspezifische Anlagentechnik. Der rasche zeitliche Ablauf der thermischen Sanierung erfordert eine tägliche Überwachung des Schadstoffaustrags, der Dampfausbreitung und der wichtigsten Prozessgrößen der Anlagentechnik. Aus diesem Grund wird zumeist eine Fernüberwachung über ein Datenerfassungssystem mit Gasmesstechnik (GC-PID o. ä.) und Temperaturmesstechnik eingesetzt. 24

1.2 Anlagentechnik

Anlagentechnisch ist neben einem Dampferzeuger und einem Kompressor zur Erzeugung und Injektion des Dampf-Luft-Gemischs eine Anlage zur Bodenluftabsaugung erforderlich (s. Abb. 2). Die Bodenluftabsaugung beinhaltet einen Wärmetauscher mit Kondensatabscheider, einen Verdichter, sowie die Abluftbehandlung über Aktivkohle, TNV oder KatOx. Zur Bereitstellung von Kühlwasser bietet sich eine Grundwasserförderung an. Das Grundwasser sollte mittels Wasseraktivkohle aufbereitet werden. Eine Aktivkohleaufbereitung ist auch zur Reinigung des anfallenden wässrigen Kondensats aus der heißen Bodenluft erforderlich. Bei höher siedenden Schadstoffen kann es während der Kondensation der Bodenluft zur Bildung organischer Phase kommen. Dem Kondensatabscheider ist ein Phasenabscheider zur Trennung der wässrigen und organischen Flüssigkeit nachzuschalten. Der Phasenabscheider kann bei Einsatz einer Phasenschöpfung an den Extraktionsbrunnen eingesetzt werden. 25

26 Abb. 2: Verfahrensfließbild einer Sanierungsanlage zur Dampf-Luft-Injektion



1.3 Einsatzbereich

- 27 Das Verfahren kann für organische Schadstoffe (DNAPL und LNAPL, leicht- und mittelflüchtig, Siedetemperaturen bis 180 °C) in der ungesättigten und gesättigten Zone eingesetzt werden. Der Einsatz kann insbesondere auch unter Gebäuden bei Erhalt der Gebäudenutzung erfolgen. In der ungesättigten Bodenzone ist eine Anwendung in Locker- und Festgesteinen mit guter bis mäßiger Durchlässigkeit (Feinsand bis Schluff) möglich. Im Grundwasser ist der Einsatz für Porengrundwasserleiter (Lockergesteine, Feinsand bis Schluff) mit einer hydraulischen Durchlässigkeit k_f : 2×10^{-5} bis

5×10^{-4} m/s praxisbewährt [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Die Technologie kann auch im geklüfteten Festgestein erfolgreich eingesetzt werden.

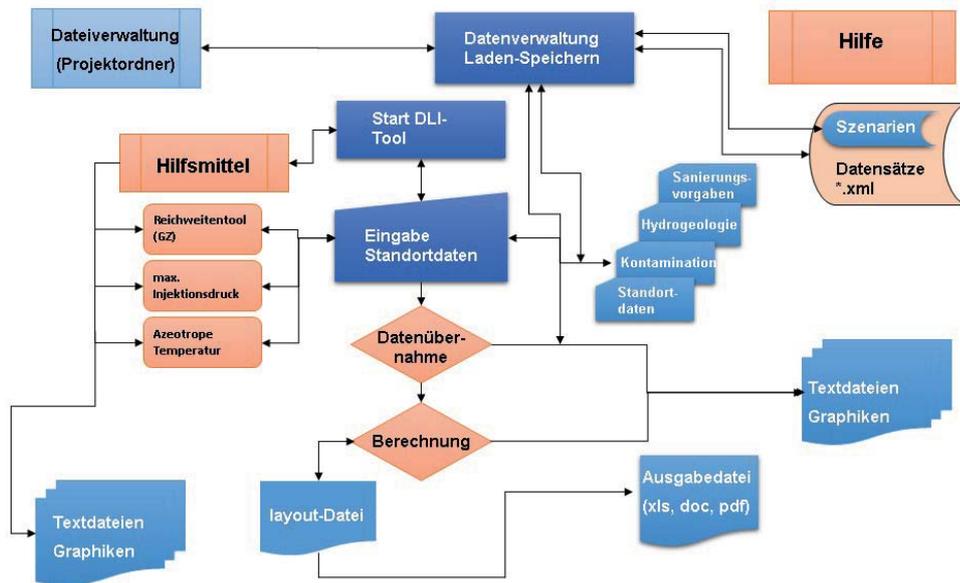
Unter dem Ansatz einer anisotropen Schichtung und Durchlässigkeiten im Bereich zwischen $k_f \sim 0,5-5 \times 10^{-4}$ m/s kann von einer „thermischen Reichweite“ um 3–5 m Radius mit einer Injektionsrate um 150 kg/h Satttdampf (1 m Filterstrecke) und einer Injektionstiefe von 3–5 m u. Grundwasserspiegel ausgegangen werden. Da die Reichweite stark von der Anisotropie des Aquifers, sowie der Schichtfolge abhängig ist, wird eine Überprüfung der „thermischen Reichweite“ im Rahmen einer Pilotierung vor Auslegung einer Gesamtsanierung empfohlen. Im Falle eines geklüfteten Festgestein-aquifers ist die Dimensionierung über eine Pilotanwendung zwingend erforderlich [8], [9]. 28

2 Auslegung einer Sanierung mittels DLI

2.1 DLI Dimensionierungstool

Zur rechnergestützten Dimensionierung einer Dampf-Luft-Injektion wurde das Softwarepaket „DLI-Tool“ im Rahmen von TASK [10] entwickelt und im September 2012 erstmals im Rahmen eines TASK Workshop am UFZ in Leipzig vorgestellt [11]. Im DLI-Tool werden die in Folge dargestellten Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung zusammengefasst. Die Eingabeparameter, die spezifische Sanierungsplanung, das Sanierungslayout und die Ausgabedaten können für verschiedene Szenarien gespeichert, berechnet und zur weiteren Kostenermittlung genutzt werden, s. Abb. 3. 29

30 Abb. 3: Ablaufschema DLI-Tool

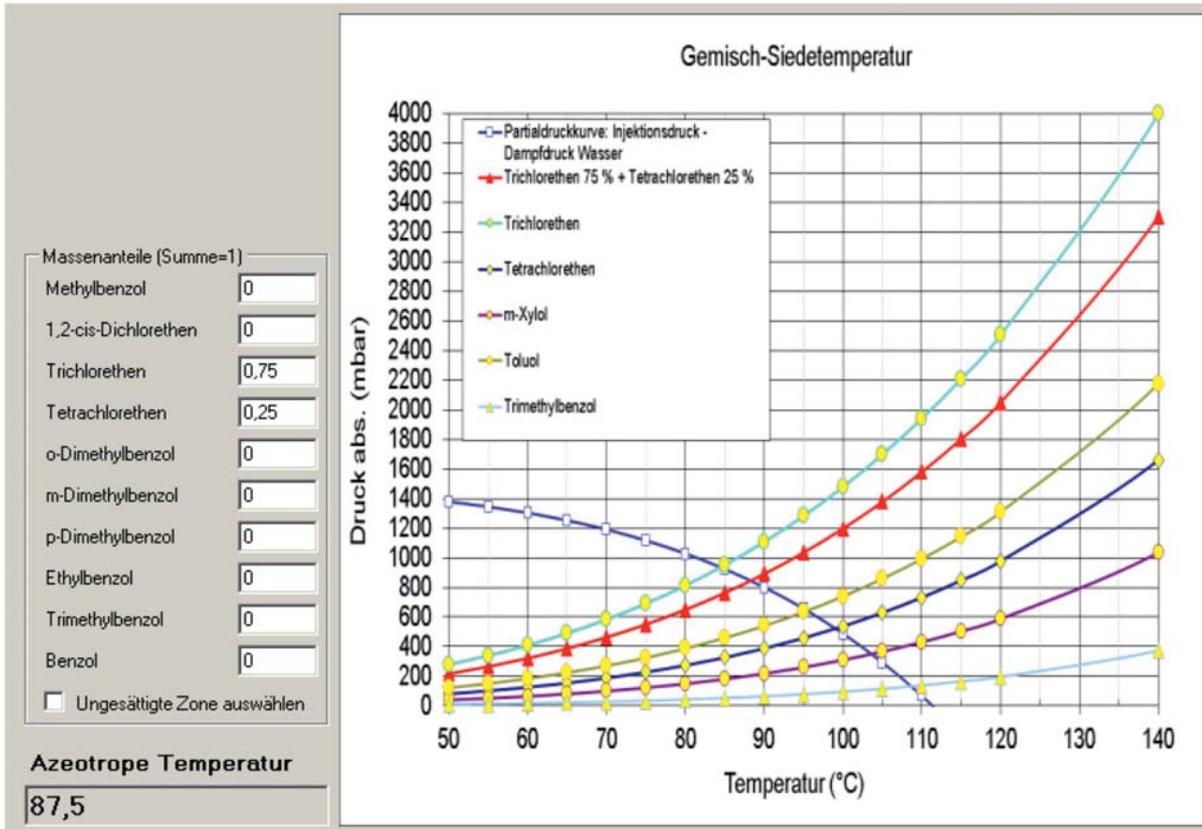


2.2 Gemischsiedetemperatur

- 31 Die standortspezifische Bestimmung der Gemischsiedetemperatur erfolgt entsprechend dem Schadstoffgemisch und der Tiefe der Dampf-Luft-Injektion. Für das Schadstoffgemisch von 75 % TCE und 25 % PCE am Standort Biswurm ergibt sich entsprechend der Injektionstiefe eine Gemischsiedetemperatur von 88 °C für den unteren Injektionsbereich (11–15 m u. GOK), s. Abb. 4 bzw. für den Bereich zwischen 8–11 m u. GOK eine Temperatur von 82 °C.

Abb. 4: Bestimmung der Gemischsiedetemperatur am Standort Biswurm

32



2.3 Reichweite der Dampfausbreitung und Zeitbedarf

Entscheidend für die Auslegung einer thermischen Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion in der ungesättigten Zone ist die „thermische Reichweite“. Je nach Anordnung der Injektions- und Extraktionsbrunnen liefert die thermische Reichweite das Maß für den Abstand der Injektionsbrunnen. Zumeist besteht das Sanierungsdesign aus zentral in Reihen angeordneten Injektionsbrunnen, die von Extraktionsbrunnen am Rand des Sanierungsbereichs umgeben sind. Sanierungsfelder mit einer Dimension größer als 2.000 m³ Boden werden in der Regel derart angeordnet, dass Einzelfelder behandelt werden und sich Reihen von Injektionsbrunnen und Extraktionsbrunnen abwechseln [12, 13].

Die thermische Reichweite ist im Wesentlichen abhängig von den Aquiferkennwerten, wie Mächtigkeit, hydraulische Durchlässigkeit, Anisotropie und geologischer Aufbau. Ziel der Auslegung ist das Erreichen einer maximalen horizontalen Ausbreitung der Dampffront um den Injektionsbrunnen in der gesättigten Zone mit Ausbildung eines kohärenten Dampfraums über

die Verdrängung des Grundwassers und dessen Verdampfung. Nach Durchbruch des Dampfes in die ungesättigte Zone spielen die vertikal gerichteten Auftriebskräfte (Dichteunterschied Dampf-Wasser) nur noch eine untergeordnete Rolle und die Dampfausbreitung wird durch die Reibungskräfte bestimmt. Die Ausbreitung des Dampfraums in der ungesättigten Zone wurde bereits von Schmidt et. al., 2000 [12] detailliert beschrieben. Für die gesättigte Zone kann auf den Beitrag von Koschitzky et. al., 2008 [14] verwiesen werden.

- 35 Die angegebenen Formeln zur Berechnung des Injektionsdrucks, sowie dem Einsatz der dimensionslosen Dampfausbreitungszahl nach Färber, 1997 [13], zur Berechnung des Zeitbedarfs zur Erwärmung der ungesättigten Zone, kann auch für die gesättigte Zone angewendet werden. Zu beachten ist hierbei die Injektionstiefe bzw. der hydrostatische Druck des Grundwassers auf Höhe der Injektionsbrunnen, sowie die generell anzusetzende vollständige Wassersättigung. Ochs 2006 [15] hat die Auslegung einer DLI in die gesättigte Zone um die rechnergestützte Berechnung der Dampfausbreitung im Grundwasser um sogenannte Typenkurven erweitert.
- 36 Bei Überprüfung des Ansatzes über Erstellung eines Mehrphasen-, Mehrkomponenten-Modells [15], für die Pilotanwendung in Karlsruhe-Durlach [2] zeigte sich, dass die Typenkurven die Dampfausbreitung grundsätzlich unterschätzen. Dies liegt primär im geologischen Schichtenaufbau des Untergrundes, sowie der Anisotropie der einzelnen Schichten begründet. Zuverlässige Aussagen über die Reichweite einer Dampf-injektion könnten zukünftig unter Einsatz numerischer Modelle erfolgen und u. U. erforderliche zeit- und kostenaufwändige Pilotanwendungen zur Reichweitenbestimmung ersetzen.
- 37 Beispielhaft soll nachfolgend die Vorgehensweise zur Abschätzung der thermischen Reichweite erläutert werden. Das Beispiel bezieht sich auf den geklüfteten Sandsteinaquifer in Biswurm [9] mit einer hydraulischen Durchlässigkeit von 2×10^{-5} m/s mit einer Anisotropie von 10 ($K_{\text{hor}}/K_{\text{vert}}$), einer Injektionstiefe von 11–15 m u. GOK (Filterdurchmesser 200 mm) und einem Wasserstand von 12 m u. GOK. Die relative Durchlässigkeit wurde zu 0,8 angenommen und die Porosität liegt bei 0,04.
- 38 **Bestimmung des maximalen Injektionsdrucks** Der maximale Injektionsdruck wird durch die Bodenauflast bestimmt. Er ergibt sich aus der Bodenauflast, einem Sicherheitsfaktor und dem hydrostatischen Druck des Grundwassers oberhalb der Injektion. Der Sicherheitsfaktor liegt erfahrungsgemäß zwischen 0,3 und 0,7. Für das Beispiel ergibt sich mit einem

Sicherheitsfaktor von 0,3 und einer Grundwassermächtigkeit von 3 m ein Injektionsdruck von 2,6 bar.

Bestimmung des maximalen Dampf-Luft-Massenstroms Der maximal injizierte Dampf-Luft-Massenstrom ergibt sich aus dem maximalen Injektionsdruck, der Durchlässigkeit des Aquifers und dem Brunnenausbau. Als praktikable Methode hat sich die Berechnung der Injektionsrate aus der umgestellten Brunnenformel für gespannte Grundwasserverhältnisse nach Schmidt, 2001 [16] erwiesen: 39

$$q_{DL} = \frac{2 \Pi p_{in} h K_0 k_{r,g}}{\eta_{DL} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right)}$$

mit:

q_{DL} : Massenfluss Dampf-Luft [kg/s]

p_{in} : Dampf-Luft-Injektionsdruck [Pa]

h : Länge Injektionsfilter [m]

K_0 : Permeabilität des Bodens [m²] aus $K_0 = k_f \rightarrow_w / (\rightarrow_w g) \sim k_f \times 1 \times 10^{-7}$

$k_{r,g}$: relative Permeabilität des wassergesättigten Bodens für Gase (Dampf-Luft)

η_{DL} : dynamische Viskosität der Dampf-Luft-Mischung [kg/(m s)]

r : Reichweite des Injektionsbrunnens [m]

r_0 : Brunnenradius (Filterbereich) [m]

Im gewählten Beispiel ergibt sich mit einer angesetzten relativen Permeabilität von 0,3 eine Injektionsrate von 120 kg/h. Grundsätzlich sollte die eingesetzte Luftmenge im Bereich zwischen 10–30 Ma% des Dampfanteils liegen, um einen Abtransport der verdampften Schadstoffe zu gewährleisten. Für hohe Schadstoffgehalte im Bodenkörper kann die Luftmenge erhöht werden. Hierdurch verringert sich die Injektionstemperatur, die stets oberhalb der Gemischsiedetemperatur liegen muss. Für das gewählte Beispiel mit einem Injektionsdruck von 1.400 mbar (2,4 bar abs.) und einer Temperatur von 120 °C liegt der Luftanteil bei ca. 10 %. Dies ergibt sich entsprechend den Zustandsgleichungen für Satttdampf [17] bzw. der Dampf tafel für einen Absolutdruck der Dampf-Luft-Mischung. Die dynamische Viskosität kann gleichfalls [9] entnommen, bzw. aus dem Dampf- und Luftanteil berechnet werden und liegt bei $1,7 \times 10^{-5}$ kg/(m s). 40

41 Bestimmung der Gravitationszahl

Anhand der Gravitationszahl kann die Dampfausbreitung bestimmt werden. Sie berechnet sich nach Ochs 2006 [6]:

$$Gr_{rad} = \sqrt{\frac{\eta_{DL} q_D}{\Pi(\rho_W - \rho_{DL}) g h^2 K_0 \rho_{DL}}}$$

mit:

η_{DL} : dynamische Viskosität der Dampf-Luft-Mischung [kg/(m s)]

q_{DL} : Massenfluss Dampf-Luft [kg/s]

h : Mächtigkeit des Aquifers (Abstand Injektionstiefe zu Grundwasserspiegel) [m]

K_0 : Permeabilität des Bodens [m²] aus $K_0 = k_f \rightarrow_W / (\rightarrow_W g) \sim k_f \times 1 \times 10^{-7}$

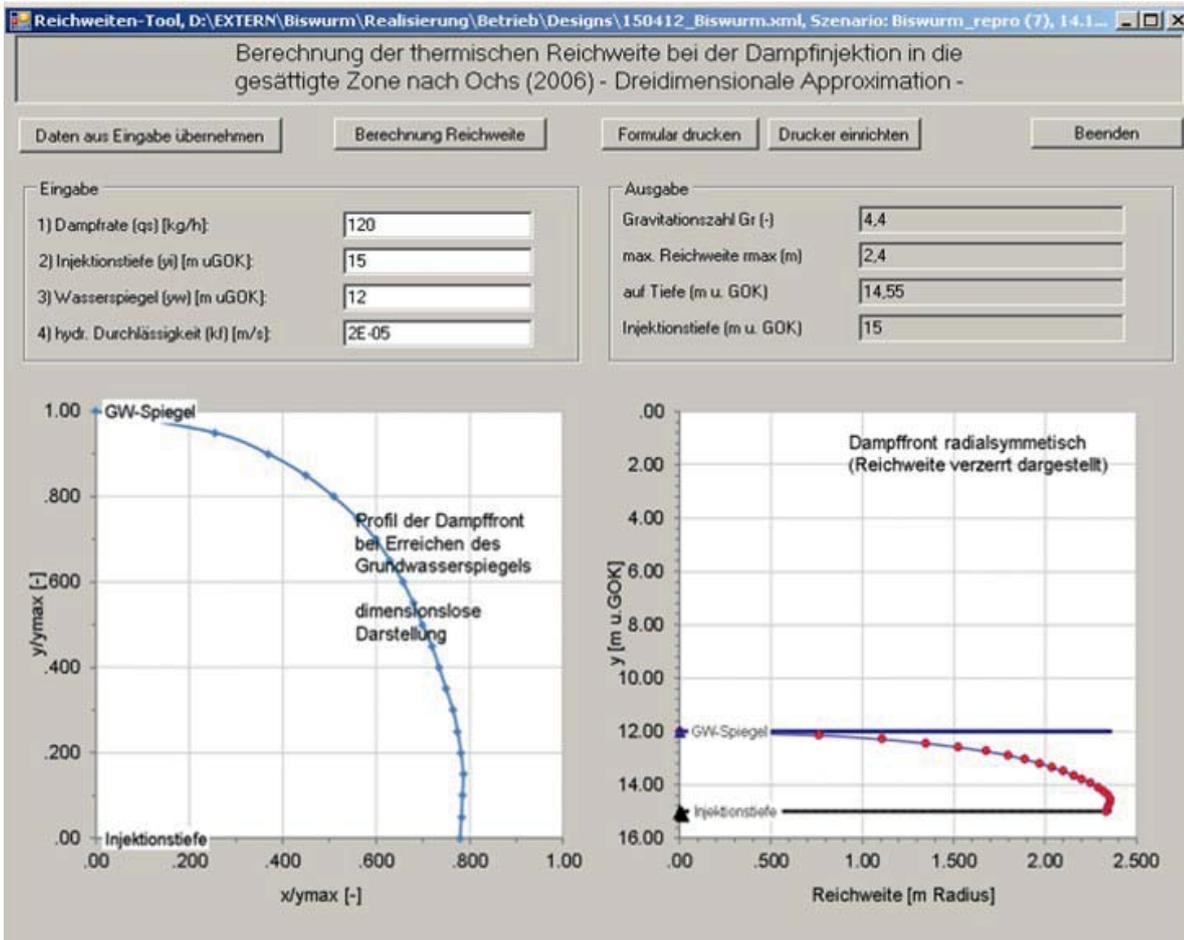
ρ_W : Dichte Wasser [kg/m³]

ρ_{DL} : Dichte der Dampf-Luft-Mischung [kg/m³]

- 42 Die Berechnung der Gravitationszahl ist in Abb. 5 dargestellt und liegt für das Beispiel bei 4,4. Die Anisotropie wird vereinfacht durch Division der im Feld bestimmten Transmissivität bzw. Permeabilität durch die Anisotropie, im Beispiel mit 10 angesetzt, berücksichtigt. Die vertikale Durchlässigkeit liegt somit bei 2×10^{-6} m/s. Die zu erwartende Reichweite kann aus den Typenkurven nach Ochs [15] entsprechend der berechneten Gravitationszahl bestimmt werden. Mit Hilfe des DLI-Tools [11] ist die Reichweite auf 2,4 m Radius oberhalb einer Tiefe von 14,55 m u. GOK bestimmt worden, s. Abb. 5.

Abb. 5: Abschätzung der Dampfausbreitung nach Ochs [15] mittels DLI-Tool

43



Günstig für die Dampfausbreitung im betrachteten fein geklüfteten Aquifer ist die Schichtenlagerung des anstehenden Sandsteins. Insofern war mit einer Reichweitenvergrößerung zu rechnen, die nicht über das Tool bzw. dem Typenkurvenansatz von Ochs 2006 [16] abgebildet werden kann. Der Abstand der Injektionsbrunnen ist auf das Zweifache der thermischen Reichweite, also ca. 5 m zu wählen. Gleiches gilt für den zu wählenden Abstand zwischen Injektions- und Extraktionsbrunnen. Für das komplexe System des Klufftgrundwasserleiters wurde die thermische Reichweite im Rahmen einer Pilotanwendung mit einem Injektionsbrunnen und vier Absaugbrunnen im Radius von 7,5 m bestimmt [9]. Die tatsächliche thermische Reichweite lag bei ca. 5 m Radius und war damit doppelt so groß, wie vorab im Rahmen der Dimensionierung berechnet.

44

Aufgrund der gekoppelten Strömungs- und Wärmeprozesse wird zuerst die dimensionslose Dampfausbreitungsgeschwindigkeit, s. Färber (1997) [13] und Schmidt et. al. (2000) [12] berechnet und entsprechend dem Energieein-

45

trag und der Masse des zu behandelnden Bodens der Zeitbedarf für die Erwärmung auf die Gemischsiedetemperatur berechnet. Der Energieeintrag (Kondensationsenthalpie mit $5 \times 120 \text{ kg/h}$ Sattdampf (450 kW) und $60 \text{ m}^3/\text{h}$ Luft) und die erforderliche Wärmemenge der zu behandelnden Kubatur (2800 m^3 Festgestein) und des Porenwassers (Wärmeenthalpie und Verdampfungsenthalpie) werden hierzu berechnet. Die Erwärmung der Umgebung (Grundwasser, Atmosphäre, umliegender Boden) und die Energieentnahme über die aktive Bodenluftabsaugung ($800 \text{ m}^3/\text{h}$) sowie die Grundwasserförderung ($11 \text{ m}^3/\text{h}$) sind energienesenkend und werden über das DLI-Tool automatisch bestimmt und berücksichtigt. Das Berechnungsschema und die entsprechenden Formeln sind [14] zu entnehmen. In der Regel werden ca. 40–60 % der injizierten Energie über Wärmeleitung an die Umgebung abgegeben, ca. 10–15 % werden über die Bodenluftabsaugung entzogen und ca. 10–15 % über das geförderte Grundwasser abgeleitet. Nur ca. 10–15 % der gesamten injizierten Energie werden im Boden gespeichert.

- 46 In der ausgeführten Sanierung im Festgestein hat sich gezeigt, dass der „Verlustterm“ im Bereich von 45–50 % der eingesetzten Energiemenge liegt. Entsprechend verdoppelt bis verdreifacht sich der Zeitbedarf einer thermischen Sanierung im Vergleich zur verlustfreien Berechnung bei der angenommen wird, dass 100 % der Energie für Erwärmung des Untergrunds zur Verfügung steht.
- 47 Entsprechend der thermischen Reichweite wird der Abstand der Injektions- und Extraktionsbrunnen bei einer DLI gestaltet. Die Anordnung der Brunnen besteht zumeist aus zentral in Reihen angeordneten Injektionsbrunnen, die von Extraktionsbrunnen am Rand des Sanierungsbereichs umgeben sind. Sanierungsfelder mit einer Dimension größer als 2.000 m^3 Boden sollten zur Begrenzung der erforderlichen Wärmeleistung ($< 4.000 \text{ kg/h}$ Sattdampf, Kessel Kat. IV) derart angeordnet werden, dass eine Behandlung von Einzelfeldern möglich ist und sich Reihen von Injektionsbrunnen und Extraktionsbrunnen abwechseln [12, 13], s. Abb. 8.
- 48 Die Dauer der Sanierung hängt von Schadstoffmasse und Schadstoffaustrag ab. Dabei spielen der Stoffübergang und die thermische Desorption der Schadstoffe vom Boden oder Festgestein die zentrale Rolle. Die thermische Desorption sollte bei Anwendungen größer als 1.000 m^3 standortspezifisch bestimmt werden. Dies kann im Rahmen von Laborversuchen erfolgen. Im DLI-Tool werden zur Vordimensionierung der Ansatz eines konzentrationsabhängigen Dampfdrucks der Schadstoffe [18, 19] und einer Massenfracht entsprechend der injizierten Luftmenge gewählt [11]. Dieser berücksichtigt

die Desorptionsansätze nicht. Insofern werden die Sanierungszeiten je nach Standort zwischen 30–70 % unterschätzt (Biswurm [9] und Durlach [2]). Im Falle der Anwendung im Festgestein wurde die Sanierungsdauer um ca. 40 % unterschätzt, s. Kap. 4.1.

3 DLI im geklüfteten Festgestein

3.1 Ausgangslage

Auf dem Gelände des ehemaligen städtischen Verbrennungsplatzes in Villingen-Schwenningen (Gewann Biswurm) versickerten in den Jahren 1960 bis 1974 aus Lagerbecken Schadstoffe (vorwiegend CKW, BTEX) in das darunter liegende Klüftgestein und die Grundwasserleiter. Die Becken wurden zur Sammlung und Verbrennung von flüssigen und pastösen Produktionsrückständen aus der Metallverarbeitung und von anderen ortsansässigen Gewerbebetrieben, z. B. Inhalten von Öl- und Benzinabscheidern und verbrauchte Lösemittel, genutzt. Seit 1991 wurde diese „Altlast“ bearbeitet. Die verunreinigten tonigen Böden im Bereich der ehemaligen Verbrennungsbecken und Drainagen wurden im Sommer 2004 durch einen Bodenaustausch bis in den Verwitterungshorizont des Festgesteins (ca. 3 m Tiefe) saniert. Es wurden 7.100 t Boden ausgehoben und verwertet/entsorgt. Insgesamt konnten dadurch ca. 1.600 kg LHKW, 2.200 kg Kupfer, 40 kg Blei und 600 kg MKW entfernt werden. Zur Fassung der Bodenluft und Grundwasser- bzw. Sickerwasserförderung wurden eine Drainage, ca. 4,5 m u. GOK) und insgesamt 9 Sanierungs- und Überwachungsbrunnen zur Grundwasserförderung und Bodenluftabsaugung bis zu einer Tiefe von 37 m u. GOK (s. Abb. 7) errichtet. 49

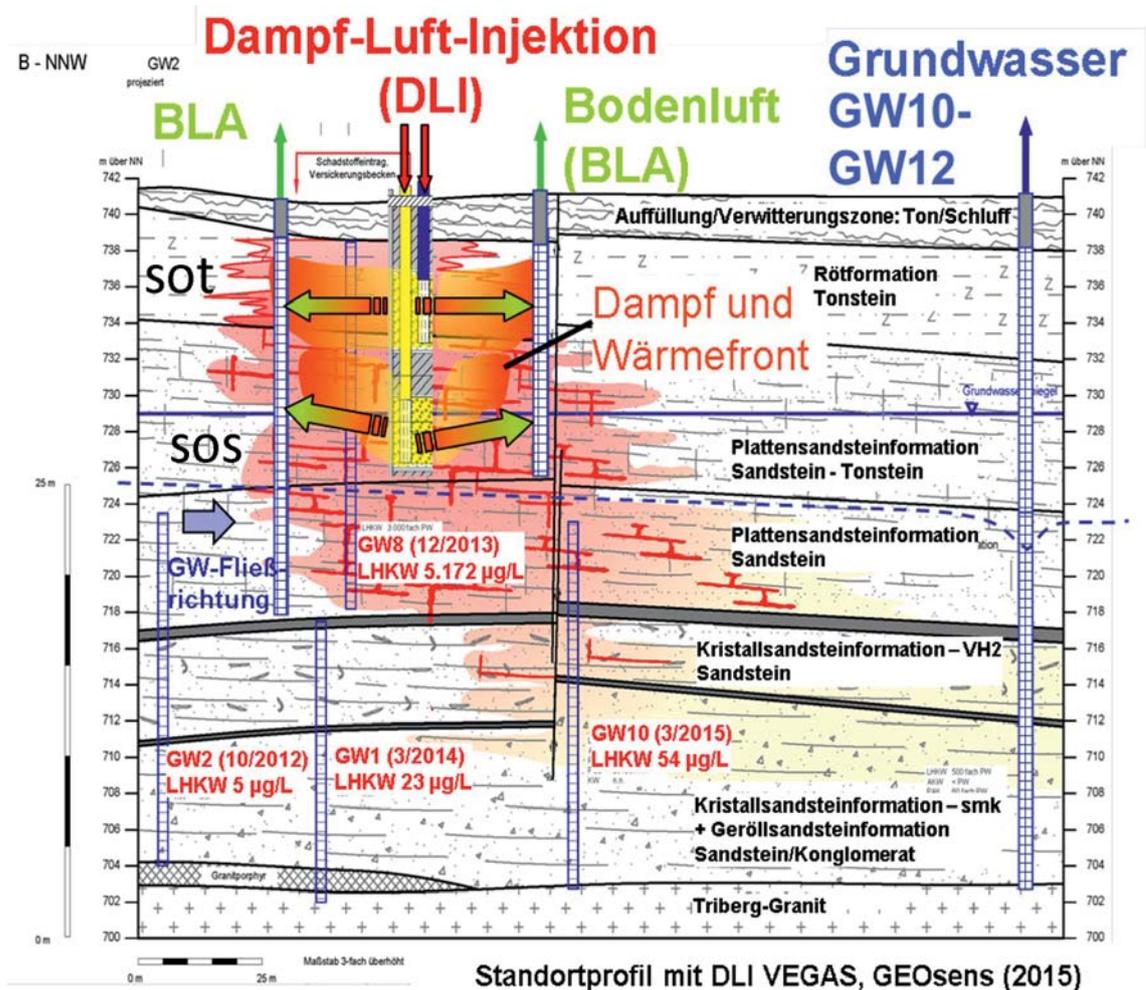
Unterhalb des Aushubs lag der Schadensherd in der ungesättigten Bodenzone des Ton- und Sandsteins bis 12 m u. GOK und dem darunter liegenden Grundwasserleiter der anstehenden Platten- und Kristallsandsteinlagen. Der Schadensherd umfasste eine Fläche von ca. 2.900 m² mit einer Tiefe von bis zu 37 m. Die abströmende Schadstofffahne erstreckte sich über mehrere Hektar. 50

Im Rahmen der Sanierungsuntersuchung wurde eine Gesamtmasse von mehr als 10 Tonnen LCKW im klüftigen Ton- und Sandstein und den Klüftgrundwasserleitern prognostiziert. Die LCKW-Gehalte im Grundwasser reichten von 1 mg/L in der gesättigten Zone bis zu 40 mg/L im Drainagesystem (6 m unter GOK). Im Schadenszentrum waren bis zu 4 g/m³ LCKW in der Bodenluft nachweisbar. Die Hauptmasse der Schadstoffe befand sich 51

Das DLI-Verfahren wurde erstmalig in geklüftetem Festgestein eingesetzt. Die Heizperiode der Dampf-Luft-Injektion dauerte 19 Wochen. Das Testfeld umfasste insgesamt 2.000 m³ Klüftgestein und erstreckte sich auf die ungesättigte Zone und den oberen Klüftgrundwasserleiter der Plattensandsteinformation, s. Abb. 7. Die thermische Reichweite, der Radius der Dampfausbreitung betrug 7,5 m in der Zielzone zwischen 3 -15 m u. GOK. Schadstoffe die in die Sandsteinmatrix eingedrungen waren wurden, während das Dampf-Luft-Gemisch in Klüften strömte durch die konduktiven Aufheizung des Festgesteins thermisch desorbiert. In der 3 Monaten dauernden Pilotsanierung wurde mehr als 91 % der gesamten extrahierten Masse (560 kg CKW) durch die Bodenluftabsaugung aus der Grundwasserschwankungszone und der ungesättigten Zonen entfernt. Über die Grundwasserförderung wurden weniger als 6 %, 34 kg CKW, entfernt. Die CKW-Werte in der Bodenluft und im Grundwasser wurden um 95 % bzw. 85 % verringert. 54

Im Vergleich zur Planung mit dem DLI-Tool mit 2,4 m Radius lag die thermische Reichweite während der Pilotanwendung bei 7,5 m. In der Frage der Wärmeleistung, der Aufheiz- und Schadstoffaustragsdauer stimmten Vorplanung und Pilotanwendung annähernd überein. Projektiert waren 130–180 Tage Dauer für den Schadstoffaustrag, nach rd. 140 Tagen DLI wurde die Pilotanwendung beendet. Einschließlich der Abkühldauer wurde die Pilotierung rd. 200 Tage betrieben. 55

56 Abb. 7: Standortprofil mit DLI



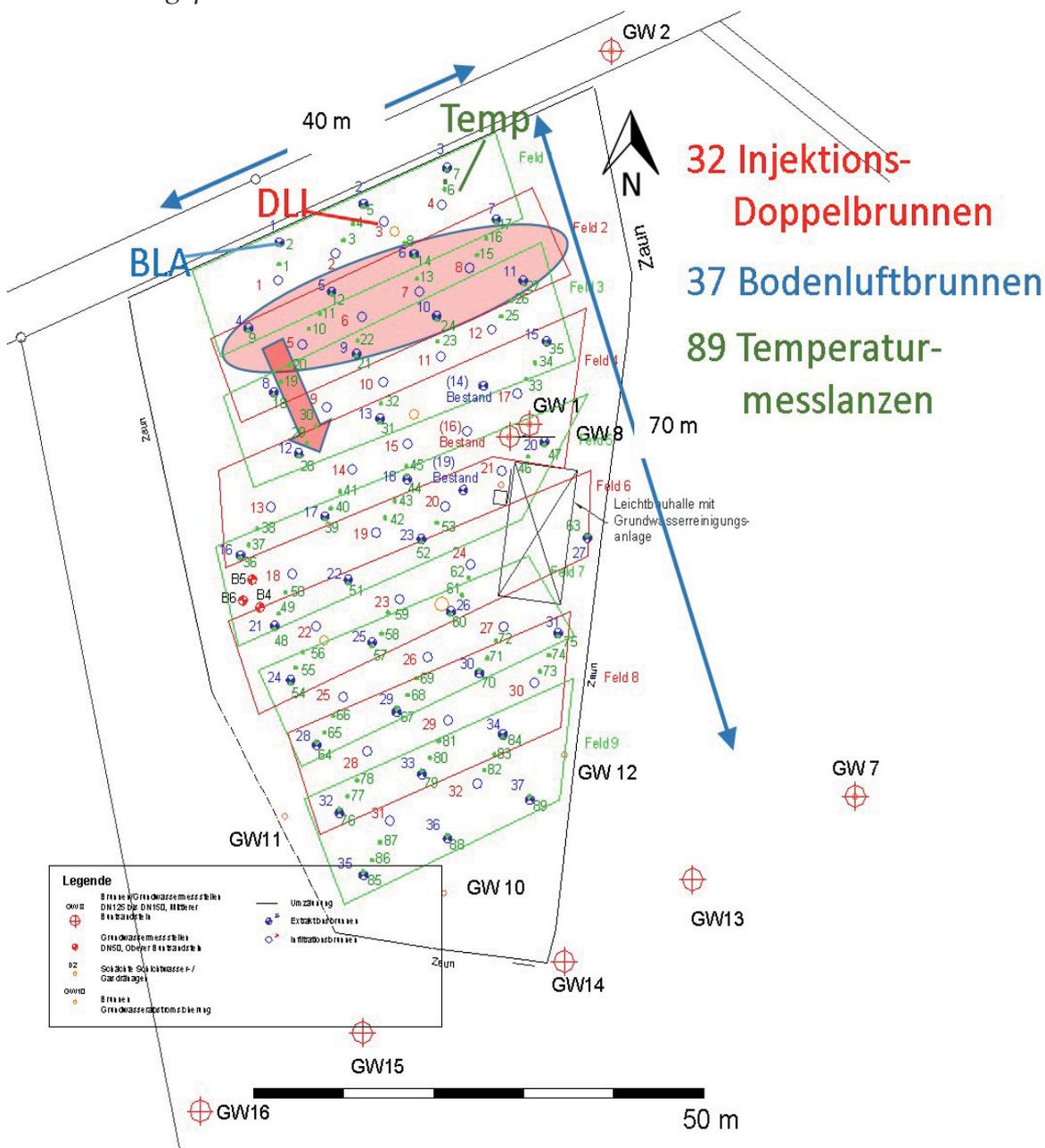
3.3 Sanierungskonzept

- 57 Basierend auf den Ergebnissen der Pilotstudie wurde die Gesamtsanierung für die ungesättigte Zone, die Grundwasserschwankungszone und den oberen Kluftaquifer am Standort (ca. 2.900 m², 15 m Mächtigkeit) ausgelegt und letztendlich nach öffentlicher Ausschreibung vergeben. Die wesentlichen Ergebnisse der Pilotanwendung, die thermische Reichweite, spezifische Heizdauer, die Wärmeleistung, Bodenluftabsaugrate und das Schadstoffaustragsverhalten wurden der Dimensionierung zu Grunde gelegt. Die Dauer der Sanierung und das Schadstoffaustragsverhalten wurden über das DLI-Tool berechnet. Die thermische Reichweite wurde entsprechend der Pilotanwendung auf 5 m Radius festgelegt.

Der Standort wurde in neun überlappende Abschnitte mit 600–800 m² Fläche unterteilt (Abb. 8). Je Abschnitt sind 5 bis 6 Injektionsbrunnen in zwei verschiedenen Tiefenbereichen verfiltert, um die Erwärmung im gesättigten und ungesättigten Festgestein steuern zu können. Um die Injektionsbrunnen sind 10 bis 12 Bodenluftabsaugbrunnen angeordnet. Insgesamt wurden 32 zweistufige Injektionsbrunnen und 37 Bodenluftabsaugbrunnen errichtet. Zur Erwärmung der einzelnen Abschnitte wurde das Dampf-Luft-Gemisch abschnittsweise in Grundwasserströmungsrichtung über die vier bis fünf Injektionsbrunnen injiziert.

Abb. 8: Lageplan DLI Biswurm

59



- 60 Je Feldabschnitt wurde eine Aufheizdauer von 6 Wochen mit rd. 650 kg/h Dampf-Luft (450 kW) und einer Austrags- oder Desorptionsdauer von 8 Wochen mit 500 kg/h Dampf-Luft (350 kW) angesetzt. Das DL-Gemisch wurde im Verhältnis von 2:1 in den oberen Aquiferbereich des Plattensandsteins (sos) zwischen 11–15 m u. GOK und in die ungesättigte Bodenzone (Ton- und Sandstein, sot) zwischen 4–8 m u. GOK eingeleitet, s. Abb. 7. Die Bodenluft sollte mit ca. 600 m³/h an mindestens 10–15 Absaugbrunnen betrieben werden. Die Brunnen sind zwischen 3–15 m verfiltert. Die Gesamtdauer der Dampf-Luft-Injektion (Dampf-injektionsleistung mit ca. 400 kW Wärmeleistung) wurde auf 33 Monate berechnet.
- 61 Der Standort wird durch den Betrieb von zwei Grundwasserbrunnen (GW11, GW12) im Plattensandstein (sos) und einem Brunnen (GW10), der auch den tiefliegenden Kristallsandstein (smk) erschließt, mit einer Förderate von 10–15 m³/h hydraulisch gesichert. Die erste Kontrollebene (GW13–16) liegt ca. 20 m, eine zweite Kontrollebene ca. 90–120 m südöstlich des Sanierungsfelds.
- 62 Die Kosten wurden mit 3,6 Mio. EUR brutto veranschlagt. Es sollten 43.500 m³ Kluftsandstein innerhalb eines 3-jährigen Einsatzes behandelt d. h. dekontaminiert werden. Die Dampf-Luft-Injektion begann im August 2012. Der Abschluss war auf Ende 2015 vorgesehen.

4 DLI Biswurm: Sanierungsablauf und Erfahrungen

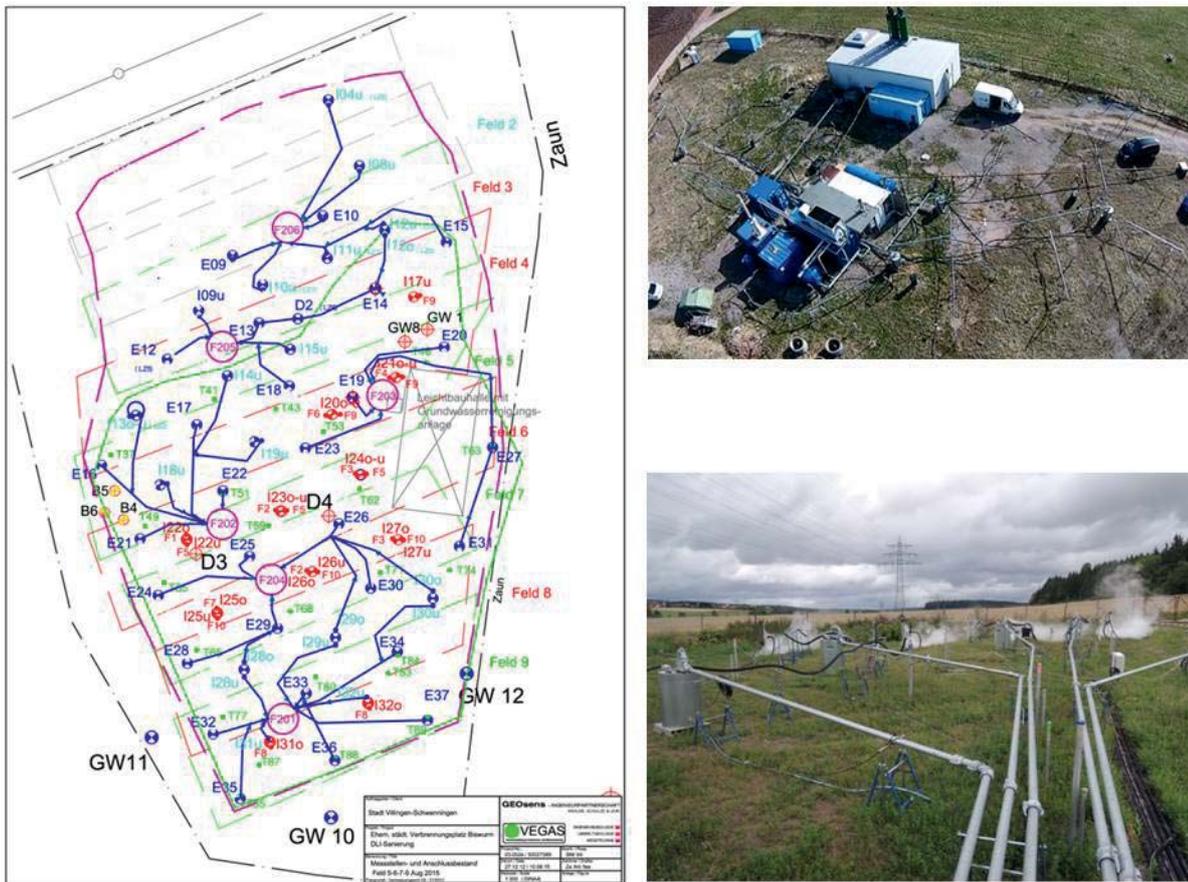
4.1 Anpassung des Sanierungsverlaufs

- 63 Die Dampfausbreitung und Aufheizung des Aquifers erfolgte wie berechnet und vergleichbar zur Pilotanwendung. An einigen Injektionsbrunnen war die Injektionsleistung aufgrund der schlechteren Anbindung an das Kluftsystem limitiert. Im Verlauf der Behandlung von Feld 2 wurde erstmals festgestellt, dass die Desorption der LCKW aus der Festgesteinsmatrix deutlich langsamer erfolgt und die Energie (Wärme) deutlich länger gespeichert wird als dies während der Pilotstudie festgestellt wurde. Während der Pilotanwendung wurde zunächst der gut desorbierbare, also der geringer in die Gesteinsmatrix permeierte Schadstoff desorbiert während bei längerer Anwendung Anteile aus der tieferen Gesteinsmatrix desorbiert werden. Jeder Feldabschnitt musste im Vergleich zur Pilotanwendung um einen Faktor 1,5–2 länger behandelt werden, um die Schadstoffe aus der Gesteinsmatrix zu desorbieren. Die gute Wärmespeicherung und die oftmals weitreichendere Dampf- und Wärmeausbreitung erlaubte die simultane Behandlung bzw. Dampfbeaufschlagung von 2 Feldabschnitten. Der spezi-

fische Zeitbedarf war ca. 35 % und damit verbunden der Energieverbrauch ca. 25 % höher als geplant. Um die thermisch mobilisierten, gasförmigen Schadstoffe vollständig im Kluffgestein zu erfassen, wurde die Größe der abgesaugten Fläche deutlich erhöht und gleichzeitig aus 3 bis 4 Abschnitten, zum Sanierungsende aus 8 Abschnitten, Bodenluft abgesaugt. Das BLA-System wurde im ersten Betriebsjahr erweitert, um so eine vollständige pneumatische Sicherung zu gewährleisten.

Abb. 9: Anschluss Sanierungsbrunnen 2016

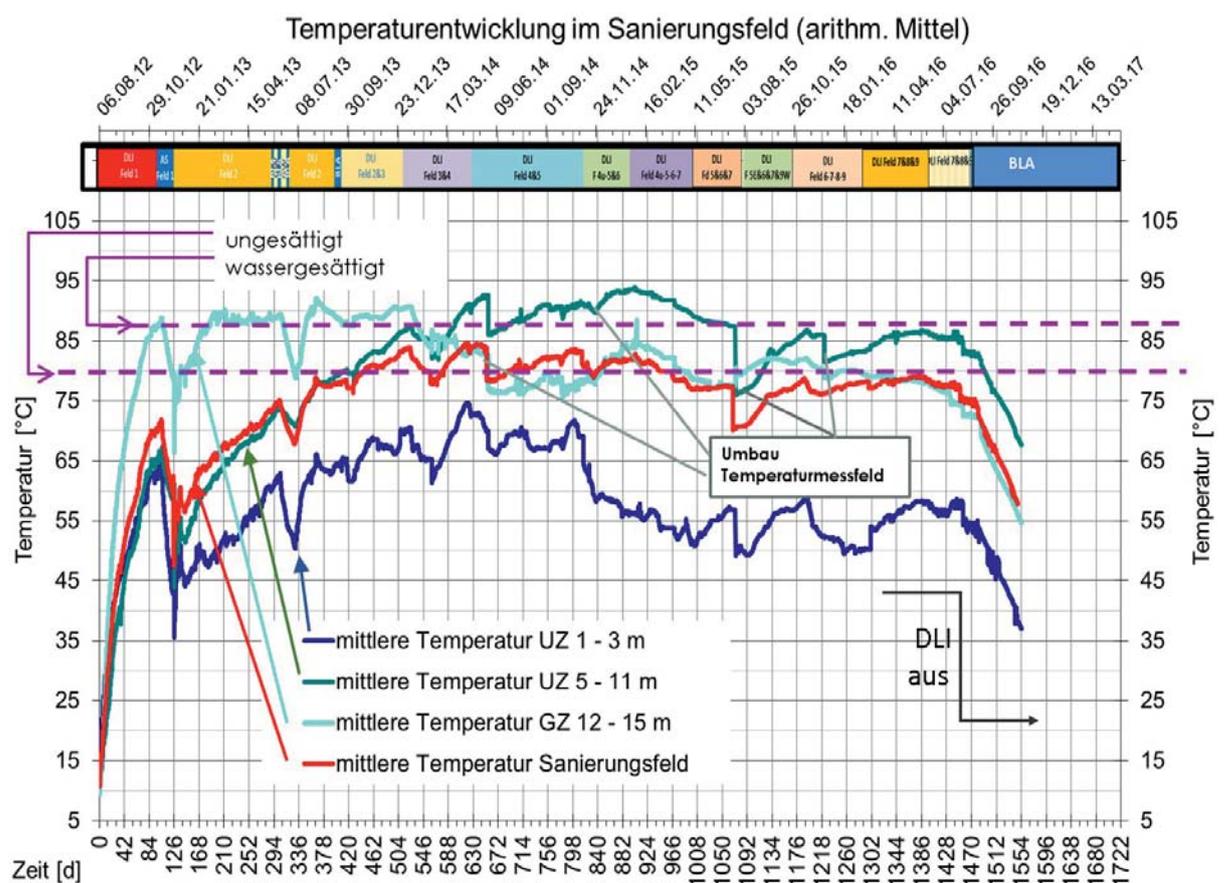
64



Während der Desorptionsphase lag die durchschnittliche Temperatur im Sanierungsbereich mit 5.000 bzw. am Ende 26.000 Tonnen Sandstein über 88 °C. Im Frühjahr 2015 wurde das Dampf-Luft-Gemisch bereits über 16 Injektionsbrunnen eingeleitet. Bis zu 800 m³/h Bodenluft wurde aus insgesamt 45 Brunnen abgesaugt, wobei die Anzahl der gleichzeitig abgesaugten Brunnen sukzessive erhöht wurde (Abb. 9, linker Teil). Dabei wurden auch die außer Betrieb genommenen Injektionsbrunnen der ersten Sanierungsabschnitte, wenn diese nicht mehr zur Injektion benötigt wurden, in die BLA integriert.

65

- 66 In der wassergesättigten Bodenzone (12–15 m u. GOK) wurde die Gemischsiedetemperatur von 88 °C bis ins Frühjahr 2014 überschritten (Abb. 10). Der obere Aquifer im Plattensandstein konnte im Verlauf der DLI im Jahre 2014 derart entwässert werden, dass die erforderliche Gemischsiedetemperatur rd. 80 °C betrug. Diese Temperatur wurde überschritten und somit eine dauerhafte Schadstoffverdampfung im Bereich oberhalb ca. 14 m u. GOK gewährleistet. Im mit Sickerwasser durchströmten oberen Ton- und Plattensandstein unter 3 m u. GOK lag die Bodentemperatur während der gesamten Anwendungsdauer oberhalb 80 °C, ab 2014 bei über 88 °C. Eine mittlere Feldtemperatur von 78–82 °C wurde durchgehend eingehalten. In Folge der simultanen Behandlung von 2–3 Sanierungsfeldern wurde der Energieeintrag auf bis zu 550 kW erhöht. Die volumenspezifische Energiemenge verringerte sich in Folge der größeren behandelten Einheit, so dass ca. 25 % mehr Energie als geplant benötigt wurde während die DLI 35 % länger betrieben wurde, s. Tab. 1.
- 67 **Abb. 10:** Temperaturentwicklung im jeweiligen Sanierungsbereich



Tab. 1: Vergleich der geplanten und realisierten Sanierungsstrategie

68

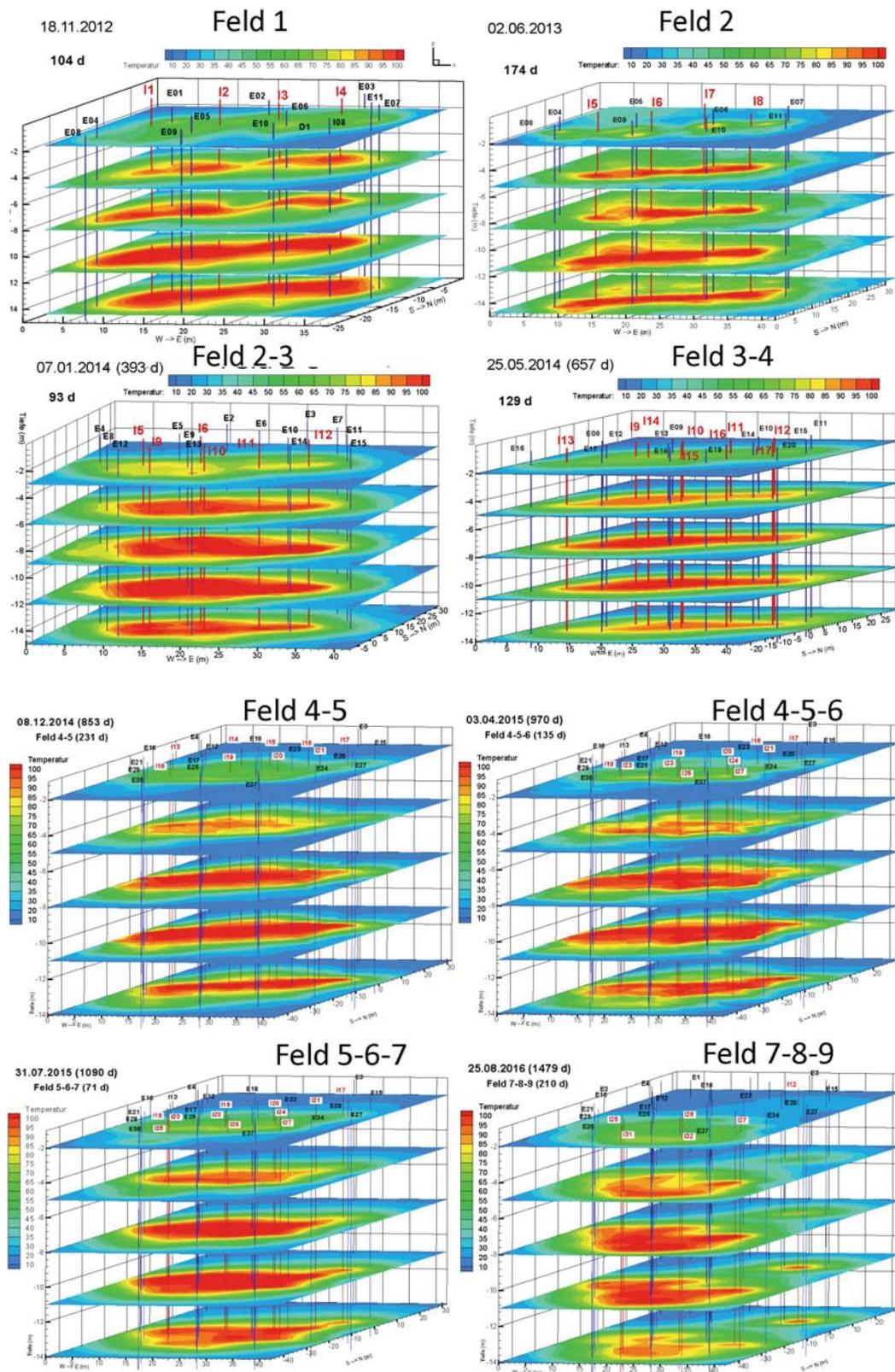
Sanierungskonzept (2010)	Sanierungsstrategie (2013–2016)
<ul style="list-style-type: none"> • 9 Abschnitte • Schrittweise Behandlung in 3-Monats-Abschnitten • 2 Injektionsebenen, 5 Brunnen • 450 ... 300 kW Injektionsleistung • Heizstrategie: 6 Wo Aufheizphase mit Dampfausbreitung + 8 Wochen Austrags- bzw. Desorptionsdauer <p>→ 1 Woche Kühlphase (nur BLA) nach jedem Feldabschnitt</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 9 Felder → überlappende Injektion in zwei bis drei Feldabschnitte • Stufenweise Behandlung von 2 Feldabschnitten mit 7 Monaten Behandlungsdauer je Feldabschnitt • 2 Injektionsebenen, 5–8 Brunnen → zwei Abschnitte • 550 ... 350 kW Leistung • Heizstrategie: 5 Wochen Aufheizung und Dampfausbreitung im Tonstein (sot mit 200 kW + 11–13 Wochen Austragsphase im Tonstein mit simultaner Aufheizung des Plattensandsteins (sos) mit 300 kW + 9 Wochen Austragsphase im sos mit 150 kW <p>→ mind. 6 Monate Abkühlphase</p>

4.2 Wärmeausbreitung

Die thermische Reichweite der Dampf-Luft-Injektion betrug 5–15 m Radius, in Abhängigkeit der lokalen Kluffstruktur um den jeweiligen Injektionsbrunnen. Die räumliche Darstellung (Abb. 11) illustriert die zunehmende Größe des erwärmten Festgesteins mit fortschreitender Sanierungsdauer bzw. Anzahl der betriebenen Injektionsbrunnen. Mehr als 15 Monate wurden die Felder 5–7 mit der DLI beaufschlagt. Aus diesem Bereich konnten ca. 3 Tonnen LCKW entfernt werden.

69

Abb. 11: Wärmeausbreitung Feld 1–Feld

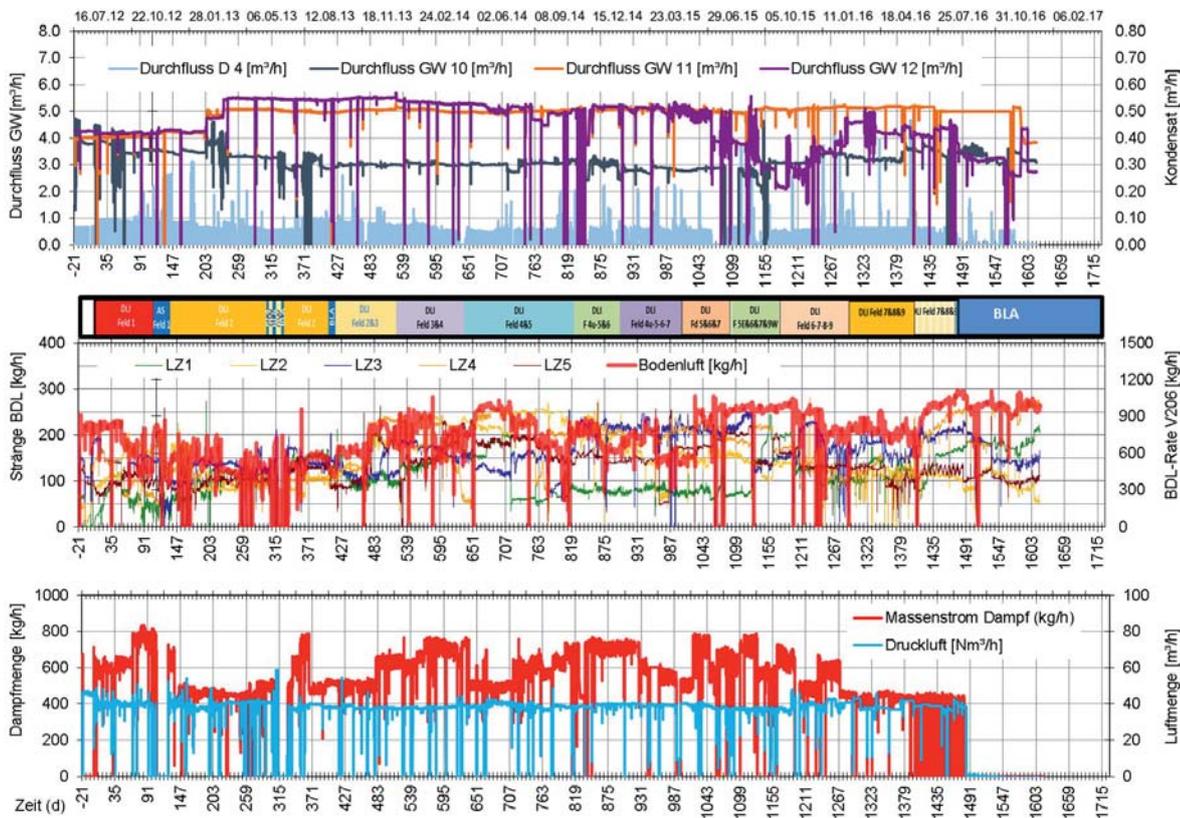


4.3 Betrieb der Sanierung

Die geforderte Anlagenverfügbarkeit von mehr als 95 % wurde nach anfänglichen Problemen zu Beginn der Sanierung seit Ende 2014 durchgängig gewährleistet (s. Abb. 12). Die Verfügbarkeit der DLI lag bei 98 %, die der Grundwassersicherung bei 99 %. Die Bodenluftabsaugung wurde zu 98 % betrieben. Die mittleren Frachten lagen bei 11 m³/h Grundwasser, 800–1.000 kg/h Bodenluft und 600–700 kg/h Dampf-Luft-Gemisch.

Abb. 12: Massenströme Grundwasser, Bodenluft, Dampf-Luft

71



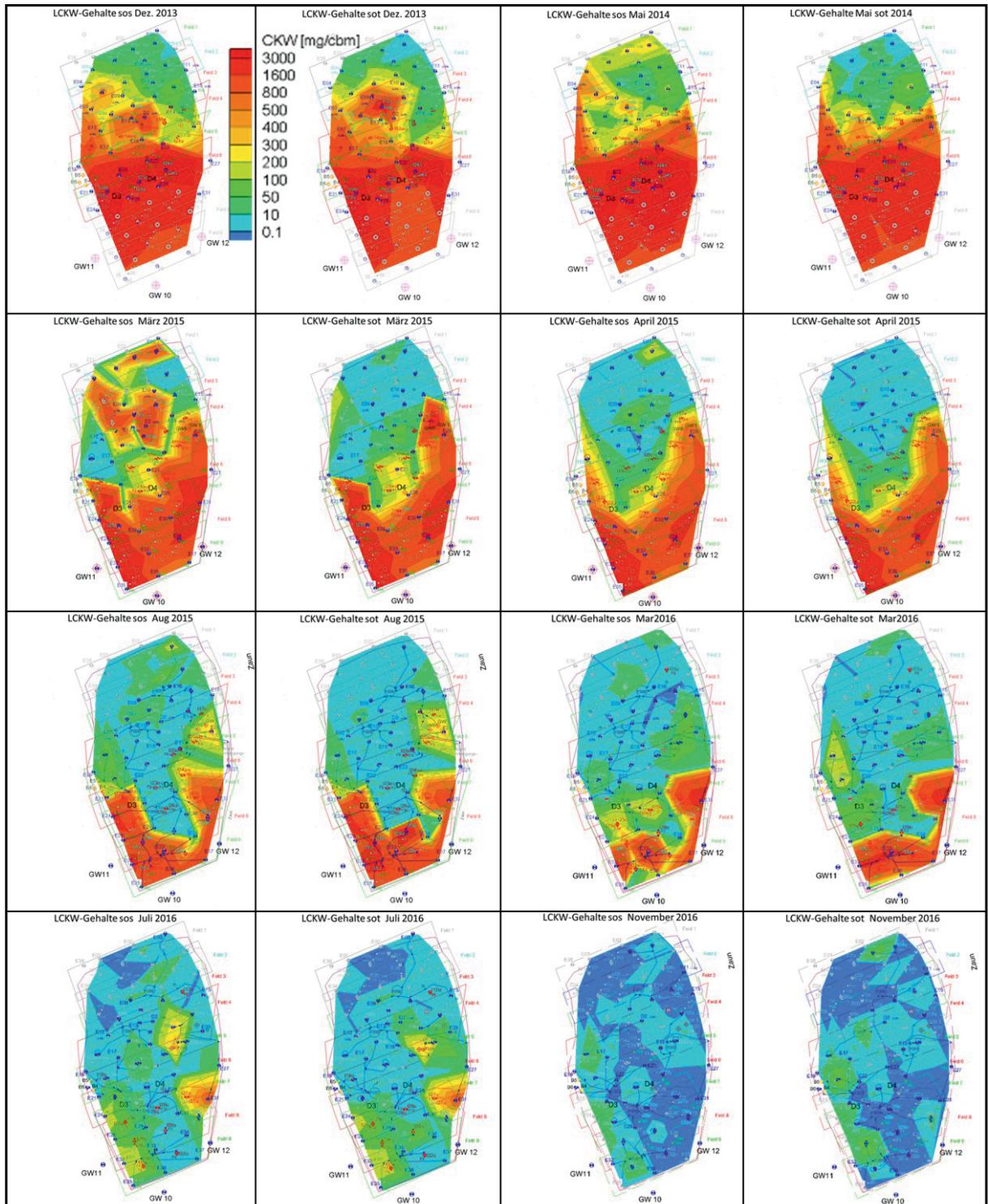
In Folge des kontinuierlichen, stabilen Betriebs und der weitreichenden Erfassung der Klüfte durch die Bodenluftabsaugung konnte ein konstanter Schadstoffaustrag mit einem Basisniveau von ca. 2 kg/d LCKW erreicht werden. Die Austragsrate stieg bis auf 10 kg/d mit Beginn der DLI in ein neues Behandlungsfeld. Die hohen Austräge wurden in der Regel 2–3 Monate mit langsam abflachendem Austrag gehalten (s. Abb. 13). Das klassische, während der Pilotanwendung über die Dauer von 3 Monaten erzielte Austragsverhalten mit einem starken Anstieg des Austrags während der Aufheizphase, einer Verdampfungsphase auf hohem Niveau über 8 Wochen

72

Im monatlichen Turnus wurde die Bodenluft im gesamten Sanierungsgebiet beprobt. Die ermittelten LCKW-Gehalte zeigen den Sanierungsfortschritt von Nord nach Süd (Abb. 14). Der Zielwert von $< 50 \text{ mg/m}^3$ in der Bodenluft ist in grüner Farbe dargestellt. Die kritisch hohen Konzentrationen im Schadenszentrum mit $> 800 \text{ mg/m}^3$ LCKW sind in roter Farbe dargestellt. In 2014/2015 wurden die Felder 1 bis 5 mit Dampf-Luft beaufschlagt, danach wurde im 6-monatigen Wechsel die Dampf-Luft-Injektion auf die Felder 6 bis 9 ausgedehnt. Ab März 2016 wurden Feld 8 und 9 behandelt und im August 2016 die DLI beendet. 76

Ein Einfluss der Klüfte auf die Schadstoffausbreitung im bereits behandelten und noch warmen Plattensandstein ($40\text{--}60 \text{ }^\circ\text{C}$) im Norden (März 2015, Abb. 14) durch den injizierten Dampf führte zum Betrieb ausgewählter Brunnen mit einer hohen Absaugrate in Feld 3 und 4. Die Absaugrate wurde zur Erfassung der Klüfte auf 400 kg/h erhöht. Die Ausbreitung der verdampften, gasförmigen Schadstoffe in den Klüften nach Norden konnte durch die „pneumatische Barriere“ verhindert werden. 77

78 Abb. 14: Räumliche LCKW-Verteilung in der Bodenluft



79 Das monatlich durchgeführte tiefenspezifische Monitoring der BLA-Brunnen zeigte eine fast vollständige Entfernung der Kontaminationen von den oberen Sandstein- und Tonsteinschichten zwischen 3–8 m u. GOK. Die Wer-

te liegen zum Großteil unter 10 mg/m^3 CKW. In einigen Bereichen des unteren Plattensandsteins wurden nach der Wärmebehandlung vereinzelt Gehalte bis 100 mg/m^3 LCKW festgestellt (Juli 2016). Im Mittel lagen die LCKW-Gehalte der Bodenluft unter 20 mg/m^3 vor dem Ausschalten der DLI.

4.5 Sanierungsabschluss

Die Dampf-Luft-Injektion wurde Ende August 2016 abgeschaltet. Die Bodenluftabsaugung und die Grundwassersicherung zur Abkühlung wurden weiter betrieben. Der Aquifer wird im März 2017 auf unter $40 \text{ }^\circ\text{C}$ abgekühlt sein und die Abkühlphase kann aus sanierungsrelevanter Sicht als abgeschlossen betrachtet werden. Die Sanierung wird dann durch Abschaltung der BLA offiziell beendet. Bis zum Jahresende 2016 wurden 4.820 kg LCKW über die Bodenluftabsaugung und rd. 160 kg LCKW über das Grundwasser entfernt. Eingeschlossen der Pilotanwendung und den geringen Restausträgen bis März 2017 werden rd. 5.600 kg LCKW über die DLI aus dem geklüfteten Sandstein entfernt worden sein. 80

Vor Beginn der laufenden thermischen In-situ-Sanierung bewegten sich die Schadstoffwerte in der Fahne zwischen 200 bis $300 \text{ } \mu\text{g/L}$, die LCKW-Emission lag bei 300 – 400 g/d (Dezember 2012: 405 g/d). Das Ziel der Sanierung war eine maximale LCKW-Emission von weniger als 20 g/Tag zu erreichen. Seit September 2016 liegt die Emission unter 10 g/d LCKW und die Gehalte im Grundwasser unter $30 \text{ } \mu\text{g/L}$ in der Grundwasserentnahme und unter $20 \text{ } \mu\text{g/L}$ auf der ersten Kontrollebene (GW7–GW13, s. Abb. 8). 81

5 Lessons Learned

5.1 Konsequenzen aus dem Sanierungsverlauf auf zukünftige thermischen Sanierungen im Kluffgestein

Die Sanierungsplanung basierte auf der Annahme, dass sich der feingeklüftete Sandstein ähnlich einem Porengrundwasserleiter verhält. Dieser „theoretische“ Ansatz wurde in einer Pilotanwendung überprüft. Die thermische Reichweite konnte mit bis zu $7,5 \text{ m}$ Radius bestimmt werden, dreimal so groß wie theoretisch mit $2,5 \text{ m}$ berechnet. Während der späteren Gesamt-sanierung wurden Reichweiten von 5 – 10 m bestimmt. Hinsichtlich der Erwärmung des Festgesteins wurde der theoretische Ansatz während der Pilotanwendung und der vierjährigen Sanierung bestätigt. 82

- 83 Der Schadstoffaustrag bei der Gesamtsanierung gestaltete sich in der Form ähnlich der Pilotanwendung, dauerte jedoch je Sanierungsfeld $2,5\text{--}3 \times$ länger. Zudem konnte eine Schadstoffverfrachtung in bereits sanierte Bereiche festgestellt werden (s. Abb. 14). Die Ursache lag in einer bevorzugten Dampfausbreitung in vernetzten größeren Klüften. Da die Kluftabstände im Dezimeter- bis Meter-Bereich liegen, können sie nicht durch Untersuchungen im Zuge der Standorterkundung ermittelt werden. Bereits nach 6 Monaten Betrieb musste daher die Absaugleistung deutlich erhöht werden, wodurch eine entsprechende Schadstoffabsaugung aus diesen Bereichen gewährleistet werden konnte. Zum Ende der Sanierung wurde die Absaugung auf alle Felder ausgedehnt (Abb. 9). Der Faktor 2–3 im Austragszeitverhalten konnte durch eine Vergrößerung der DLI bis auf drei simultan behandelte Felder zum Großteil kompensiert werden. Die Gewährleistung eines entsprechend hohen Unterdrucks an den Absaugbrunnen verhinderte eine Rückverfrachtung in bereits sanierte Bereiche. Gleichzeitig wurde dadurch das Kondensat in den Absaugleitungen abgesaugt. An Stelle der geplanten 33 Monate dauerte die DLI jedoch 48 Monate.
- 84 Eine monatliche Überwachung der Konzentrationsentwicklung an den Absaugbrunnen hat sich als probates Mittel erwiesen, die Absaugleistung und den Schadstoffaustrag zu optimieren. Wichtig ist hierbei an allen Brunnen einen hohen Unterdruck von mindestens 50 mbar zu erreichen, damit das anfallende Kondensat nicht die Luftleistung in den Absaugrohren limitiert. In Folge der hohen Wärmespeicherung wurden Schadstoffe selbst Monate nach Abschalten der DLI im jeweiligen Feld weiter verdampft. Die Beurteilung, wann auf das nachfolgende Feld umgestellt wird erfolgte anhand dem typisierten Austragsverhalten: gering \rightarrow steil steigend \rightarrow über Monate konstant \rightarrow fallend \rightarrow konstant (s. Abb. 13) und nicht ausschließlich anhand der gemessenen Schadstoffkonzentration in der Abluft der jeweiligen Absaugbrunnen.
- 85 Die Überwachung des Schadstoffaustrags und der Sanierungsanlage gestaltete sich aufwändiger als vorhergesehen. Zur Gewährleistung der erforderlich hohen Verfügbarkeit von $> 95 \%$, es wurden 98 % erzielt, war eine Kontrolle der Sanierungsanlage $3 \times$ wöchentlich erforderlich. Die Sanierungs- und Anlagendaten und die Temperaturen wurden mindestens $2 \times$ wöchentlich kontrolliert. Das installierte Fernüberwachungssystem mit zentraler Datenspeicherung beim betreuenden Ingenieurbüro hat sich bestens bewährt und war ein wichtiger Garant für eine effektive und zeitnahe Steuerung und Anpassung der Sanierung an die jeweiligen, aktuellen Verhältnisse.

Die verlängerte Betriebszeit von ca. 30 % führte zu einem Kostenanstieg von gleichfalls 30–35 %. Insofern wird dringend angeraten, auch bei Anwendungen, die bestens untersucht und geplant sind, einen Kostenpuffer von 30 % in die Projektkalkulation einzubeziehen. 86

5.2 Sanierungskosten

Nach derzeitigem Stand werden voraussichtlich 4,4 Mio. EUR brutto für die Gesamtsanierung mit DLI ausgegeben (Abb. 15). Für den Betrieb inkl. Energiekosten wurden ca. 60 % (2,62 Mio. EUR) der Gesamtsumme aufgewendet. Ca. 22 % (0,98 Mio. EUR) waren für die Infrastruktur, den Brunnen- und Anlagenbau erforderlich und ca. 14 % (rund 0,6 Mio. EUR) entfielen auf die Ingenieurkosten und die Analytik. Für die 2-jährige Nachsorgezeit werden derzeit rund 180.000 EUR angesetzt (Abb. 15 unten). Nach der Vergabe im Jahr 2012 lagen die Projektkosten bei 3,5 Mio. brutto. Die verlängerte Betriebszeit führte zu einem Anstieg der Sanierungskosten um 28 % von 3,3 auf 4,2 Mio. EUR. Die Anpassung der Sanierungsstrategie erforderte zusätzliches Material in Höhe von rund 165.000 EUR; dies ist eine Massenerhöhung von 15% der kalkulierten Anlagenbetriebskosten von 1.1 Mio. EUR. Die Ingenieur- und Analysenkosten stiegen um rund 110.000 EUR (ca. 20 % der kalkulierten Kosten) und die Kosten für die Energie um 300.000 EUR (19 % der kalkulierten Kosten von 1,6 Mio. EUR). 87

Vergleicht man die Kosten der DLI mit der zum Grundwasserschutz betriebenen Grundwassersanierung, so werden deutlich geringere Kosten für die DLI zur Entfernung derselben Schadstoffmenge erzielt, s. Tabelle 2. Die prognostizierte Grundwassersanierung hat eine Laufzeit von über 84 Jahren, um die gleiche Sanierungsleistung zu erreichen wie die DLI-Sanierung. Bei der DLI waren dies 5 Jahre. Unter der Annahme, dass die pump&treat-Maßnahme 80 Jahre gedauert hätte, wären Kosten von ca. 7,6 Mio. EUR brutto aufzuwenden gewesen (ca. 90.000 EUR pro a). Damit wäre der Betrieb einer pump&treat-Maßnahme ca. 3,2 Mio. EUR teurer geworden als die durchgeführte DLI-Sanierung. 88

89 **Abb. 15:** Kostenverteilung: Gesamtkosten, Infrastruktur, Betriebskosten und Nachsanierung

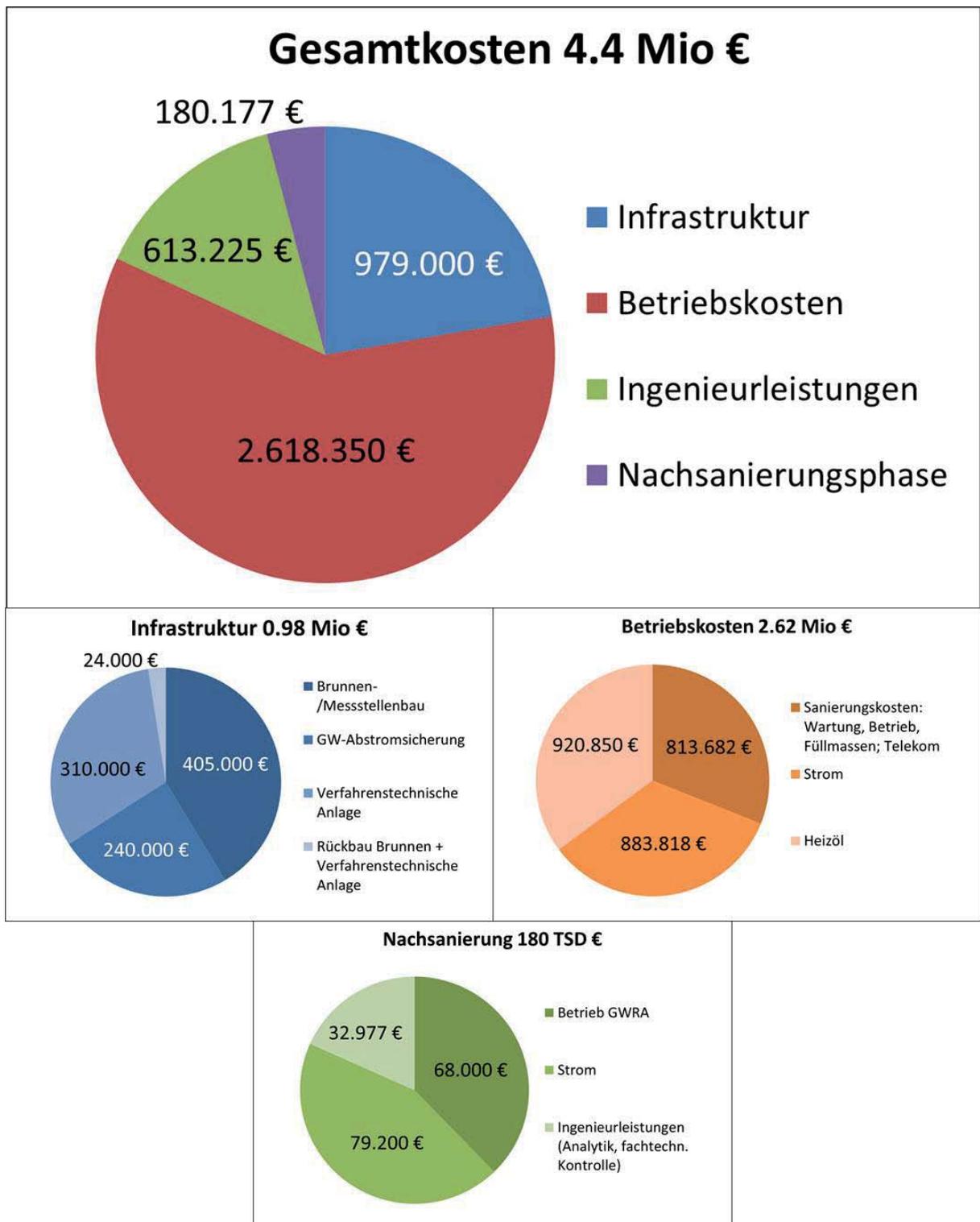


Tabelle 2: Kostenvergleich DLI und GW-Sanierung in Biswurm

90

		DLI	GW-Sanierung
Volumenstrom [m ³ /h]	Grundwasser	15	15
	Bodenluft	500–800	–
LCKW-Austrag [kg/d]	Grundwasser	0,1	0,2
	Bodenluft	ca. 3–4	–
Sanierungsleistung [to/Jahr]		ca. 1–1,5	<0,1
Sanierungskosten [EUR] brutto		4,4 Mio. (5 Jahre)	7,6 Mio. (80 Jahre)

6 Beteiligte und Finanzierung

Die Umweltbehörde von Baden-Württemberg (LUBW), das Regierungspräsidium Freiburg und die Stadt Villingen-Schwenningen unterstützen die Anwendung der thermischen In-situ-Sanierung des Standorts durch Dampf-Luft-Injektion. Das Pilotprojekt wurde mit finanzieller Unterstützung des Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, UFZ, Leipzig, der Gemeinde Villingen-Schwenningen und des Regierungspräsidiums und dem Land Baden-Württemberg durchgeführt. Die Sanierung wird finanziert von der Stadt Villingen-Schwenningen und dem Altlastenfond des Landes Baden-Württemberg. Das Ingenieurbüro GEOSens betreute für den Auftraggeber bereits die Pilotstudie und betreut auch die Sanierung. Die wissenschaftliche Betreuung für das Pilotprojekt und die Sanierung liegt in der Verantwortung von VEGAS. Ausführende Sanierungsfirma ist die Bauer Umwelt GmbH.

7 Schlussfolgerungen und generelle Empfehlungen zum Einsatz

Die Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten, die Verfahrensauswahl und die Auslegung eines möglichen Einsatzes einer thermischen In-situ-Sanierung mit DLI erfordern einerseits detaillierte Standortkenntnisse aber andererseits auch eine entsprechend hohe Sachkenntnis und Erfahrung des Planers bzw. des Gutachters. Nicht unerwähnt bleiben darf, dass die Verfahren mit hohem Überwachungs- und Steuerungsaufwand und mit entsprechendem Personaleinsatz verbunden sind.

- 93 Erfahrungen in den letzten Jahren bei mehreren „thermischen“ Projekten und insbesondere bei der Sanierung in Biswurm, haben auch gezeigt, dass zwischen den an einer Sanierung Beteiligten (Sanierungspflichtiger/Geldgeber, Sanierungsfirma, Gutachter und Behörden) eine offene und zeitnahe Kommunikation erforderlich ist, um z. B. während der Sanierung auf untergrund- oder anlagenbedingte Änderungen und Anpassungen kurzfristig und flexibel reagieren zu können. Hierzu müssen die Entscheidungsträger eingebunden sein. Am Standort Biswurm war dies vorbildlich und stets gegeben und ein wichtiger Schlüssel zum Erfolg.
- 94 Insgesamt kann festgehalten werden:
- Die Dimensionierung einer Dampf-Luft-Injektion entsprechend dem Stand der Technik im Rahmen der Sanierungsplanung ist möglich, jedoch ist das fachliche Knowhow bei den Planern noch nicht weit verbreitet.
 - Ein Dimensionierungstool zur Auslegung einer thermischen In-situ-Sanierung mit DLI steht auf der Homepage von TASK kostenlos zur Verfügung (DLI-Tool).
 - Eine vollständige und nachhaltige Sanierung von Schadensherden innerhalb definierten und bestimmbarer Zeiträumen (mit gewissen Bandbreiten) ist möglich.
 - Eine thermische In-situ-Sanierung erfordert eine intensive Sanierungsbegleitung und -steuerung (Online-Datenerfassung, Anlagensteuerung).
 - Einsatzbereiche und Anwendungsgrenzen werden ständig „erweitert“ bzw. „ausgereizt“, zum Teil über Pilotanwendungen.
 - Der Einsatz im Kluftgestein ist erfolgreich möglich.
 - Der Standort Biswurm ergab hierzu wertvolle neue Erkenntnisse und Erfahrungen („Lessons learned“).
 - Die bisherige Entwicklung der thermischen Verfahren war/ist nur möglich durch zahlreiche Beteiligte und entsprechende Geldgeber die manchmal auch bereit sind, neue Wege zu gehen und flexibel und rasch auf nicht ausbleibende „Überraschungen“ zu reagieren.
- 95 Mit Blick auf die Anwendung von thermischen In-situ-Verfahren bleibt festzustellen: bei sorgfältiger und sachkundiger Anwendung können mit Hilfe von thermischen In-situ-Verfahren (TIS) manche bisher als „unsanierbar“ geltende Schadensherde beseitigt werden. Thermische In-situ-Sanierungsverfahren sind aber wie andere Verfahren auch, nicht universell anwendbar und es gibt viele Standorte, an denen sie auf Grund verschiedenster Rand-

bedingungen (z. B. wärmeempfindliche Infrastruktur im Untergrund, hohe Torfanteile im Boden, setzungsempfindliche Böden) nicht eingesetzt werden können. Insgesamt gesehen können TIS einen wertvollen und wichtigen Beitrag bei der Sanierung von Boden- und Grundwasserkontaminationen leisten.

8 Literatur

- [1] Trötschler, O., Koschitzky, H.-P., Ochs, S. O., Denzel, S., Stöckl, K. (2006): Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone: Pilotanwendung zur Sanierungsplanung an einem innerstädtischen Standort im Rheintal. Tagungsband, VEGAS-Statuskolloquium 2006 (28.–28. September 2006, Stuttgart), Editor: Braun, J.; Koschitzky, H.-P. & M. Stuhmann, Eigenverlag, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 9/2006.–Nr.: 150–Seiten: 60–70–ISBN: 3–933761–53–0
- [2] Trötschler O., Koschitzky H.-P., (2011): Thermische In-situ-Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion des CKW-Schadensfalls ehemalige chemische Reinigung Roth in Karlsruhe Durlach–Abschlussbericht, Technischer Bericht Nr. 2011/08 (VEG 47), Stuttgart: Institut für Wasserbau
- [3] Koschitzky, H.-P., Trötschler, O., Limburg, B., Hirsch, M. Weiß, H. (2007): Pilotanwendung DLI Zeitz: Erste Ergebnisse der thermischen Sanierung des Kernbereichs eines Benzolschadens mittels Dampf-Luft-Injektion. Tagungsband, VEGAS-Kolloquium 2007, Editor: Braun, J.; Koschitzky, H.-P. & M. Stuhmann, Eigenverlag, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 9/2007.–Mitteilungen Nr.: 165–Seiten: 52–63–ISBN: 3–933761–69–7
- [4] Trötschler, O., Koschitzky, H.-P. (2008): Thermische In-situ-Pilotsanierung ehemaliges Hydrierwerk Zeitz (Testfeld I)–Inbetriebnahme, Probebetrieb und Betriebsoptimierung der „Mobilen thermischen In-situ-Sanierungsanlage in modularer Bauweise (MOSAM)“ im Rahmen der Pilotsanierung in Zeitz (Testfeld I). Technischer Bericht Nr. 2008/06 (VEG 30), VEGAS Universität Stuttgart, 25.04.2008
- [5] Trötschler, O., Feuring, T., Koschitzky, H.-P. (2013): Untersuchungen zum Einsatz von DLI am Standort „Automobilzulieferer“–Bodenluftabsaugversuch-, Technischer Bericht Nr. 2013/02 (VEG 57), Stuttgart: Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung
- [6] Trötschler, O., Testoni, F., Koschitzky, H.-P. (2013): Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone zur thermischen In-situ-Sanierung des LHKW-Schadensfalls „Parkhaus 301“–Abschlussbericht –, Techni-

- scher Bericht Nr. 2013/10 (VEG 60), Stuttgart: Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung
- [7] Trötschler, O., Testoni, F., Koschitzky, H.-P. (2013): Piloteinsatz der „Mobilen thermischen In-situ-Sanierungsanlage in modularer Bauweise (MOSAM) im Rahmen der Sanierungsplanung „Eppsteiner Straße 13“ in Oberursel (Hessen), Abschlussbericht, Technischer Bericht Nr. 2013/09 (VEG 59), Stuttgart: Stuttgart: Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung
- [8] Trötschler, O., Koschitzky, H.-P. (2009). Pilotanwendung des In-Situ-Sanierungsverfahrens „Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone (DLI)“ zur Bestimmung der thermischen Reichweite und der Sanierungsleistung am Standort „Biswurm“ in Villingen, Schwarzwald-Baar-Kreis. Technischer Bericht Nr. 2009/13 (VEG 41), Stuttgart: Institut für Wasserbau, Auftraggeber: Auftraggeber: Helmholtz Zentrum für Umweltforschung GmbH –UFZ Leipzig und Stadtbauamt Villingen-Schwenningen
- [9] Trötschler, O. Koschitzky, H.-P., Lidola, B.; Kleeberg, I., Schulze, S: (2015): Thermische In-situ-Sanierung im Kluftgestein: „Lessons learned“ von der Planung bis zur Sanierungsrealität am Standort „Biswurm. Symposium Strategien zur Boden- und Grundwassersanierung DECHEMA, Frankfurt a. M., 30.11.2015
- [10] Informationsquelle: <http://www.task-leipzig.info>: Weiterführend: „Aktivitäten & Portfolio“ Thermische Sanierungsverfahren
- [11] Trötschler, O., Koschitzky, H.-P. (2012): DLI-Tool zur Dimensionierung einer thermischen In-situ-Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion (DLI), Vorstellung anlässlich der TASK Praxistage 2012, Workshop TisS, 18.09.2012, UFZ Leipzig
- [12] Schmidt, R., Färber, A., Betz, Ch., Koschitzky, H.-P. 2000: Dampfinjektion zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone, Handbuch der Altlastensanierung 2000, C. F. Müller Verlag
- [13] Färber, A.: Wärmetransport in der ungesättigten Bodenzone: Entwicklung einer thermischen In-situ Sanierungstechnologie, Mitteilungsheft Nr. 96, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Diss., 1997, ISBN 3-921694-96-5
- [14] Koschitzky, H.-P., Trötschler, O. (2008). Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung, Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement, 55. Aktualisierung, 3. Aufl., Mai 2008, Franzius, Altenbockum, Gerhold

- (Hrsg.), C. F. Müller Verlagsgruppe, München, 5716, pp. 1–47, Grundwerk ISBN 978–3–8114–9700–9
- [15] Ochs, S. O. (2006): Steam injection into saturated porous media–process analysis including experimental and numerical investigations, Mitteilungen Heft 159, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, ISBN 3–933761–63–8
- [16] Schmidt, R. (2001): Wasserdampf- und Heißluftinjektion zur thermischen Sanierung kontaminierter Standorte. Mitteilungsheft Nr. 106, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Diss., 2001, ISBN 3–933761–09–3
- [17] Reid, R. C., Prausnitz, J. M., Poling, B. E.: The Properties of Gases and Liquids. McGraw-Hill, Inc., 1987]
- [18] BUVAL (1998): Arbeitshilfe Probenahme und Analyse von Bodenluft, www.umweltschutzschweiz.ch/publikationen, Code: Vu-3403-D
- [19] Reisinger, C., Grathwohl, P. (1996): Formulierung einer Verfahrensempfehlung zur Bestimmung der Emission leichtflüchtiger organischer Schadstoffe (LCKW, BTEX etc.) aus kontaminierten Böden (Berechnungsverfahren und Methoden.)