

Damit der Umgang mit Altlasten nicht zur dauerhaften Belastung wird.

Testen Sie jetzt das Online-Produkt
4 Wochen kostenlos!

**Die einzigartige und generationsübergreifende
Wissensammlung im Bereich von Altlasten-
sanierung und Flächenrecycling in einer
Online-Lösung:**

- Im Mittelpunkt des Werks stehen über 100 Praxisbeispiele aus mehr als 30 Jahren Altlastensanierungsgeschichte.
- Es werden verschiedene im Laufe der Zeit eingesetzte Methoden von der Sicherung bis zur Dekontamination von belasteten Böden, Bodenluft und Grundwasser behandelt.
- Rechtliche Grundlagen insbesondere des Bodenschutzes und der Altlastensanierung sowie ausgewählte Rechtsprechung runden das Werk ab.



Franzius/Altenbockum/Gerhold (Hrsg.)

Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement

Online-Produkt

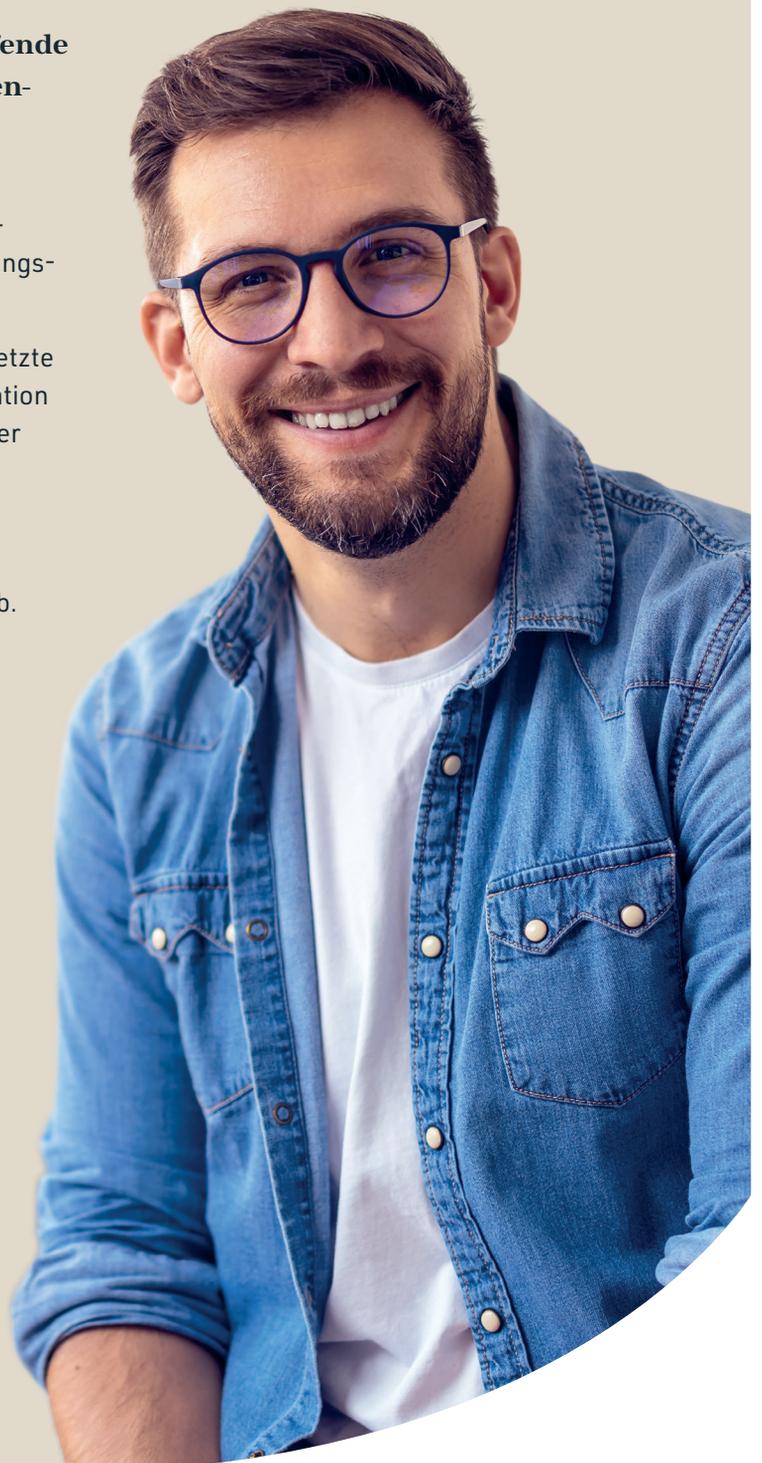
ISBN 978-3-8073-2781-5

€ 62,99 / Vierteljahrespreis

Grundlizenz inkl. 3 User

(personengebundene Lizenzen)*

rehm-verlag.de/altlasten



5716.01

Dr.-Ing. Uwe Hiester, Fellbach und Laura Bieber (M.Sc.), Fellbach

Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren)

Zusammenfassung	1 – 6
1 Einleitung und Ausgangssituation	7 – 29
1.1 Standorthistorie	7 – 9
1.2 Geplante Standortentwicklung (Flächenrecycling)	10 – 16
1.3 Geologie, Hydrogeologie, Schadstoffbelastung	17 – 23
1.4 Sanierungsziel, Verfahrensauswahl, Sanierungsstrategie	24 – 29
2 Thermische Grundwassersanierung mit dem TUBA-Verfahren	30 – 60
2.1 Anwendungsbereiche thermischer in-situ Sanierungen (TISS)	30 – 39
2.2 Dominierende Prozesse bei einer thermischen in-situ Sanierung	40 – 53
2.3 Explosionsschutz bei der Sanierung von BTEX-MKW-Gemischen	54 – 60
3 Thermische Boden- und Grundwassersanierung am Standort Petroleumhafen	61 – 93
3.1 Umsetzung des Explosionsschutzes	61 – 66
3.2 Größe der Sanierungsbereiche für das TUBA-Verfahren	67 – 71
3.3 Dampferzeugung, Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren)	72 – 77
3.4 Bodenluftabsaugung, Abluftreinigung	78 – 84
3.5 Grundwasserförderung, Wasserreinigungsanlage	85 – 87
3.6 Automatisierte Datenauswertung und Interpretation	88 – 91
3.7 Arbeitsschutz	92, 93
4 Erkenntnisse aus dem Sanierungsbetrieb	94 – 127
4.1 Erweiterung des konzeptionellen Standortmodells	94 – 98
4.2 Anströmung der Bodenluftabsaugpegel	99 – 109

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren)

4.3 Sanierungsfortschritt an der Dampfausbreitung im Grundwasser erkennen	110 – 117
4.4 Quantifizierung des Schadstoffaustrags	118 – 127
5 Tideeinfluss auf die Sanierungsdynamik/Besondere technische Herausforderungen	128 – 157
5.1 Tidebedingte Grundwasserdynamik	128 – 132
5.2 Beeinflussung der Dampfausbreitung durch die Tide	133 – 144
5.3 Räumliche und zeitliche Interpretation des Tideeinflusses	145 – 152
5.4 Erkennen hydraulisch aktiver Zonen anhand des Tideeinflusses	153 – 157
6 Ökologische und ökonomische Bewertung	158 – 170
6.1 Technischer Sanierungserfolg	158 – 162
6.2 Ökologischer Sanierungserfolg	163 – 167
6.3 Ökonomische Bewertung der Sanierungsmaßnahme	168 – 170
7 Fazit und Ausblick	171 – 175
8 Danksagung	176
Literatur	

Schlagwortübersicht

adiabatische Kompression	65
Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft (BUKEA)	3, 15, 29
Benzinkohlenwasserstoffe (Benzin-KW)	6, 21, 120, 124 ff., 160 f., 163, 171
Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol (BTEX)	7, 21 f., 30, 40, 54, 58, 87, 120, 124, 161
BioBat-Methode	26
Blobs	8
Bodenaushub/-tausch	14, 35, 169 ff.
Brownfield24 Award	6, 172
C3- und C4-Aromate	22, 119, 124
Dampfraum	110, 113, 115, 142, 154
energiesparend	6, 83, 164, 166, 172
Explosion	5, 28, 46, 54 ff., 65 f., 84
Flächenrecycling	6, 16, 24, 172
Gemischsiededampfdruck	42 ff.
Hamburg Port Authority (HPA)	15
Kosten	6, 35, 165 ff., 169 ff.

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren)

Leichtphase	1, 8, 22, 121
Lighter than water non-aqueous phase liquid (LNAPL)	1, 8, 22, 121
Machbarkeitsstudie	26
Methan	23, 62
Methanäquivalente	118, 120, 125
Mikrobiologische Abbauprozesse	26, 31, 144, 160, 171
Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW)	1, 7, 22, 24, 30, 40, 53 f.
Mobilisierung	31, 45, 50, 53, 85
Nachhaltigkeit	3, 6, 29, 166, 171
Ölphase	52 f., 123
Pilotierung	25, 122
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	7, 22, 30, 124
Pool	8, 22
Quellensanierung	3 f., 26, 87, 100, 165
rekuperative thermische Oxidationsanlage (RTO)	62, 69, 77, 83 f., 123
Residualsättigung	45
Sättigungskonzentration	56, 58
Schadensherd	4, 15, 23, 49, 67, 128, 144, 158, 166, 169, 171
Schadstoffentfrachtung	3, 6, 29
Strippen	41, 46, 87, 114
Tenside	26
Thermische in-situ Sanierung (TISS)	6, 27, 30 f., 34 ff., 53 f., 59, 98, 161, 164, 166 f., 169, 171
Thermotracer	107
Tiden/Gezeiten	1, 5, 8, 18, 20, 69, 82, 101, 103, 111, 128 ff., 133, 136 f., 140, 142, 145, 147 ff., 151 ff., 171
Wasserdampfdestillation (WDD)	41, 43 ff.
Wirtschaftlichkeit	26, 37, 169, 172

Zusammenfassung

- 1 Der Petroleumhafen in Hamburg-Waltershof wurde seit den 1920er Jahren betrieben und ausgebaut. Im Verlauf des 2. Weltkriegs wurde das Tanklager zerstört. Dabei wurden erhebliche Mengen an Mineralölkohlenwasserstoffen (MKW) und anderen Schadstoffen freigesetzt. Diese umwelt- und gesundheitsgefährdenden Stoffe versickerten im Boden und belasteten Boden und Grundwasser erheblich. In einigen Bereichen schwamm Leichtphase auf dem tidebeeinflussten Grundwasser.
- 2 Nach dem Krieg wurde das Areal wieder aufgebaut, neue Lagertanks errichtet und das Tanklager bis zum Beginn des 21. Jahrhunderts weiter betrieben. Im Zuge der Umstrukturierung des Hamburger Hafens und der Weiterentwicklung der Containerterminals stand eine Altlastensanierung an.
- 3 Die Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft (BUKEA) der Freien und Hansestadt Hamburg beauftragte die Quellensanierung eines hochbelasteten Areals auf einer Grundfläche von grob 10 000 m² bis in eine Tiefe von bis zu 12 m unter der Geländeoberkante (GOK). Das Ziel: Eine nachhaltige Schadstoffentfrachtung von Boden und Grundwasser unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Aspekte.
- 4 Für die Schadensherdsanierung mit dem TUBA-Verfahren (thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung) wurden ein Dampferzeuger, eine Bodenluftabsaugung, eine Abluftreinigung und eine Grundwasserreinigungsanlage am Standort installiert und über 17 Monate betrieben. Der Zeitplan für die Umsetzung der Sanierungsmaßnahme war, aufgrund der Schnittstellen bei der Baureifmachung, eng bemessen. Alle Arbeiten im Sanierungsfeld zur Quellensanierung waren in weniger als zwei Jahren abgeschlossen.
- 5 Für den laufenden Sanierungsbetrieb sowie die Brunneninstallation war der sehr komplex und heterogen gegliederte Untergrund am Standort eine große Herausforderung. Die Komplexität war unter anderem auf die hydrogeologisch heterogenen anthropogenen Auffüllungen und den Einfluss der Gezeiten zurückzuführen. Die Grundfläche von ähnlich charakterisierten Sanierungsabschnitten lag in der Größenordnung von rund 500 m². Das konzeptionelle Standortmodell wurde daher sanierungsbegleitend kontinuierlich weiterentwickelt. Je nach Schadstoffbelastung und Zusammensetzung konnte ein hochexplosives

Schadstoffgemisch in den Absaugleitungen entstehen und musste zur Vermeidung von Explosionen verdünnt werden.

- 6 Der Größenmaßstab der thermischen in-situ Sanierung am Standort Petroleumhafen Hamburg ist in Europa einzigartig. Der Schadstoffaustrag von über 280 t Benzin-KW überstieg das vormals abgeschätzte Inventar um 40 %. Das TUBA-Verfahren der reconsite GmbH darf hier als hochgradig energieeffizient und energiesparend bezeichnet werden. Die bewirkte Schadstoffentfrachtung ist ebenso nachhaltig wie dauerhaft. Im Literaturvergleich mit konventionellen hydraulischen Maßnahmen unterschreitet die hier ausgeführte thermische in-situ Sanierung (TISS) den spezifischen Energieverbrauch und die spezifischen Kosten. Energieverbrauch und Kosten pro Kilogramm Schadstoff sind beim TUBA-Verfahren geringer als bei herkömmlichen Verfahren. Das Projekt wurde bei dem Flächenrecyclingpreis „Brownfield24 Award 2022“ mit einem 1. Platz ausgezeichnet.

1 Einleitung und Ausgangssituation

1.1

Standorthistorie

- 7 Um den Umschlag brennbarer Güter in Hamburg künftig stadt- und hafentfern vorzunehmen, wurde seit Beginn des 20. Jahrhunderts der Petroleumhafen in Hamburg-Waltershof erbaut. Die frühere Insel Waltershof liegt am Südufer der Norderelbe. Etwa 1910 wurde der alte Petroleumhafen vom „Kleinen Grasbrook“ nach Hamburg-Waltershof verlegt [1]. Im Zuge des Betriebs wurde er seit den 1920er Jahren ausgebaut. Im Verlauf des 2. Weltkriegs wurde das Tanklager zerstört. Erhebliche Mengen an Mineralölkohlenwasserstoffen (MKW) und anderen Schadstoffen wurden freigesetzt. Diese umwelt- und gesundheitsgefährdenden Stoffe versickerten im Boden und belasteten Boden und Grundwasser erheblich (unter anderem durch gesundheitsgefährdende Kohlenwasserstoffe (KW), wie Benzin-KW, den leichtflüchtigen aromatischen KW Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole (BTEX) sowie polyzyklische aromatische KW (PAK)).
- 8 In einigen Bereichen schwamm Leichtphase auf dem tidebeeinflussten Grundwasser. Leichtphase (engl. LNAPL = lighter than water non-aqueous phase liquid) umfasst den Anteil der KW, der als eigene Phase, also nicht im Wasser gelöst, eine geringere spezifische Dichte als Wasser besitzt. Leichtphase kann als geschlossener Phasenkörper (engl.: pool) auf der wässrigen Phase (Grundwasseroberfläche) schwimmen oder sich verteilt als Tröpfchen (engl.: blops) auch im Boden in der ungesättigten Zone oder unterhalb der Grundwasseroberfläche, also in der gesättigten Zone befinden. Das hydraulische Fließverhalten von pools und blops ist ein grundsätzlich anderes [2].
- 9 Nach dem Krieg wurde das Areal wieder aufgebaut. Neue Lagertanks wurden errichtet und das Tanklager weiter betrieben (Abb. 1). Zum Ende des 20. Jahrhunderts wurde der Betrieb des Petroleumhafens schrittweise reduziert (Abb. 2) und im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts eingestellt.

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 1 Einleitung und Ausgangssituation / 1.2 Geplante Standortentwicklung (Flächenrecycling)

1.2 Geplante Standortentwicklung (Flächenrecycling)

10 Im Zuge der Umstrukturierung des Hamburger Hafens und der Weiterentwicklung der südlich gelegenen Containerterminals steht die Umnutzung der Halbinsel am Tankweg an. Hierzu wurden zunächst die Tanklager zurückgebaut.

11 **Abb. 1: Luftbild Petroleumhafen (etwa 1963), inkl. grober Lage der Sanierungsfläche (rot umrandet). (Quelle: hhla.de/hamburger-fotoarchiv.de, ergänzende Angabe des Bereichs der thermischen in-situ Sanierung 2019-2020 (rote Umrandung) durch reconsite GmbH, 2023)**



12 **Abb. 2: Luftbild Petroleumhafen (etwa 2011), inkl. grober Lage der Sanierungsfläche (rot umrandet). (Quelle: Hasenpusch Photo, ergänzende Angaben, z. B. des Bereichs der thermischen in-situ Sanierung 2019-2020 (rote Umrandung) durch reconsite GmbH, 2022)**

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 1 Einleitung und Ausgangssituation / 1.2 Geplante Standortentwicklung (Flächenrecycling)



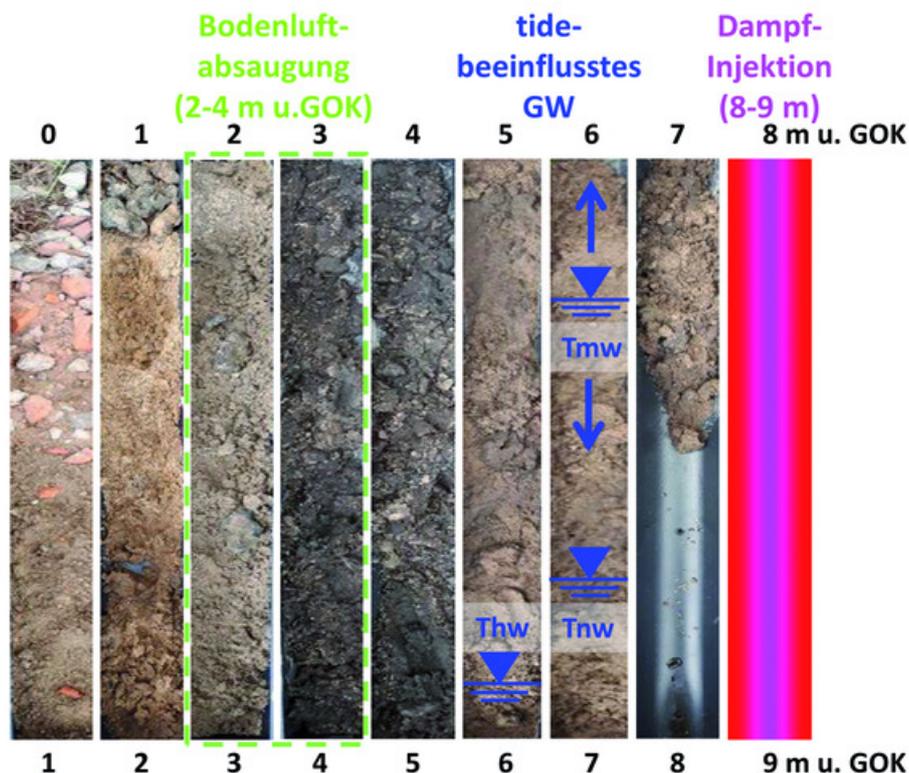
- 13 Im Zuge der Baureifmachung stand nun die Altlastensanierung im Boden und Grundwasser an. Um das Grundwasser und die Elbe vor Schadstoffen zu schützen, wurden verschiedene Maßnahmen zur Altlastensanierung durchgeführt.
- 14 Von 2010 bis 2013 erfolgten mit der Kampfmitteluntersuchung und -räumung durch die Hamburg Port Authority (HPA) umfassende oberflächennahe Bodenbewegungen der oberen etwa 3 Meter (Abb. 10). Insgesamt wurden 130 000 m³ Boden ausgehoben und klassiert. Davon mussten 64 000 m³ Aushubmaterial entsorgt und mit unbelastetem Boden ersetzt werden. 56 000 m³ Aushubmaterial konnten vor Ort wieder eingebaut werden [3].
- 15 Unterhalb dieses oberflächennahen Bodenaustausches war der jetzt sanierte Schadensherd auf einer Grundfläche von einem Hektar bis in zwölf Meter Tiefe stark mit Schadstoffen belastet. Die Boden- und Grundwassersanierung erfolgte im Auftrag der Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft Hamburg (BUKEA) und wurde Ende 2020 erfolgreich abgeschlossen. Das Areal wurde an die HPA übergeben [3].
- 16 Im Zuge des Flächenrecyclings soll das Hafenbecken des ehemaligen Petroleumhafens verfüllt werden. Mit einer etwa einen Kilometer langen Kaimauer soll künftig eine etwa 38 Hektar große Terminalfläche zur zeitgleichen Abfertigung von zwei Großschiffen entstehen [3].

1.3 Geologie, Hydrogeologie, Schadstoffbelastung

- 17 Der Boden am Standort ist oberflächennah eine Auffüllung mit einer durchschnittlichen Mächtigkeit von etwa 13 m. Das Auffüllungsmaterial besteht hauptsächlich aus grauen, teilweise hellbraunen Mittelsanden. Örtlich sind Schluffe und wechselnde Anteile von feinen und groben Sanden und Kiesen vorhanden. Ein Bohrprofil aus dem Bereich der anthropogenen Auffüllung ist in Abbildung 3 zusammengestellt. Ab ca. 7 m unter Geländeoberkante (GOK) erhöht sich bereichsweise der Grobsandanteil. Die aufgefüllten Sande sind lokal mit gering durchlässigen Schlufflinsen und -bändern sowie Torfschichten durchsetzt. Diese weisen meist nur relativ geringe Mächtigkeiten von wenigen Millimetern bis ca. einem Dezimeter auf. Bereichsweise wurden auch mächtigere Schlufflagen erbohrt. Unter der Auffüllung stehen quartäre Elbsande bis etwa 30 m u. GOK an. Sie werden flächig von Glimmerton unterlagert [4].
- 18 Die Halbinsel Petroleumhafen ist zur Elbe hin mit einer Spundwand umfasst. Trotzdem ist der Grundwasserspiegel von den Gezeiten (Tiden) in der Elbe erheblich beeinflusst. Der Grundwasserspiegel bei Tidemittelwasser (Tmw) liegt bei ca. +0,5 m NHN, was etwa 5 m unter Geländeoberkante (GOK) entspricht. Der Tidehub (Thb) im Grundwasser liegt bei etwa 1,6 m bei einer Tide von etwas mehr als 12 Stunden. Das entspricht somit innerhalb von 6 Stunden einem Grundwasserspiegelanstieg/-abfall um ca. 1,5–1,6 m bzw. einer Grundwasserschwankung zum Grundwasser-Tidemittelwasser von $\pm 0,8$ m. Dieser Tideeinfluss bedingt periodische Fließrichtungswechsel der Grundwasserströmung.
- 19 Die hydraulische Durchlässigkeit der Sande wurde im Rahmen der Sanierungsuntersuchung zu $2,3$ bis $4,4 \times 10^{-4}$ m/s ermittelt. Für die Bohrarbeiten wurde ein Homogenbereich B-1 mit vornehmlich mitteldichter bis dichter Lagerung nach DIN 18301 (2019-09 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Bohrarbeiten) angegeben. Der Wassergehalt in der ungesättigten Zone wurde zu 10–30 % abgeschätzt [4].
- 20 **Abb. 3: Bohrprofil mit Kennzeichnung der Bodenluftabsaugung (Filterstrecke BLA), GW-Schwankungsbereich (Tidehochwasser (Thw), Tidemittelwasser (Tmw), Tideniedrigwasser (Tnw)) und**

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 1 Einleitung und Ausgangssituation / 1.3 Geologie, Hydrogeologie, Schadstoffbelastung

des Dampf-Luft-Injektionsbereichs (DLI). (Quelle: reconsite GmbH, 2019)



- 21 Erhebliche Verunreinigungen im Boden, in der Bodenluft und im Grundwasser wurden dominiert von Benzinkohlenwasserstoffen (C_6-C_{10}) (50–60 %) und BTEX (10–15 %). Die Anfangskonzentrationen von Benzinkohlenwasserstoffen (C_6-C_{10}) im Sanierungsbereich erreichten lokal bis zu $1\,390\text{ mg/m}^3$ in der Bodenluft, bis zu $19\,000\text{ mg/kg}$ im Boden und mehr als $4\,500\text{ }\mu\text{g/L}$ im Grundwasser. Die anfänglichen BTEX-Konzentrationen im Sanierungsbereich lagen lokal bei bis zu 275 mg/m^3 in der Bodenluft, mehr als $7\,000\text{ mg/kg}$ im Boden und mehr als $45\,000\text{ }\mu\text{g/L}$ im Grundwasser. Bei den BTEX dominierte Xylol mit 70 % (Siedetemperatur ca. $140\text{ }^\circ\text{C}$ bei Atmosphärennormaldruck) [4].
- 22 Darüber hinaus waren Mineralölkohlenwasserstoffe ($C_{10}-C_{40}$) ($> 4.500\text{ }\mu\text{g/L}$), polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK, $> 2.300\text{ }\mu\text{g/L}$, davon Naphthalin $> 2.000\text{ }\mu\text{g/L}$), C3-Aromaten (Trimethylbenzol, Propylbenzol, Ethyltoluol, Styrol (Siedetemperaturen der Schadstoffe zwischen $145-170\text{ }^\circ\text{C}$)) und andere Schadstoffe vorhanden. Lokal war eine auf der Grundwasseroberfläche schwimmende Leichtphase (pool) vorhanden

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 1 Einleitung und Ausgangssituation / 1.3 Geologie, Hydrogeologie, Schadstoffbelastung

(MKW > 80.000 µg/L, BTEX > 38.000 µg/L, C3-Aromaten > 65.000 µg/L, PAK > 2.300 µg/L). Im Jahr 2018 wurde das gesamte Schadstoffinventar zu rund 200 Tonnen abgeschätzt [4].

- 23 Im Rahmen der Sanierungsuntersuchungen wurden in der Bodenluft der zu sanierenden Fläche hohe Methangehalte von teilweise > 80 Volumenprozent festgestellt [4]. Ursächlich hierfür war wahrscheinlich ein (mikro-)biologischer Abbauprozess der Kohlenwasserstoffverunreinigungen im Bereich randlicher, geringer Belastungen im Umfeld des Schadensherds.

1.4 Sanierungsziel, Verfahrensauswahl, Sanierungsstrategie

- 24 Am Standort Petroleumhafen galt es, verschiedenen Herausforderungen und Randbedingungen verfahrenstechnisch Rechnung zu tragen. Auf dem Sanierungsbereich standen im Verlauf der Tanklagernutzung sechs verschiedene Lagertanks (Abb. 1, Abb. 2) mit unterschiedlichen Mineralölprodukten. Entsprechend ergab sich eine starke Variation der räumlichen Schadstoffzusammensetzung und Schadstoffausbreitung. Zudem bedingte die künstliche Auffüllung in diesem Gebiet hydrogeologische Heterogenitäten und komplexe Strömungsverhältnisse (s. auch Kap. 4.2 und 4.3).
- 25 Solche heterogenen Verhältnisse erschweren generell eine Übertragung von Ergebnissen aus einer in-situ Pilotierung (standortspezifisches Versuchsfeld) auf andere Sanierungsbereiche am gleichen Standort. Solche Übertragungen können dann große Unsicherheiten beinhalten, wenn sich die unterschiedlichen Randbedingungen im Pilotierungsfeld und im (restlichen) Sanierungsbereich auf die sanierungsdominierenden Prozesse auswirken.
- 26 Im Rahmen der Sanierungsuntersuchungen erfolgten am Standort verschiedene Felduntersuchungen mit unterschiedlichen Sanierungsverfahren. Die Machbarkeitsstudien zur Anwendung der BioBat-Methode, einer in-situ-Bodenwäsche mit Tensiden und eines mikrobiologischen in-situ Abbaus der Schadstoffe scheiterten an den technischen und wirtschaftlichen Kriterien für eine in-situ Quellensanierung bei den gegebenen Standortbedingungen [5].
- 27 Aufgrund des guten Verständnisses der sanierungsrelevanten, dominierenden Prozesse bei einer thermischen in-situ Sanierung (TISS) (Kap. 2.2) war ein Pilotversuch mit einer Dampf-Luft-Injektion an diesem Standort nicht erforderlich. Durch die Kombination von hydraulischen und thermodynamischen Prozessen ermöglichen TISS einen Sanierungserfolg auch unter komplexen Randbedingungen. Die Kombination verschiedener sanierungsdominierender Prozesse wirkt sich positiv auf die Robustheit thermischer Sanierungsverfahren bei wechselnden Randbedingungen aus.
- 28 Bei der Auslegung der Verfahrenstechnik und beim Betrieb der Sanierungsanlage war die Variationsbreite verschiedener Einflussgrößen zu berücksichtigen. Das betrifft bei potentiell explosiven Schadstoffgemischen im Besonderen die Schadstoffrückgewinnung und den Explosionsschutz (Kap. 2.3).

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 1 Einleitung und Ausgangssituation / 1.4 Sanierungsziel, Verfahrensauswahl, Sanierungsstrategie

- 29 Die BUKEA der Freien und Hansestadt Hamburg beauftragte die Sanierung eines hochbelasteten Areals auf einer Grundfläche von grob 10 000 m² bis in eine Tiefe von bis zu 12 m u. GOK. Das Sanierungsziel war eine nachhaltige Schadstoffentfrachtung des Untergrundes unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Aspekte. Daher war das Abschalten der Sanierung eng mit dem Auftraggeber abzustimmen. Als Kriterien wurden die Entwicklung der Schadstoffaustragsfrachten über die Bodenluft und die Grundwasserförderung (Bewertung der Emissionen), sowie der spezifische Energieverbrauch je Kilogramm Schadstoff herangezogen [4].

2 Thermische Grundwassersanierung mit dem TUBA-Verfahren

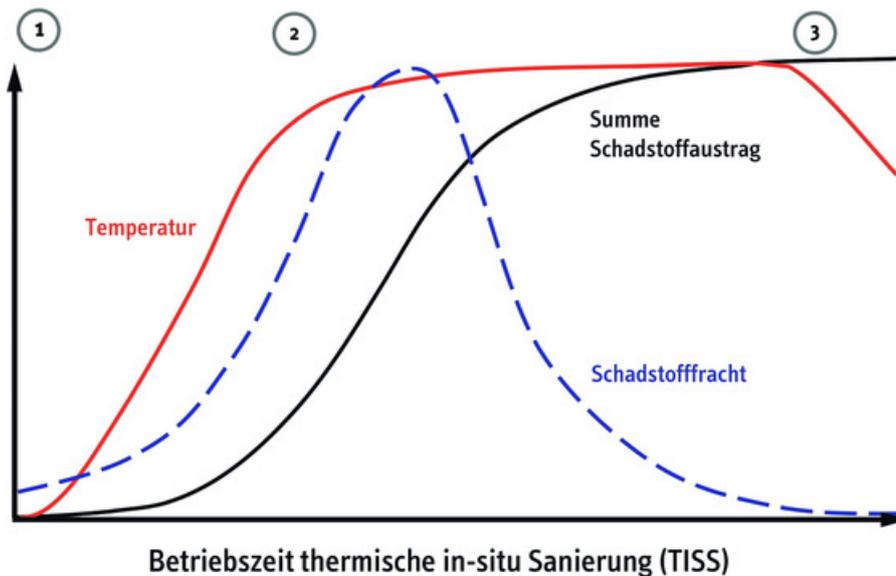
2.1

Anwendungsbereiche thermischer in-situ Sanierungen (TISS)

- 30 Thermische in-situ Sanierungsverfahren (TISS) sind bei der Boden- und Grundwassersanierung Stand der Technik. TISS werden vornehmlich zur Beseitigung von Schadstoffquellen genutzt, die durch organische Schadstoffe verursacht werden. Typische Schadstoffgruppen sind chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW, LHKW), Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol (BTEX), Aromaten, Aliphaten, Mineralöle, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und andere.
- 31 TISS nutzen hierbei die Änderung physikalischer Stoffeigenschaften mit steigender Temperatur. Primär bewirken TISS eine gezielte Mobilisierung von Schadstoffen einschließlich Desorption von gebundenen Stoffen vom Bodenkorn und mobilisieren auch Schadstoffe aus Schichten mit geringer hydraulischer Durchlässigkeit. Die mobilisierten Schadstoffe werden vornehmlich kontrolliert (a) aus dem Untergrund mit einer Bodenluftabsaugung (BLA) oder einer Grundwasserförderung entnommen. Ergänzend können einige Schadstoffe auch (b) in-situ chemisch oder mikrobiologisch oder (c) thermisch umgesetzt und abgebaut werden. Die Prozesse (a) und (b) erfolgen vornehmlich unterhalb bzw. bis etwa 100 °C. Für thermische Reaktionsprozesse zur Schadstoffzersetzung (c) werden meist Temperaturen über 150 °C benötigt, weshalb dieser Anwendungsbereich in-situ weit weniger üblich ist (sondern eher bei ex-situ Anwendungen genutzt wird, z. B. bei Bodenmieten).
- 32 Schadstoffe mit einem Stoffsiedepunkt bis zu etwa 240 °C werden meist verdampft, Schadstoffe mit höheren Siedepunkten wie zähflüssige Ölgemische, werden vornehmlich verflüssigt (Abb. 6, rechts).
- 33 Beim Betrieb einer thermischen in-situ Sanierung werden (1) Aufheizphase, (2) Sanierungsphase und (3) Abkühlphase unterschieden. Der übliche Sanierungsverlauf bei leicht- und mittelflüchtigen Schadstoffen zeigt nach einer Aufheizphase von wenigen Wochen (Abb. 4, Phase 1) eine Erhöhung der Schadstoffkonzentration in der Bodenluft und entsprechend der Austragsfracht um das 10- bis 20-fache.

34

Abb. 4: Betriebsphasen einer thermischen in-situ Sanierung (TISS): (1) Aufheizphase, (2) Sanierungsphase, (3) Abkühlphase. (Quelle: [6])



- 35 Nach einer Sanierungsphase (Abb. 4, Phase 2) von wenigen Wochen folgt an manchen Standorten optional eine Nachreinigung von Randbereichen. In dieser Phase wird der aktive Heizbetrieb beendet und eine warme Bodenluftabsaugung weiter betrieben. Entsprechend sinken die Temperaturen in Boden und Grundwasser wieder (Abb. 4, Phase 3). Thermische in-situ Sanierungen werden in der Regel binnen weniger Monate abgeschlossen. Geringere Energieverbräuche und geringere Sanierungskosten gegenüber einer konventionellen „kalten“ BLA, einer hydraulischen Grundwassersicherung oder einem konventionellen Bodenaustausch wurden für TISS wiederholt nachgewiesen (u. a. [7], [8], [9]).
- 36 TISS finden bei den unterschiedlichsten geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten Anwendung. Die Gegebenheiten bestimmen meist die Auswahl und Dimensionierung des Heizsystems zur Erwärmung von Boden und/oder Grundwasser und/oder Festgestein. Je nach Randbedingung bieten das TUBA-Verfahren (Dampf-Luft-Injektion bei guter Durchlässigkeit, meist $k_f \geq 10^{-6}$ m/s) oder das THERIS-Verfahren (feste Wärmequellen bei geringer Durchlässigkeit, meist $k_f \leq 10^{-5}$ m/s) entsprechende Vorteile. Entsprechend finden im Grenzbereich

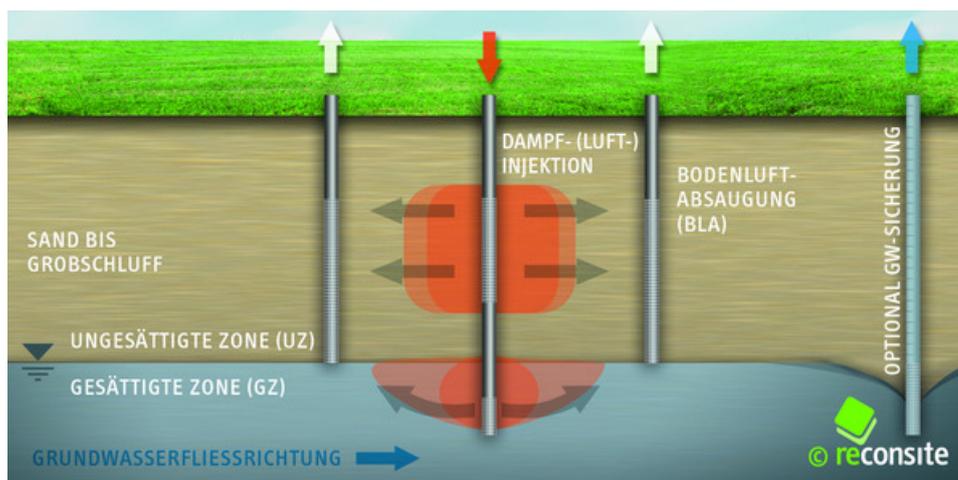
Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 2 Thermische Grundwassersanierung mit dem TUBA-Verfahren / 2.1 Anwendungsbereiche thermischer in-situ Sanierungen (TISS)

schluffiger Sand – sandiger Schluff beide Verfahren je nach weiteren Randbedingungen Anwendung.

- 37 Eine Dampf-injektion bzw. eine Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) erfolgt bevorzugt in gut durchlässigem Boden oder sandigen Bodenschichten (Abb. 5). Auch zur in-situ Sanierung von kontaminiertem Fels- und Kluffgestein mit guter Durchlässigkeit ist eine Dampf-injektion oft wirtschaftlich. Wasserdampf wird in einer Dampfanlage erzeugt. Je nach Injektionsdruck in den Boden bzw. ins Grundwasser sind Reichweiten auch deutlich über 10 m möglich. Wärmeeintrag und Wärmetransport erfolgen vornehmlich konvektiv, also mit dem strömenden Dampf. Bindige Schichten von einigen Dezimetern werden über Konduktion (Wärmeleitung) ebenfalls erwärmt.

38

Abb. 5: Verfahrensprinzip TUBA. (Quelle: reconsite GmbH, 2004)

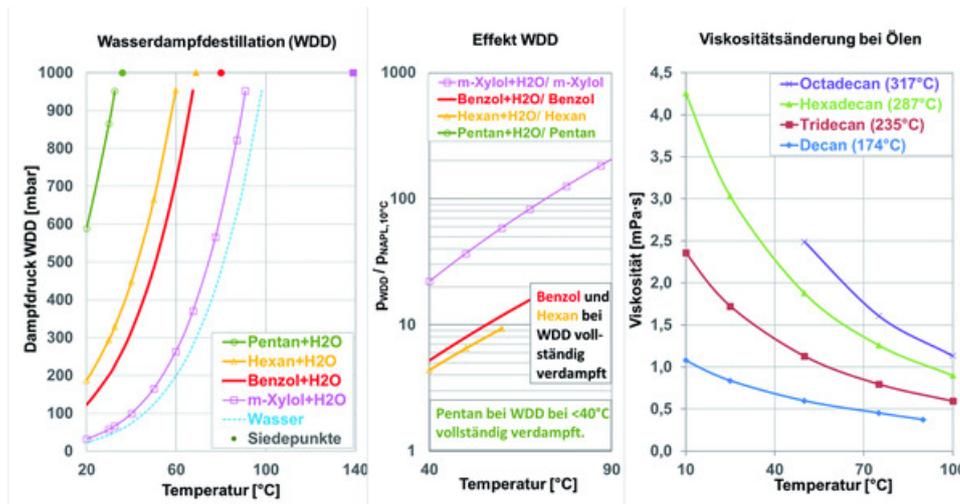


- 39 Feste Wärmequellen (THERIS-Verfahren) werden bevorzugt in Bodenschichten mit geringer Durchlässigkeit und mehreren Metern Mächtigkeit eingesetzt (beispielsweise Schluff, Lehm, Mergel oder Ton). Ebenso werden feste Wärmequellen im gering durchlässigen Fels- und Kluffgestein eingesetzt. Die Wärmequellen werden auf mehreren hundert Grad Celsius betrieben und erhitzen über Konduktion (Wärmeleitung) auch Bodenschichten mit geringer Durchlässigkeit. So können auch mehrere Meter mächtige, bindige Schichten in-situ saniert werden, die bei natürlichen Temperaturen nur durch die Zerstörung der Bodenstruktur sanierbar sind (z. B. Aushub).

2.2 Dominierende Prozesse bei einer thermischen in-situ Sanierung

- 40 Beim Erhitzen von Gemischen mit Mineralölkohlenwasserstoffen können leichtflüchtige Schadstoffe wie BTEX, aber auch C₅-C₁₀ Aromaten und andere Stoffe, verdampft werden (Abb. 6, links). Zusammen mit Luft können sie ein explosives Gasgemisch bilden. Ob ein derartiges Gemisch entstehen kann, hängt sowohl von der Verdampfungsrate, als auch vom Durchfluss der Bodenluftabsaugung ab. Insbesondere bei der Sanierung von Schadstoffphasen, die beim Verdampfen explosive Gasgemische bilden können, ist daher ein vertiefendes Verständnis der thermo-hydraulischen Prozesse essenziell für einen effizienten und sicheren Anlagen- und Sanierungsbetrieb. Typische Tanklagerschäden mit MKW und einem deutlichen BTEX-Anteil gehören dazu.
- 41 Bei einer Dampf-Luft-Injektion in das Grundwasser bewirken hierbei maßgeblich drei Prozesse eine signifikante Erhöhung der Schadstoffkonzentration in der Bodenluft: die Erhöhung des Dampfdrucks, der Prozess der Wasserdampfdestillation (WDD) und das Strippen (überführen) von Schadstoffen aus dem Grundwasser in die Gasphase und damit in die Bodenluft. Steigende Temperaturen wirken sich unmittelbar auf den Dampfdruck einer flüssigen organischen Schadstoffphase aus. Der Dampfdruck steigt exponentiell mit der Temperatur. Flüssigkeiten verdampfen somit schneller in die Gasphase. Pentan mit einer Siedetemperatur von 36 °C liegt auch bei einer moderaten Erwärmung nicht mehr als Schadstoffphase im Untergrund vor (Abb. 6, Mitte).
- 42 **Abb. 6: Gemischsiededampfdruck bei der Wasserdampfdestillation der Schadstoffe n-Pentan, n-Hexan, Benzol und m-Xylol. (Quelle: reconsite GmbH, 2008, erweitert 2019)**

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumphafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 2 Thermische Grundwassersanierung mit dem TUBA-Verfahren / 2.2 Dominierende Prozesse bei einer thermischen in-situ Sanierung



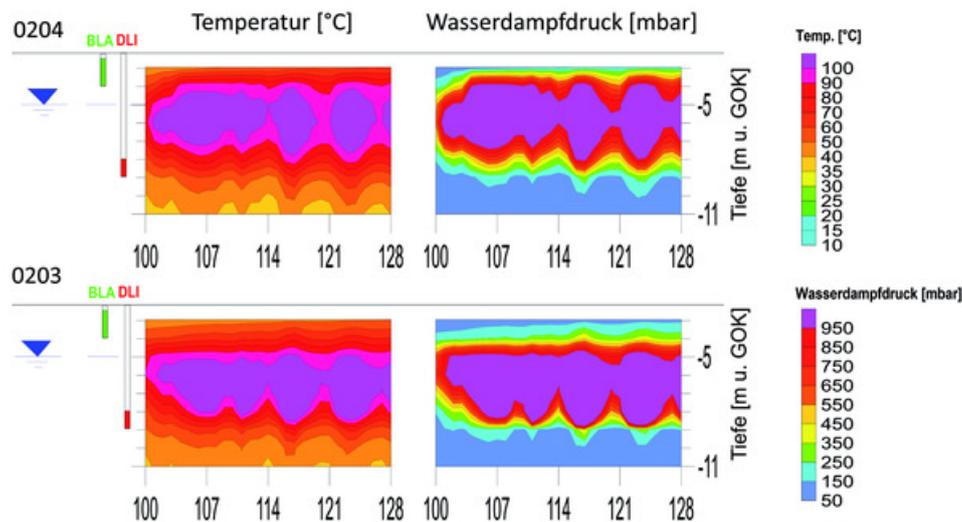
- 43 Das gemeinsame Verdampfen von Wasser und Schadstoffphase ist als WDD bekannt. Der Gemischsiededampfdruck beider Flüssigkeiten ergibt sich aus der Summe der Dampfdrücke von Wasser und Schadstoffgemisch. Entsprechende Berechnungen lassen sich mit verschiedenen empirischen Ansätzen durchführen [10].
- 44 Der Effekt der WDD wird deutlich, wenn man den Gemischsiededampfdruck ins Verhältnis zum jeweiligen Stoffsiededampfdruck des Schadstoffs setzt (Abb. 6, Mitte) [11]. Bei Hexan und Benzol bewirkt die WDD bereits bei 40 °C eine Erhöhung des Gemischsiededampfdrucks um den Faktor 4 bis 5. Bei Temperaturen um die 60 °C sind diese Schadstoffphasen bei Normaldruck vollständig verdampft, obwohl die Siedetemperatur der Einzelstoffe 69 °C bzw. 80 °C beträgt.
- 45 Besonders deutlich wird der Effekt einer WDD bei Schadstoffen mit einem Stoffsiedepunkt über 100 °C (z. B. m-Xylol, Siedepunkt 140 °C). Hier erfolgt durch die WDD eine vollständige Verdampfung der Schadstoffphase bereits unterhalb von 100 °C. Eine vollständige Schadstoffmobilisierung erfolgt somit stets, bevor ein mindestens residualgesättigter Bodenkörper vollständig trocknen kann [11]. Die Residualsättigung entspricht üblicherweise der minimalen Bodenfeuchte bzw. dem minimalen, natürlichen Wassergehalt (Ausnahmen oberflächennaher Trocknung nicht berücksichtigt).
- 46 Zudem bewirkt der Luftanteil bei einer Dampf-Luft-Injektion, also dem TUBA-Verfahren, insbesondere bei einer Injektion in das Grundwasser, ein Strippen von flüchtigen organischen Schadstoffen aus dem Wasser in die Gasphase und die ungesättigte Zone. Zusammen mit der temperaturbedingten Dampfdruckerhöhung und der WDD ändert sich in der Bodenluft der verfügbare Schadstoffanteil somit schnell, sowohl

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 2 Thermische Grundwassersanierung mit dem TUBA-Verfahren / 2.2 Dominierende Prozesse bei einer thermischen in-situ Sanierung

räumlich als auch zeitlich. Diese Dynamik ist im Explosionsschutzkonzept zu berücksichtigen (Kap. 2.3).

- 47 Zum Verständnis des Sanierungsprozesse ist es hilfreich, gemessene Temperaturen in den Wasserdampfdruck umzurechnen (Abb. 7). In Anlehnung an Abb. 6 (links) ergibt sich, dass Benzol durch die Wasserdampfdestillation bereits ab einem Wasserdampfdruck von 250 mbar nicht mehr als eigenständige flüssige Phase vorliegt (Anmerkung: Lotet man bei 250 mbar Wasserdampfdruck diesen senkrecht zur Temperaturachse nach oben bis zum Unterdruck im Boden (z. B. 913 mbar bei 100 mbar Unterdruck), so befinden sich die Gemischsiedekurven Pentan, Hexan, Benzol links davon (Abb. 6 links)). Für Xylol ergibt sich eine ähnliche Aussage bei rund 500 mbar Wasserdampfdruck.

- 48 **Abb. 7: Entwicklung von Temperatur und Wasserdampfdruck bei den Temperaturprofilen 0203 und 0204 im Verlauf der thermischen in-situ Sanierung. (Quelle: reconsite GmbH, 2019)**



- 49 Exemplarisch sind die Temperaturen und die hieraus errechneten Wasserdampfdrücke für zwei Temperaturmessprofile in der Tiefe über einen Zeitraum von vier Wochen zwischen dem 100. und 128. Betriebstag dargestellt (Abb. 7). Zu den umgebenden Dampf-Luft-Injektionspegeln waren beide Profile grob 5 m entfernt. Sie befanden sich am Rande des zu sanierenden Schadensherdes und in der Nähe zur Grundstücksgrenze. Daher erfolgte in diesem Bereich die Dampf-Luft-Injektion teilweise

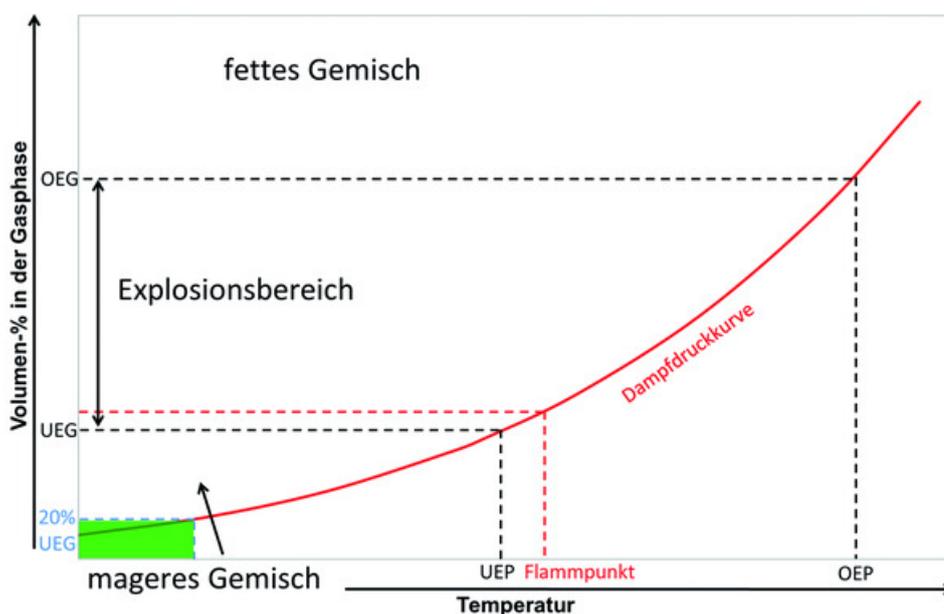
Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 2 Thermische Grundwassersanierung mit dem TUBA-Verfahren / 2.2 Dominierende Prozesse bei einer thermischen in-situ Sanierung

- intermittierend, um Temperaturrestriktionen an der Grundstücksgrenze einzuhalten.
- 50 In Folge dieser Betriebsweise traten Kühlungseffekte auf, die in den Temperaturplots erkennbar sind. Wichtiger ist jedoch, dass sich diese Kühlungseffekte kaum auf die Mobilisierung von Stoffen wie Pentan, Hexan und Benzol (Abb. 7, rechts oben: grüne Konturlinie) und nur untergeordnet und kurzfristig auf die Mobilisierung von Xylol (Abb. 7, rechts unten: orange Konturlinie) auswirkten.
- 51 Dominanter für den Sanierungsbetrieb waren hingegen die geologischen Restriktionen. Beim Profil 0204 konnte der Dampf und mit ihm die verdampften Schadstoffe ungehindert bis in die ungesättigte Zone oberhalb von 5 m und bis in den lateralen Wirkungsbereich der Bodenluftabsaugung zwischen 2 und 4 m u. GOK aufsteigen (Abb. 16, a). Beim Profil 0203 verhinderte hingegen eine gering durchlässige Bodenschicht einen vertikalen Dampfaufstieg (Abb. 16, b). Der Schadstofftransport erfolgte in diesem Bereich daher zunächst lateral, bevor er in Bereichen besserer Durchlässigkeit vertikal nach oben zur Bodenluftabsaugung aufsteigen konnte. Die zugehörigen Prozesse werden in Kapitel 4.2 eingehend erläutert.
- 52 Ferner verringern sich mit steigender Temperatur die Oberflächenspannung und die Dichte von Wasser und von organischer Schadstoffphase. Entsprechend sinkt die Viskosität (Abb. 6, rechts) und die Fließfähigkeit der flüssigen Phasen verbessert sich. Diese bessere Mobilität wird sowohl zur Grundwasserzirkulation als auch zur Verflüssigung von Schadstoffphase, meist Ölphase, genutzt. Auch bei natürlichen Temperaturen ist zähflüssige Ölphase so aus bindigen Bodenschichten gezielt mobilisierbar und förderbar [6].
- 53 Eine Herausforderung beim Sanierungsbetrieb ist die sich ändernde Zusammensetzung der Ölphase, besonders, wenn diese erhebliche Anteile an leichtflüchtigen Schadstoffen aufweist. Diese flüchtigen Bestandteile gasen bei einer Erwärmung bevorzugt aus. Die zu diesem Zeitpunkt noch im Boden und Grundwasser befindliche Ölphase wird durch den relativen Anstieg der langkettigen Molekülketten im Schadstoffgemisch allmählich zähflüssiger („in-situ Immobilisierung“). Diese Restölphase exponiert somit Sickerwasserfracht und Grundwasserfracht erheblich weniger als die ursprüngliche Ölphase. Zudem beträgt die Masse einer Restölphase üblicherweise nur wenige Prozent der ursprünglichen Ölphase (aufgrund des Schadstoffaustrags während einer TISS).

2.3 Explosionsschutz bei der Sanierung von BTEX-MKW-Gemischen

- 54 Beim Explosionsschutzkonzept für eine thermische in-situ Sanierungsanlage sind insbesondere bei BTEX-MKW-Schäden einige Betriebszustände zu berücksichtigen. Ein explosives Gasmisch zündet nur, wenn eine Zündquelle vorhanden ist. Ein explosives Gasmisch entsteht in einem Mischungsfenster aus Brennstoff und Sauerstoff. Ist zu wenig Brennstoff vorhanden, ist das Gemisch zu „mager“ (Abb. 8). Entsprechen ist es bei einem zu geringen Sauerstoffanteil zu „fett“.
- 55 In Mehrphasenextraktionsbrunnen mit aufschwimmender Schadstoffphase (z. B. bei Kerosinschäden) ergibt sich daher eine Zone, in der sich ein explosives Gasmisch einstellen kann (Abb. 9). Der Bereich der aufschwimmenden Phase ist oft nicht explosiv. Ebenso kann bei tiefen Brunnen der Brunnenkopf hinsichtlich des Explosionsschutzes unkritisch sein. Durch eine Bodenluftabsaugung an dem Brunnen ändern sich die Bedingungen. Je nach Filterstrecke im Brunnen, Phasenmächtigkeit und Phasenzusammensetzung kann sich der Bereich eines explosionsfähigen Gasmisches verlagern. Insbesondere bei einer thermischen in-situ Sanierung wird dieser Prozess von den temperaturabhängigen Prozessen dominiert (Kap. 2.2).
- 56 Die stoffspezifischen Kenndaten sollten im Kontext gelesen werden (Tab. 1): bereits bei einer Temperatur von unter 20 °C übersteigt die Sättigungskonzentration von Benzol und Toluol in Luft die jeweilige untere Explosionsgrenze (UEG). Diese Stoffe können daher bei natürlichen Temperaturen ein explosives Gasmisch bilden. Hingegen ist bei Mesitylen und Phenol die Löslichkeit in der (Boden-)Luft bei 20 °C zu gering, um ein explosives Gasmisch bilden zu können. Erst bei einer Temperaturerhöhung auf über 40 °C steigt die Sättigungskonzentration über die UEG-Konzentrationen. Bei der Zündtemperatur entzündet sich eine brennbare Substanz (Feststoff, Flüssigkeit, deren Dämpfe oder Gas) in Gegenwart von Luftsauerstoff ohne Zündfunken von selbst [12].
- 57 **Abb. 8: Temperatureinfluss auf Dampfdruck, unteren und oberen Explosionspunkt (UEP, OEP), unterer und oberer Explosionsgrenze (UEG, OEG) und den Flammpunkt bei Gasen und Dämpfen, grün: Betriebsbereich der Bodenluftabsaugung am Standort Petroleumhafen Hamburg. (Quelle: reconsite GmbH, 2023, in Anlehnung an [13])**

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 2 Thermische Grundwassersanierung mit dem TUBA-Verfahren / 2.3 Explosionsschutz bei der Sanierung von BTEX-MKW-Gemischen



58

Tab. 1: UEG/OEG, Sättigungskonzentration und Zündtemperatur von ausgewählten AKW (BTEX). (Quelle: [14])

Stoff	UEG: untere Explosionsgrenze	OEG: obere Explosionsgrenze	Sättigungskonzentration (Luft) 20 °C 50 °C 80 °C	Zündtemperatur
	[g/m³ Vol.%]	[g/m³ Vol.%]		
Benzol	39 1,2	280 8,6	321 1 049 2.682	555
Toluol	42 1,1	300 7,8	110 420 1.215	535
Ethylbenzol	43 1,0	340 7,8	41 185 605	430
m-Xylol	48 1,1	310 7,0	36 164 544	540
Mesitylen	40 0,8	365 7,0	13 65 247	550
Phenol	51 1,3	352 9,0	1,5 73 177	595

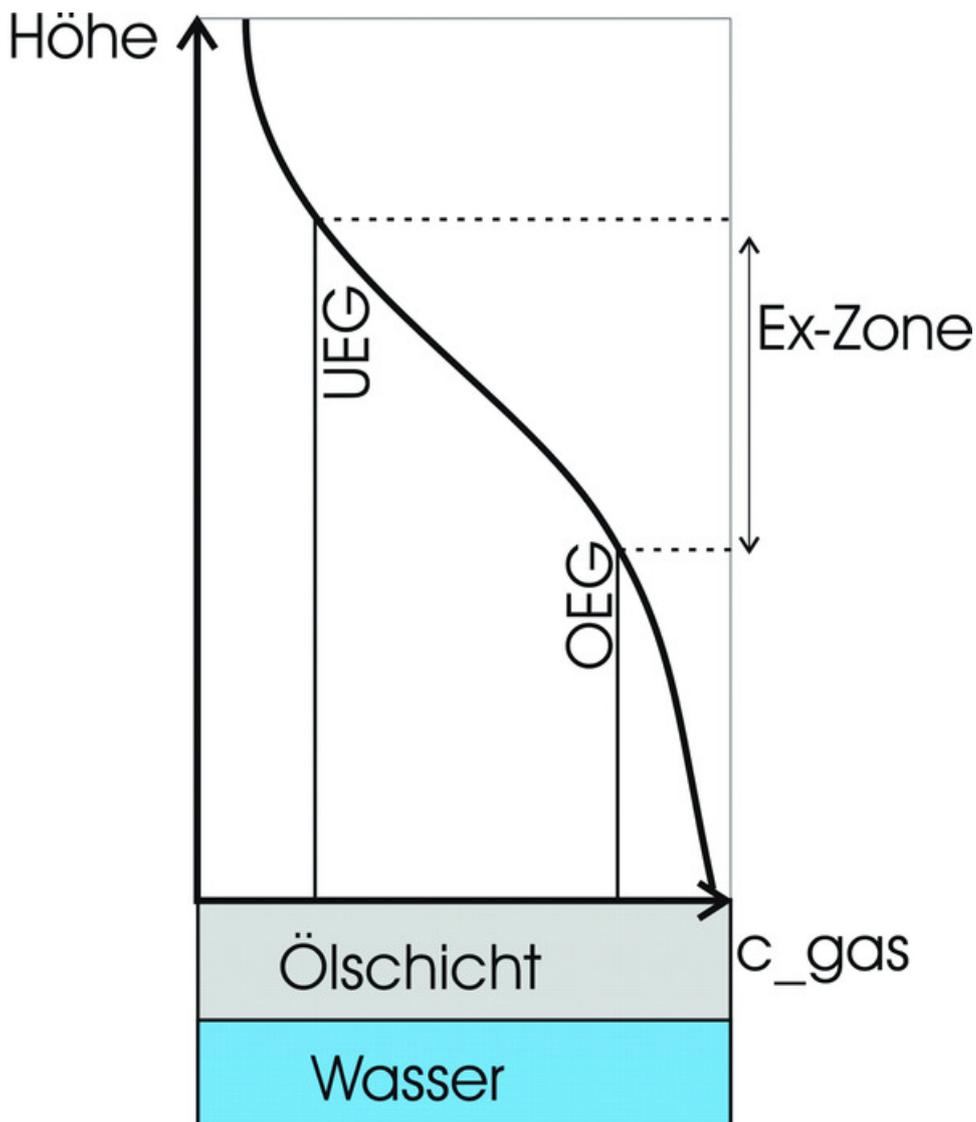
59

Bei einer Anlagenkonzeption sind die Dynamik der verschiedenen Betriebszustände zu berücksichtigen. Die geforderten Maßnahmen sind den jeweils gültigen technischen Normen und Arbeitshilfen zu entnehmen (u. a. [15] und Kap. 3.1). Sie können sich von einer überwachten Konditionierung des Gasgemisches über Flammenschutzgitter bis hin zu explosionsgeschützten Pumpen und Gebläse erstrecken. Aufgrund der Dynamik bei der Zusammensetzung der abgesaugten Bodenluft bei TISS ist der Einsatz von automatisierten Überwachungs- und Notfallsystemen üblich (Ex-Schutz-Wächter, Frischluftventil, Notabschaltung) [16].

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 2 Thermische Grundwassersanierung mit dem TUBA-Verfahren / 2.3 Explosionschutz bei der Sanierung von BTEX-MKW-Gemischen

60

Abb. 9: Explosionsfähige Atmosphäre in einem Absaugpegel (schematisch) mit einem explosiven Gasgemisch (Ex-Zone) zwischen der unteren (UEG) und oberen Explosionsgrenze (OEG). (Quelle: reconsite GmbH, 2018, in Anlehnung an [16])



Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 3 Thermische Boden- und Grundwassersanierung am Standort Petroleumhafen

3 Thermische Boden- und Grundwassersanierung am Standort Petroleumhafen

3.1

Umsetzung des Explosionsschutzes

61 Im Zuge der Anlagenplanung erfolgte eine Beurteilung der explosionsschutztechnischen Gefährdung für die thermische Boden- und Grundwassersanierung. Mithilfe einer Einstufungsmatrix wurden zunächst die explosionsschutztechnisch relevanten Bereiche und Anlagenteile ermittelt und die jeweils relevanten Betriebszustände beurteilt (Auszug s. Tab. 2).

62

Tab. 2: Übersicht der explosionstechnisch relevanten Anlagenteile. (Quelle: reconsite GmbH, 2019)

Lfd. Nr.	Bezeichnung
01	Feldbereich zur Startphase (hohe Methankonzentrationen): Bodenluftabsauganlage (BLA)
02	Feldbereich im Regelbetrieb (Förderung des Schadstoffinventars): Bodenluftabsauganlage (BLA) und rekuperative thermische Oxidationsanlage (RTO-Anlage)
03	Stützgassystem für RTO: Stützgasversorgung (Gastank, Transportleitungen)
04	Heizölversorgung für Dampferzeuger: Heizöltank (Betankungsvorgang, Transportleitungen)
05	Dampferzeuger: Brennstoffsystem
06	Grundwasserförderbrunnen: Bandskimmer

63 Für die Anlagen bzw. Anlagenteile, bei denen die Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre (g. e. A.) nicht sicher ausgeschlossen werden konnte, wurde ein Schutzkonzept erstellt. Dieses bestand aus einer Gefährdungsbeurteilung, den primären, sekundären und tertiären Explosionsschutzmaßnahmen sowie einer, wenn erforderlich, Zoneneinteilung. Das Auftreten einer explosiven Atmosphäre wird in Zone 0 (ständig, über lange Zeiträume oder häufig), Zone 1 (tritt im Normalbetrieb gelegentlich auf) oder Zone 2 aufgeteilt (tritt im Normalbetrieb normalerweise nicht oder nur kurzzeitig auf).

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 3 Thermische Boden- und Grundwassersanierung am Standort Petroleumhafen / 3.1 Umsetzung des Explosionsschutzes

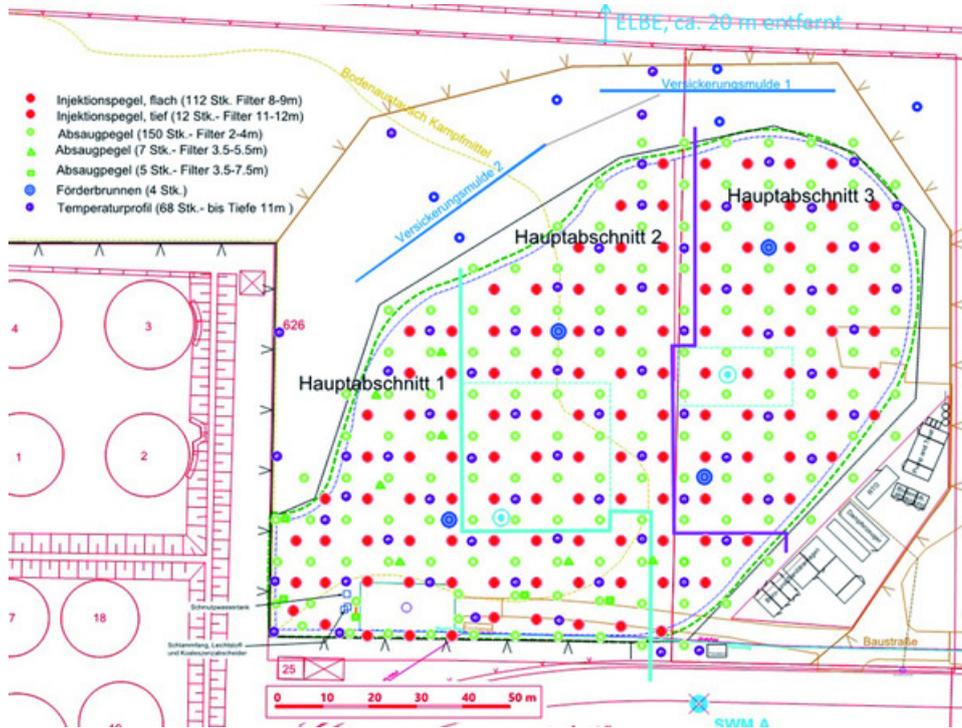
- 64 Als primäre, technische Schutzmaßnahme wurde beim Sanierungsprojekt Petroleumhafen Hamburg über den kompletten Zeitraum ein automatisch gesteuertes Regelsystem adaptiert. Dieses System überwachte maßgeblich Temperaturen, Drücke, Gaskonzentrationen und Durchflüsse. Im Falle einer Betriebsstörung oder durch eine hohe unerwartete Schadstoffkonzentration wirkte das System mit der Erhöhung der Frischluftzufuhr bzw. dem Einstellen der Dampf-Luft-Injektion der Bildung einer g. e. A. entgegen. Das Regelsystem war auf eine Alarmierung bzw. Abschaltung des Systems bei 20 % UEG eingestellt (Abb. 8).
- 65 Die Dichtheit der Rohrleitungssysteme war zu gewährleisten. Ebenso sorgte der Unterdruckbetrieb durch die Bodenluftabsaugung für eine Minimierung der Gefährdung. Die Überwachung des Schadstoffaustrags erfolgte kontinuierlich über automatisierte Messsysteme (Kap. 4.2). Als sekundärer Explosionsschutz wurden u. a. Zündquellen wie heiße Oberflächen, Flammen und heiße Gase, mechanisch erzeugte Funken, elektrische Anlagen, Blitzschlag, adiabatische Kompression (thermodynamische Zustandsänderung ohne Wärmeaustausch), Stoßwellen und strömende Gase beurteilt. Mit Hilfe geeigneter Maßnahmen, wie der Vermeidung von Funken oder einer Temperaturlimitierung von Oberflächen in der Zone 2 konnten diese Gefährdungen minimiert werden.
- 66 Als tertiärer, konstruktiver Explosionsschutz wurde zudem ein Flammenschutzgitter zwischen Bodenluftabsaugung und Abluftreinigung installiert. So hätte auch bei extremen Betriebszuständen mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit ein Rückschlag aus der thermischen Abluftreinigung auf die Bodenluftabsaugaggregate sicher unterbunden werden können. De facto trat dieser Lastfall aufgrund der ersten beiden Explosionsschutzstufen nicht auf.

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 3 Thermische Boden- und Grundwassersanierung am Standort Petroleumhafen / 3.2 Größe der Sanierungsbereiche für das TUBA-Verfahren

3.2 Größe der Sanierungsbereiche für das TUBA-Verfahren

- 67 Der thermisch in-situ zu sanierende Schadensherd hatte eine Grundfläche von rund 10 000 m². Das Gesamtvolumen umfasste etwa 100 000 m³ Boden, was grob 200 000 Tonnen Boden entspricht.
- 68 Bei der Dimensionierung einer Anlage zur thermischen in-situ Sanierung sind Installationsaufwand und Betriebsaufwand aufeinander abzustimmen. Am Petroleumhafen Hamburg wurde daher die Gesamtfläche in drei nacheinander zu sanierende Hauptabschnitte eingeteilt (Abb. 10). Jeder Hauptabschnitt wurde in drei Sanierungsbereiche unterteilt. Es ergaben sich somit insgesamt neun Sanierungsbereiche, die autark betrieben und messtechnisch überwacht wurden.
- 69 Vom Verfahrensprinzip her wurde der in einem Dampferzeuger (Abb. 13, a; rote Pfeile) produzierte Dampf zusammen mit Luft über die tiefeinflussten Druckluft-Injektions-Brunnen in das schadstoffbelastete Grundwasser injiziert (Abb. 13, b; rote Pfeile). Die so aus dem Grundwasser mobilisierten Schadstoffe (Abb. 13, b; „Totenköpfchen“) wurden über die Bodenluftabsaugung (Abb. 13, b; grüne Pfeile) erfasst. Die schadstoffbelastete Bodenluft wurde dann zur Abluftreinigung (Abb. 13, a; RTO), abgeschiedenes Kondensat zur Grundwasserreinigung geleitet. Letztere wurde primär zur Behandlung der Mehrphasenabschöpfung und des geförderten Grundwassers genutzt.
- 70 Durch vorgenannte Untergliederung konnten Baustelleninfrastruktur und Anlagengröße optimiert werden. Der Sanierungsbetrieb erstreckte sich über 17 Monate. Pandemiebedingten (Coronavirus SARS-CoV-2) Einschränkungen musste im Jahr 2020 beim Sanierungsbetrieb, beim Sanierungsmanagement und beim Anlagenrückbau ergänzend Rechnung getragen werden.
- 71 **Abb. 10: Lageplan der thermischen in-situ Sanierung (rot: Dampf-Luft-Injektionspegel, grün: Bodenluftabsaugpegel, lila: Temperaturprofile, blau: Grundwasserbrunnen). (Quelle: reconsite GmbH, 2019, geändert nach [4])**

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 3 Thermische Boden- und Grundwassersanierung am Standort Petroleumhafen / 3.2 Größe der Sanierungsbereiche für das TUBA-Verfahren



Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 3 Thermische Boden- und Grundwassersanierung am Standort Petroleumhafen / 3.3 Dampferzeugung, Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren)

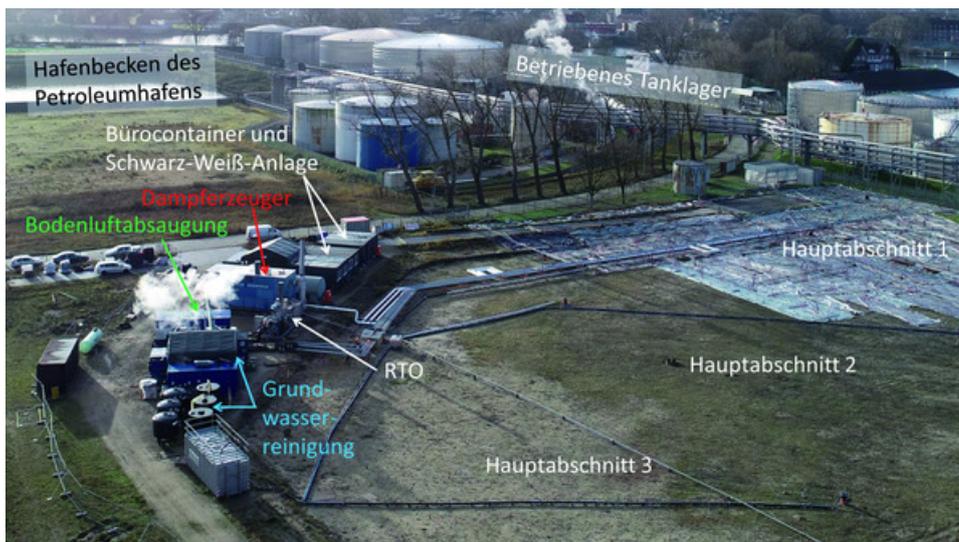
3.3 Dampferzeugung, Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren)

- 72 Für die Dampferzeugung wurde eine mobile Kesselanlage mit einer Leistung von bis zu 10 Tonnen Dampf pro Stunde genutzt. Die Befuerung des Kessels erfolgte über einen Ölbrenner. Als Treibstoffbunker wurde ein mobiler 50 000 Liter Tank mit Leckageüberwachung installiert.
- 73 Der Dampfabgang des Kessels war durch ein Hauptventil gesichert. Nach dem Hauptdampfventil wurde in den Dampfstrom Druckluft injiziert. Der gemischte Dampf-Luft-Strom wurde auf drei Hauptstränge aufgeteilt. Diese Hauptstränge wurden im Sanierungsfeld weiter verzweigt und einzelne Gruppen an Injektionspegeln in unterschiedlichen Sanierungsbereichen angeschlossen. Auf dem etwa 10 000 m² großen Sanierungsfeld waren 124 Injektionsbrunnen im Abstand von 10 m zu einander installiert. Meist waren sie in einer Tiefe zwischen 8-9 m u. GOK verfiltert, in zwei Bereichen jedoch tiefer zwischen 11–12 m u. GOK (3D-Modell Abb. 13, Schnitt Abb. 15).
- 74 Trotz des vorgegebenen gleichmäßigen Brunnenrasters (Abb. 10) ließ sich der Injektionsstrom aufgrund der oben dargestellten Leitungsführung in den unterschiedlichen Betriebsphasen individuell auf die jeweiligen Untergrundverhältnisse in den neun Sanierungsbereichen abstimmen. Aus Sicherheitsgründen war eine Injektion erst möglich, wenn die Bodenluftabsaugung (Kap.3.4) in dem Sanierungsbereich über dem jeweiligen Injektionsbereich in Betrieb war (Abb. 12, Abb. 13).
- 75 Die standortspezifischen Randbedingungen limitierten bereichsweise die injizierbare Dampfmenge. Im Süden und Westen reichte das Sanierungsfeld fast unmittelbar bis an die Grundstücksgrenze. Daher war hier eine besondere Achtsamkeit bei der Einhaltung des zulässigen Energieeintrags geboten. Eine negative Beeinflussung des weiterhin in Betrieb befindlichen Tanklagers im Westen wurde so vermieden (Abb. 10, Abb. 11).
- 76 Ebenso limitierten die hydrogeologischen Verhältnisse lokal und temporär die injizierbare Dampfmenge. Durch die Standortgenese ergab sich ein geschichteter Bodenaufbau (Kap. 1.3). Bereichsweise dominierten ausgedehnte Areale mit geringer hydraulischer Durchlässigkeit (Kap. 4.1). Der Dampf konnte sich hier im oberen Aquifer lateral teilweise über mehrere 10er-Meter ausbreiten. Vertikal verminderte dieser Bodenaufbau einen Dampfaufstieg zu unmittelbar benachbarten BLA-Pegeln. Durch das modulare Injektionsnetz konnte im Betrieb auf verschiedenste Anforderungen flexibel reagiert werden.

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 3 Thermische Boden- und Grundwassersanierung am Standort Petroleumhafen / 3.3 Dampferzeugung, Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren)

77

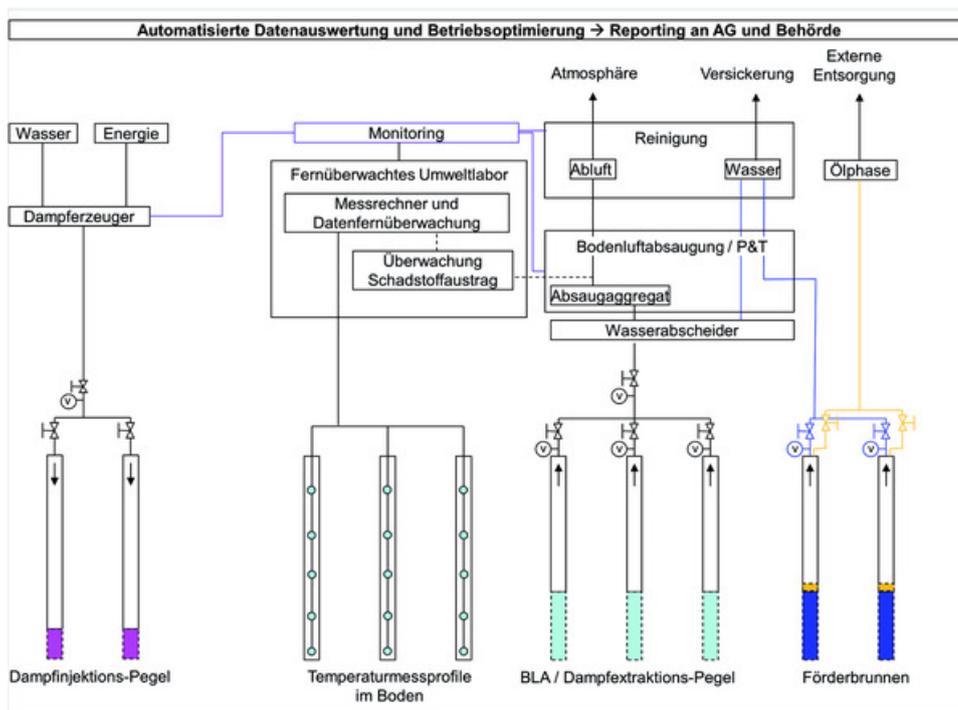
Abb. 11: Luftbild auf die Anlagentechnik der TUBA-Sanierung mit Bürocontainern, Schwarz-Weiß-Anlage, Dampferzeuger, Bodenluftabsaugung, Abluftreinigung (RTO) und Grundwasserreinigung. Oben im Bild das westlich gelegene und während der TUBA-Sanierung weiterhin betriebene Tanklager. (Quelle: reconsite GmbH, 2019)



3.4 Bodenluftabsaugung, Abluftreinigung

- 78 Die Bodenluftabsaugung erfolgte aus mehr als 150 Absaugbrunnen, hauptsächlich verfiltert zwischen 2 und 4 m u. GOK bei einem lateralen Abstand von 10 m zu einander. Die abgesaugte schadstoffbelastete Bodenluft aus den Einzelbrunnen wurde in Sammelsträngen zusammengefasst und an drei Absaugaggregate angeschlossen.
- 79 Die Bodenluftabsaugung wurde so konzipiert, dass ein explosives Gasmisch an den Anlagen und Absaugaggregaten sicher vermieden wurde. Hierzu wurde die abgesaugte Gasatmosphäre kontinuierlich messtechnisch überwacht. Vor jedem Absaugaggregat wurde ein Frischluftventil eingebaut. So konnte der geforderte Mindestdurchfluss durch das Aggregat gewährleistet werden. Ebenso wurde im Bedarfsfall ein zu fettes Gasmisch mit Frischluft verdünnt. Die Ventilregelung erfolgte automatisiert und war fernüberwacht.
- 80 Für eine effiziente Abluftreinigung wurde das Gasmisch zunächst konditioniert, indem die kontaminierte Bodenluft vor der Reinigung getrocknet wurde. Dafür wurden aus dem Volumenstrom saugseitig vor den Bodenluftabsaugaggregaten Flüssigkeit und Kondensat abgeschieden, welches z. B. bei der Kühlung der abgesaugten Bodenluft anfiel. Das Kondensat wurde zunächst in Kondensatabscheidern gesammelt und dann zur Grundwasserreinigungsanlage (Kap. 3.5) gepumpt und dort behandelt (Abb. 12).
- 81 **Abb. 12: Verfahrensschema der TUBA-Sanierung am Standort Petroleumhafen. (Quelle: reconsite GmbH, 2019)**

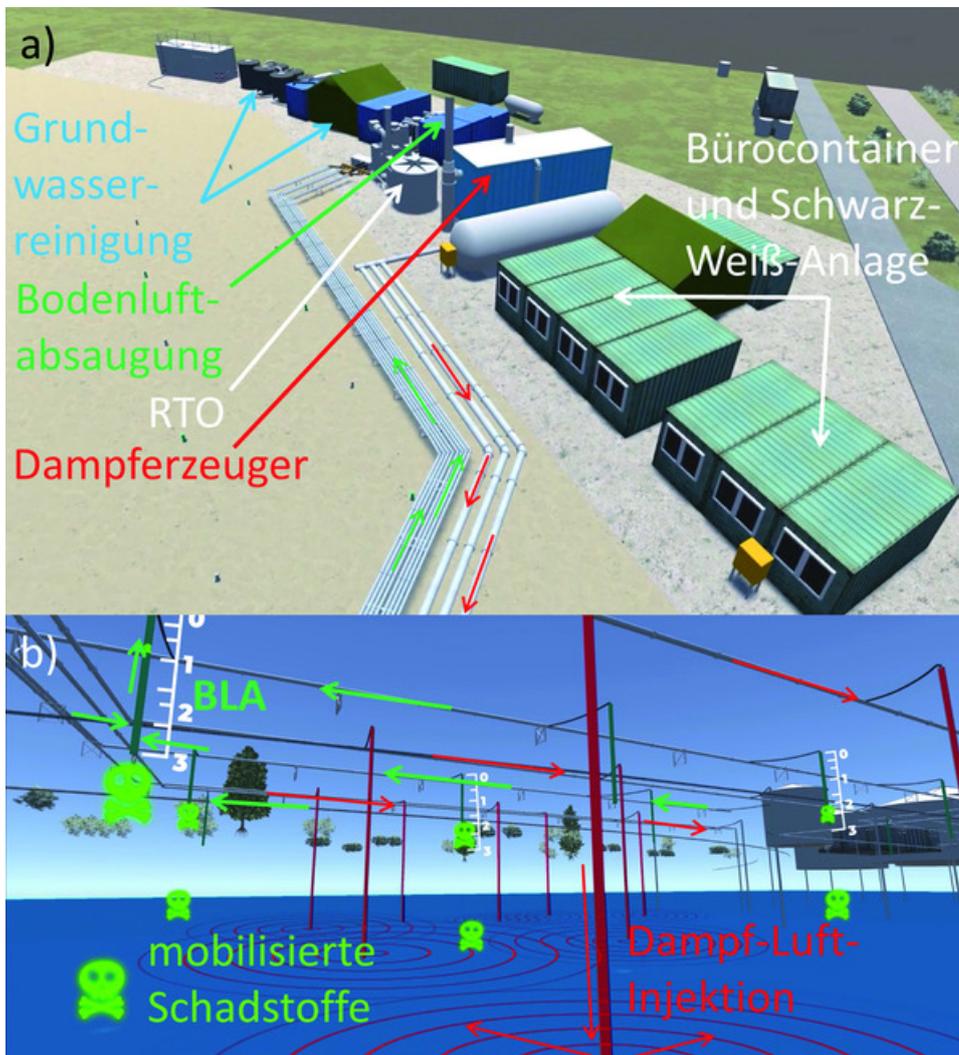
Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 3 Thermische Boden- und Grundwassersanierung am Standort Petroleumhafen / 3.4 Bodenluftabsaugung, Abluftreinigung



82

Abb. 13: 3D-Visualisierung des konzeptionellen Standortmodells mit a) oberirdischer und b) unterirdischer Sanierungsinfrastruktur. Die Dampf-Luft-Injektion (rote Pfeile) erfolgte etwa 3-8 m unter der tidebeeinflussten Grundwasseroberfläche, um die umweltgefährdenden und gesundheitsschädlichen Schadstoffe („Totenköpfchen“) aus dem Grundwasser und dem Kapillarsaum in die ungesättigte Zone zu mobilisieren und dort gezielt abzusaugen (grüne Pfeile). (Quelle: reconsite GmbH, 2020)

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 3 Thermische Boden- und Grundwassersanierung am Standort Petroleumhafen / 3.4 Bodenluftabsaugung, Abluftreinigung



- 83 Aufgrund des immensen Schadstoffinventars war eine kontinuierliche Abluftreinigung erforderlich, die auch bei stark schwankenden Bodenluftkonzentrationen effizient arbeitet. Daher kam eine rekuperative thermische Oxidation (RTO) zum Einsatz. Hierbei wird ein nichtexplosives Gasmisch in einem heißen Keramikbett weitestgehend autotherm und somit sehr energiesparend gereinigt. Nach Erreichen der Einsatztemperatur der RTO wurde ein Freigabesignal an die Bodenluftabsaugung übergeben.
- 84 Bei einem detaillierten Systemtest wurden Schaltzyklen und Signalübergaben zwischen den Systemkomponenten Dampferzeuger, BLA und RTO ausgiebig und bei verschiedensten Szenarien geprüft. Nach Abschluss der erfolgreichen Testserie zur Explosionsschutzüberwachung erfolgte eine Freigabe zur Inbetriebnahme der Sanierungsanlage.

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 3 Thermische Boden- und Grundwassersanierung am Standort Petroleumhafen / 3.5 Grundwasserförderung, Wasserreinigungsanlage

3.5 Grundwasserförderung, Wasserreinigungsanlage

- 85 Für eine hydraulische Abstomsicherung wurden vier Grundwasserbrunnen installiert und betrieben. Aufgrund der hohen Schadstoffmobilisierung in der Bodenluft wurden Brunnenköpfe installiert und auch an die Bodenluftabsaugung angeschlossen.
- 86 Aufgrund der komplexen Wasserchemie vor Ort war eine aufwändige Grundwasserreinigungsanlage notwendig. Hierzu wurde das Wasser zunächst in einen Ölabscheider und von dort in einen Vorlagetank geleitet. Anschließend wurde eine Enteisung und Entmanganung des Wassers durchgeführt. Hierzu wurde das Wasser in verschiedenen Reaktorbehältern mit Chemikalien versetzt. Der anfallende Eisen-/Manganschlamm wurde regelmäßig abgelassen und entsorgt. Über einen weiteren Vorlagetank und einen Gegenstromfilter wurden weitere Schwebstoffe aus dem Wasser abgeschieden.
- 87 Leichtflüchtige, organische Schadstoffe wie BTEX wurden in einer Kombination aus Stripper und Aktivkohle aus dem Wasser entfernt. Das gereinigte Grundwasser aus der Wasserreinigungsanlage wurde zum Erhalt des Wasserhaushalts in zwei Versickerungsrigolen nördlich der Quellsanierung auf dem Gelände eingeleitet und versickert (Abb. 10).

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 3 Thermische Boden- und Grundwassersanierung am Standort Petroleumhafen / 3.6 Automatisierte Datenauswertung und Interpretation

3.6 Automatisierte Datenauswertung und Interpretation

- 88 Beim Betrieb einer thermischen in-situ Sanierung werden üblicherweise auch schon bei kleinen Standorten monatlich Messdatensätze im sechsstelligen Bereich generiert. Diese dienen u. a. der Steuerung und Überwachung der am Standort vorhandenen Anlagenkomponenten, zur Erfassung des Sanierungsfortschritts, zur laufenden Betriebsoptimierung und zur Dokumentation des Sanierungserfolgs.
- 89 Am Standort Petroleumhafen Hamburg wurden u. a. Messdaten zur Steuerung und Überwachung der Grundwasserförderpumpen, der Grundwasserreinigung, der Bodenluftabsauganlagen, der Bodenluftreinigung und der Dampf-Luft-Injektion generiert. Die Schadstoffkonzentrationen in der Bodenluft wurden über automatisierte Probenahmen und Vor-Ort-Analysen quantifiziert. Die Schadstoffrückgewinnung aus dem Untergrund wurde automatisiert bilanziert.
- 90 Anhand von Temperaturmessprofilen im Sanierungsfeld wurde die Boden- und Grundwassererwärmung gemessen und zur Optimierung des Sanierungsbetriebs in der jeweiligen Betriebsphase kontinuierlich genutzt (s. auch Kap. 4.2). Ein vertiefendes Verständnis der Prozesse bei der Mehrphasenhydraulik erleichtert hierbei das Sanierungsmanagement (s. Kap. 5).
- 91 Insgesamt wurden hier pro Monat über 1 Millionen Datensätze generiert und verarbeitet. Hierzu wurde eine eigens hierfür von der reconsite GmbH entwickelte, webbasierte Datenmanagementsoftware genutzt. Mit dieser Software werden Messdaten qualitätsgesichert validiert, visualisiert und stundenaktuell den Projektbearbeitenden und Schichtleitenden zur Verfügung gestellt, um einen sicheren und effizienten 24/7-Sanierungsbetrieb zu gewährleisten.

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 3 Thermische Boden- und Grundwassersanierung am Standort Petroleumhafen / 3.7 Arbeitsschutz

3.7 Arbeitsschutz

- 92 Eine Schwarz-Weiß-Anlage (Abb. 11, Abb. 13) ist bei Arbeiten im kontaminierten Bereich obligatorisch, um den erforderlichen Arbeitsschutz einzuhalten. Bei thermischen in-situ Sanierungen kann ein unmittelbarer Kontakt mit den Schadstoffen maßgeblich bei den Bohrarbeiten erfolgen. Beim Petroleumhafen Hamburg wurden daher alle Bohrungen in einer Kampagne abgeteuft. Hierzu arbeiteten mehrere Bohrergeräte und Bohrkolonnen zeitgleich, um den engen Zeitplan einzuhalten.
- 93 Beim Sanierungsbetrieb kann ein Kontakt zu Schadstoffen maßgeblich noch bei Wartungsarbeiten an den Sanierungsanlagen erfolgen. Bei der normalen Betriebsüberwachung und Betriebsoptimierung ist üblicherweise kein erhöhter Arbeitsschutz erforderlich, da die Schadstoffe in einem geschlossenen Kreislauf zu den Reinigungsstufen geführt werden.

4 Erkenntnisse aus dem Sanierungsbetrieb

4.1

Erweiterung des konzeptionellen Standortmodells

- 94 Standorterkundungen unterliegen, gerade bei großen Standorten, einer gewissen Unschärfe. Eine Verdichtung der Erkenntnisse zum Standortbild im Zuge der Installation der Sanierungsbrunnen ist daher angeraten [17]. Daher erfolgte während der Bohrarbeiten für die Sanierungsinstallationen eine vereinfachte Quantifizierung der Schadstoffbelastungen. Je gebohrtem Meter wurde die Schadstoffbelastung halbquantitativ nach organoleptischen und visuellen Kriterien erfasst und dokumentiert (insgesamt 2 068 Proben). Für beide Kriterien wurde eine Skala von 0 (unauffällig) bis 3 (stark auffällig) konzipiert (Tab. 3).
- 95 Organoleptisch unauffällig waren 626 Proben, vornehmlich im oberflächennahen Bereich. Bei etwa gleichvielen Proben (632 | 31 %) war ein schwacher Geruch wahrnehmbar, der zumeist auch mit visuellen Auffälligkeiten einher ging. Die meisten Proben wiesen einen deutlichen Geruch auf (800 | 39 %), der zumeist mit deutlichen (676 | 33 %) oder starken (108) visuellen Auffälligkeiten einher ging. Ein starker, bisweilen extremer Geruch war bei 10 Proben feststellbar.
- 96 Die lokale Verteilung der Schadstoffe vor der Altlastensanierung ist in Abb. 14 vereinfacht dargestellt. Der oberflächennahe Bereich war meist nicht belastet, was durch die vorausgegangene Kampfmittelbeseitigung bedingt war (Kap. 1.2). Ab etwa 5 m u. GOK (Grundwasserschwankungsbereich) nahmen die Belastungen deutlich zu. Die maßgeblichen Belastungen befanden sich in den oberen vier Metern des Grundwasserkörpers, also zwischen 5 und 9 m u. GOK (Abb. 14).

97

Tab. 3: Nomenklatur bei der halbquantitativen Charakterisierung der Schadstoffverteilung. (Quelle: reconsite GmbH, 2019)

Feldansprache	Geruch	visuellen Auffälligkeiten
o keine organolept. Auffälligk.	G00 kein G.	V00 keine
+ weniger stark	G10 G. schwach	V01 schwach
++ stark	G20 G. deutlich	V02 deutlich
+++ sehr stark	G30 G. stark	V03 stark

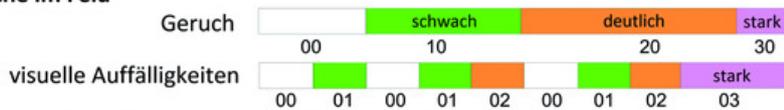
Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 4 Erkenntnisse aus dem Sanierungsbetrieb / 4.1 Erweiterung des konzeptionellen Standortmodells

98

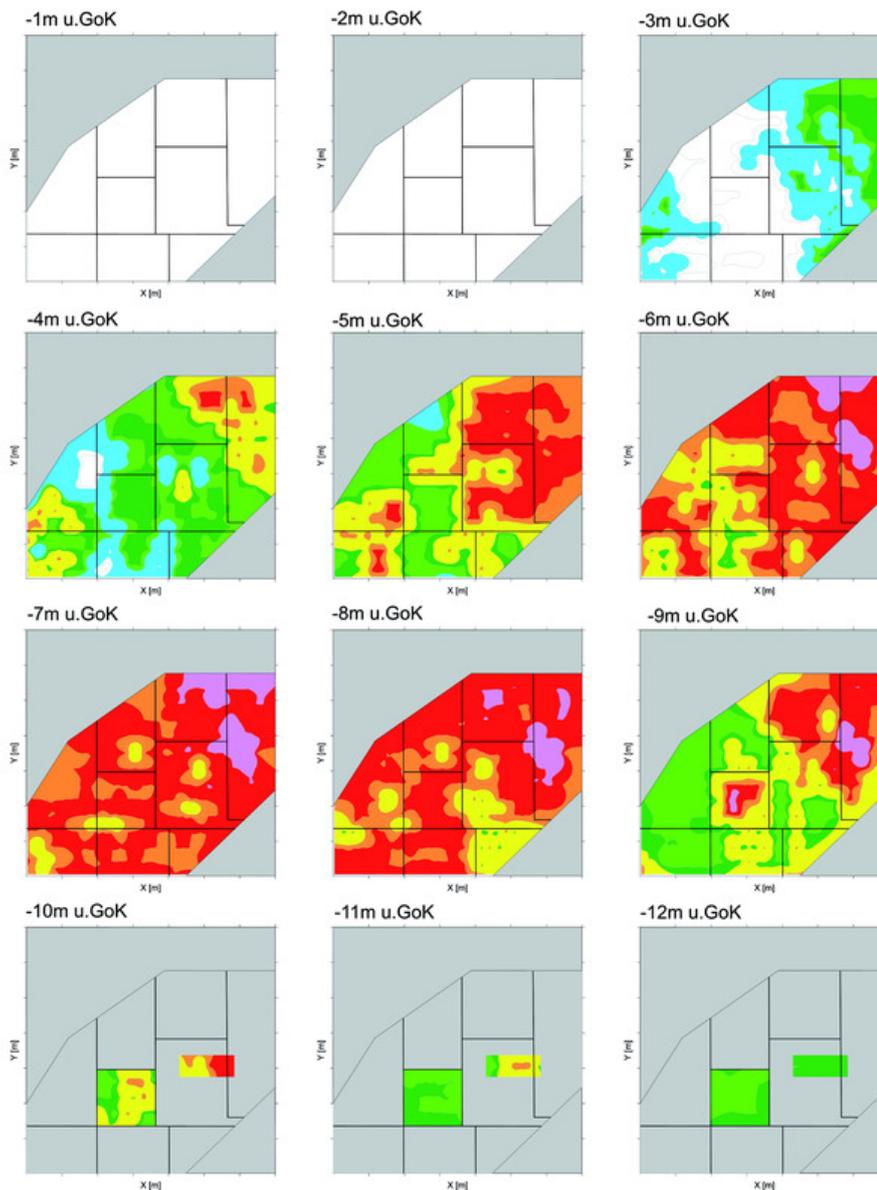
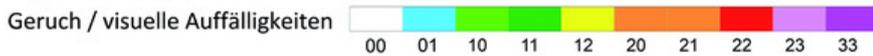
Abb. 14: Visualisierung der Schadstoffbelastung vor der TISS mit dem TUBA-Verfahren anhand der organoleptischen Auffälligkeiten während der Bohrarbeiten (1. Ziffer: Geruch, 2. Ziffer: visuelle Auffälligkeit). (Quelle: reconsite GmbH, 2019)

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumphafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 4 Erkenntnisse aus dem Sanierungsbetrieb / 4.1 Erweiterung des konzeptionellen Standortmodells

Ansprache im Feld



Legende für Lagepläne

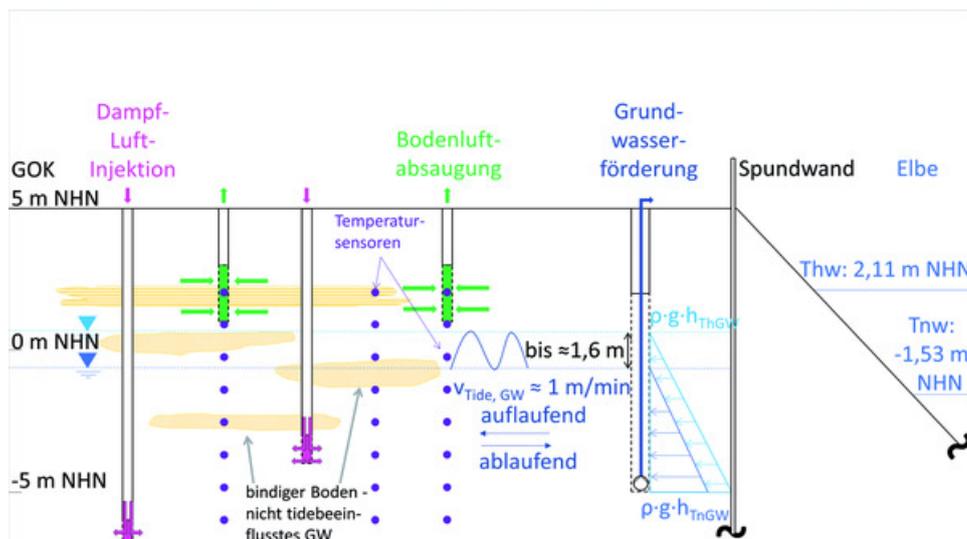


4.2 Anströmung der Bodenluftabsaugpegel

- 99 Bei thermischen in-situ Sanierungsverfahren lässt sich die Anströmung von Bodenluftabsaugpegeln gut über die Interpretation der Temperaturverteilung im Boden und Grundwasser überwachen (Abb. 10). In Abbildung 15 ist die vertikale Anordnung der Bodenluftabsaugpegel, der Dampf-Luft-Injektionspegel und der Temperatursensoren dargestellt.
- 100 Bei der thermischen Quellensanierung am Petroleumhafen wurden insgesamt 43 Temperaturmessprofile installiert. Die Temperatursensoren waren zwischen 2,95 m und 11 m im Abstand von 1,15 m angeordnet. Beim Sanierungsbetrieb wurde die Untergrunderwärmung kontinuierlich mit automatisierten, fernüberwachten Messsystemen erfasst und interpretiert. Mittels eines automatisierten Datenmanagementsystems werden gemessene Temperaturen unter anderem als Ganglinien über die Zeit oder als Temperaturprofile über die Tiefe dargestellt (Abb. 16 und Abb. 18). Ebenso werden die Temperaturmessungen für weiterführende Auswertungen genutzt, von denen einige nachfolgend erläutert werden.

101

Abb. 15: Schematischer Schnitt zu Erläuterung der dominierenden Sanierungsprozesse im tidebeeinflussten Aquifer (ThGW = Hochwasser im Grundwasser, TnGW = Niedrigwasser im Grundwasser. (Quelle: reconsite GmbH 2019, Wasserstände der Elbe aus [18])



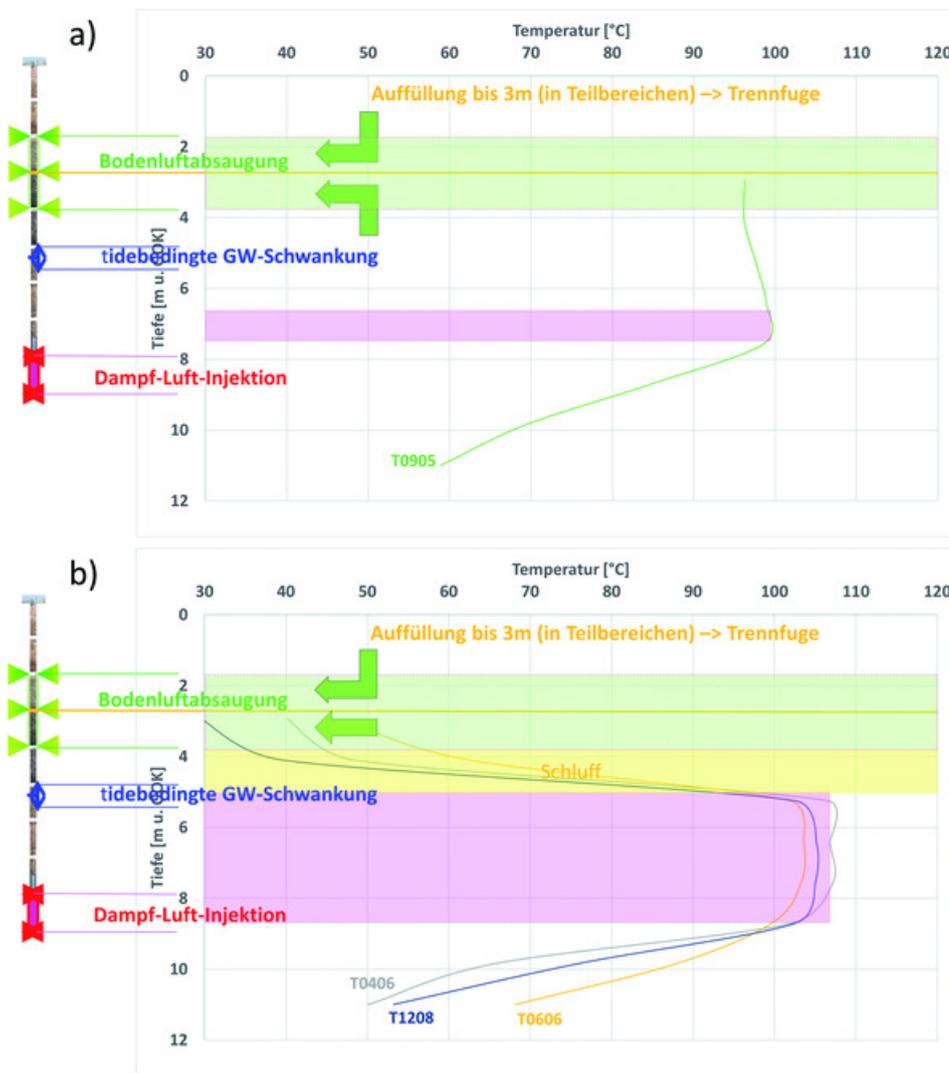
- 102 Über die Temperaturprofile konnte während des Sanierungsbetriebs überwacht werden, ob der Dampf, und damit die verdampften Schadstoffe,

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 4 Erkenntnisse aus dem Sanierungsbetrieb / 4.2 Anströmung der Bodenluftabsaugpegel

auf direktem Weg von der Bodenluftabsaugung erfasst werden konnten oder ob geringdurchlässige Bodenschichten den Strömungsweg verlängerten. Geringer durchlässige Bodenschichten ließen sich bei hohen Temperaturen gut bis sehr gut anhand des vertikalen Temperaturverlaufs erkennen (Abb. 16 b).

- 103 Beim Petroleumhafen waren hierfür die Messfühler in 2,95 m u. GOK (Mitte der Filterstrecke der Bodenluftabsaugung), 4,10 m u. GOK (Unterkante Bodenluftabsaugpegel) und 5,25 m u. GOK (Grundwasserwechselzone) besonders interessant. Schematisch sind die Dampf-injektionsbrunnen und Bodenluftabsaugpegel in Abb. 15 dargestellt. Auf tidebedingte Einflüsse wird in Kapitel 5 separat eingegangen.
- 104 Bei einem weitestgehend sandigen Bodenaufbau konnte der Dampf ohne nennenswerte Störungen von der gesättigten in die ungesättigte Bodenzone aufsteigen (Abb. 16 a). Entsprechend schnell verlief der Austrag verdampfter Schadstoffe über die Bodenluftabsaugung. Bereichsweise ergaben sich aber in vorgenannter Tiefe auch vertikale Temperaturgradienten mit teilweise mehreren 10er Kelvin Temperaturabfall (Abb. 16 b).
- 105 Dieser starke Temperaturabfall in Strömungsrichtung, also von unten nach oben gerichtet, war durch Bodenschichten mit erheblich geringerer Durchlässigkeit bedingt. Entsprechend zeigte sich im Sanierungsverlauf der Dampf-Luft-Injektion, dass der Dampf im Bereich dieser Bodenschichten nicht ungehindert zu den Bodenluftabsaugpegel in unmittelbarer Nähe aufsteigen konnte. Die gering durchlässige Schicht, meist Schluff, unterband eine direkte Anströmung der Bodenluftpegel aus tieferliegenden Schichten (Abb. 16). Lokal konnte sich der Dampf dadurch im Bereich des oberen Aquifers lateral über mehrere 10er-Meter ausbreiten und war im vertikalen Aufstieg behindert. An gut durchlässigen Stellen kam es lokal zu plötzlichen Dampfdurchbrüchen in die ungesättigte Zone.
- 106 **Abb. 16: Temperatúrausbreitung a) normal, b) mit Schluffschicht etwa zwischen 4 und 5 m u. GOK. (Quelle: reconsite GmbH, 2020)**

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 4 Erkenntnisse aus dem Sanierungsbetrieb / 4.2 Anströmung der Bodenluftabsaugung



107 Begleitend zum Sanierungsbetrieb wurde daher das konzeptionelle Standortmodell weiterentwickelt. Hierbei wurden die Gradienten der Temperaturmessungen als „Thermotracer“ genutzt, um die Durchlässigkeit zwischen Grundwasserwechselzone und Unterkante der Bodenluftabsaugung besser zu charakterisieren. Die sukzessiv bis zum Projektende hierfür entwickelte Karte zeigt Abbildung 17.

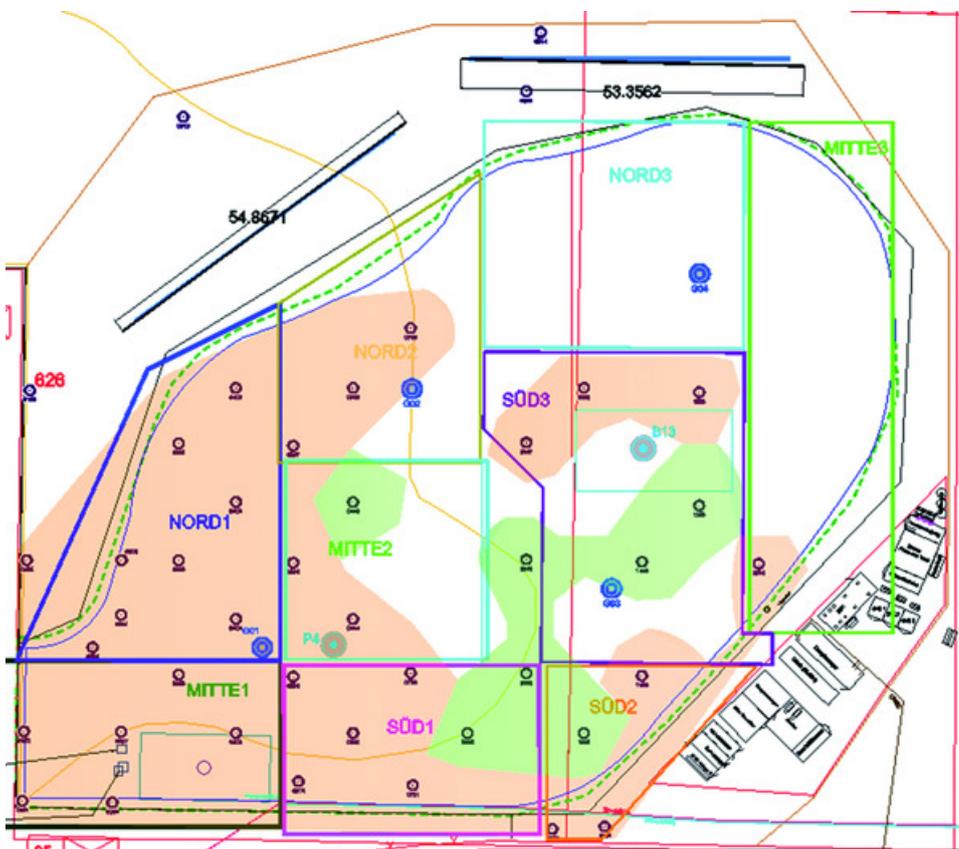
108 Dieses verbesserte, konzeptionelle Standortmodell bildete zusammen mit den gemessenen Schadstoffausträgern die Basis für das Sanierungsmanagement. Anhand dieser Datensätze wurde der Betrieb der Bodenluftabsaugung in dem jeweiligen Sanierungsbereich angepasst. Bereits hinreichend erhitzte und abgereinigte Bereiche wurden identifiziert. Der bislang erreichte Sanierungserfolg in einem Sanierungsbereich wurde, teils unter Zuhilfenahme von Modellabschätzungen, bewertet [19]. Nach

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 4 Erkenntnisse aus dem Sanierungsbetrieb / 4.2 Anströmung der Bodenluftabsaugpegel

Rücksprache mit den Projektbeteiligten wurden dann einvernehmlich Sanierungsbereiche oder Teile davon außer Betrieb genommen. Das Sanierungsequipment wurde in diesen Bereichen abgebaut und in anderen, noch zu sanierenden Bereichen, wieder installiert.

109

Abb. 17: Bereiche mit besonders geringer (orange) und besonders hoher (grün) Durchlässigkeit unmittelbar unterhalb der Bodenluftabsaugpegel, ermittelt aus den vertikalen Temperaturgradienten zwischen 4,10 und 5,25 m u. GOK. (Quelle: reconsite GmbH, 2019/2020)



4.3 Sanierungsfortschritt an der Dampfausbreitung im Grundwasser erkennen

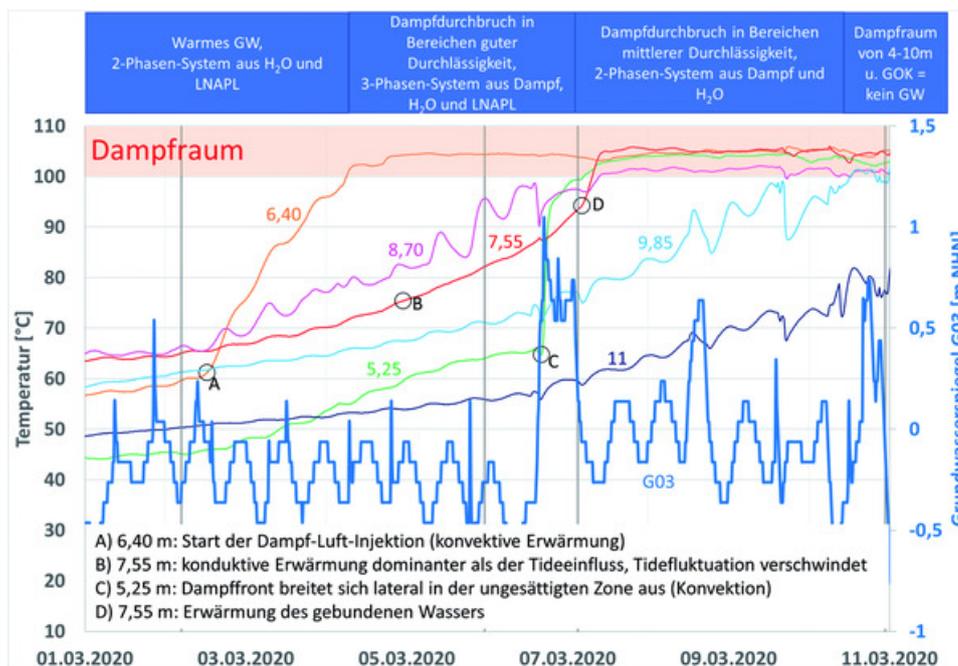
- 110 Die Temperaturdaten ermöglichen ein Verständnis der thermodynamischen, hydraulischen und pneumatischen Prozesse. Vereinfachend werden einige Prozesse anhand der Entwicklungen im Profil 0606 (Lageplan Abb. 24) in einem Zeitraum von 9 Tagen erläutert (Abb. 18 und Abb. 19). In Abbildung 18 sind die Temperaturen im Grundwasser und in der Grundwasserwechselzone (5,25 m u. GOK) über die Zeit dargestellt und um die Grundwasserstände im G03 ergänzt. Der Dampfraum ist vereinfachend ab 100 °C markiert.
- 111 Das Grundwasser ist bereits durch vorherige Dampfinkjektionen erwärmt. Thermisch induzierte Desorptionsprozesse im Aquifer haben also schon stattgefunden (vgl. auch [20]). Die beginnende Dampfinkjektion (Markierung A in Abb. 18) breitet sich zunächst besonders gut in einer Tiefe von 6,40 m aus. Es erfolgt eine weitere Erwärmung von Wasser und Schadstoffphase. Dampf kommt im Bereich des Temperaturmessprofils noch nicht an. Er kondensiert zwischen Injektionsbrunnen und Messprofil. Ein Temperaturprofil über die Tiefe vom 02.03.2020 (Abb. 19) verdeutlicht die Daten aus Abbildung 18. Die Erwärmung in den anderen Tiefen ist noch langsam. Die Schluffschicht (Abb. 19, Profil vom 02.03.2020) ist in den Temperaturdaten noch nicht erkennbar, da die Temperaturen bei 7,55 m und 8,70 m noch annähernd gleich sind. Tideeffekte wirken sich noch auf die Temperatureausbreitung aus und sind in den Ganglinien als schwankende Temperaturen erkennbar (Details s. Kapitel 5).
- 112 Die Dampffront erreicht das Temperaturmessprofil zuerst in der Tiefe von 6,40 m. Über die Profiltiefe gibt es nun Bereiche mit Dampf, Wasser und Schadstoffphase. Die Mächtigkeit der Dampfschicht ist aus den interpolierten Temperaturdaten in Abbildung 19 als Schnitt zur 100 °C-Linie angedeutet. Die Erwärmung in 8,70 m erfolgt aufgrund einer besseren Durchlässigkeit deutlich schneller als in 7,55 m (Markierung B in Abb. 18). Der Bereich bei 7,55 m kann als Schluffschicht identifiziert werden (Abb. 19, Profil vom 05.03.2020), die von den darüber und darunter liegenden, heißen Bereichen über Wärmeleitung erhitzt wird (Abb. 19, Profil vom 07.03.2020).
- 113 Die kurzzeitige Unterbrechung der Grundwasserförderung (Markierung C in Abb. 18) bewirkte einen Grundwasseranstieg mit heißem Wasser in die Grundwasserwechselzone. Die laterale Dampfausbreitung wird mit fallendem Grundwasserspiegel begünstigt, da die erforderliche Energie zur Bildung eines Dampfraums nur noch gering ist. Im Fortgang erhitzen

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 4 Erkenntnisse aus dem Sanierungsbetrieb / 4.3 Sanierungsfortschritt an der Dampfausbreitung im Grundwasser erkennen

sich auch die Tiefen 7,55 m und 8,70 m u. GOK auf Temperaturen über 100 °C (Markierung D in Abb. 18). Im Bereich grob zwischen 5 m und 9 m u. GOK hat sich ein Dampfraum ausgebildet. Auch in der Schluffschicht vorliegendes Wasser siedet (Abb. 19, Profil vom 10.03.2020).

- 114 Schadstoffphase ist hier also längst nicht mehr präsent. Darunter befindet sich warmes Grundwasser, das durch die Dampf-Luft-Injektion permanent gestrippt wird. Ein signifikantes Schadstoffinventar ist daher zu diesem Zeitpunkt im Umfeld des Profils 0606 auch in der Tiefe unterhalb von 10 m nicht mehr vorhanden, zumal die initialen Belastungen hier nur geringe Auffälligkeiten zeigten (vgl. Abb. 14 in den entsprechenden Tiefen).
- 115 Die fortgesetzte Dampf injektion bewirkte die Erwärmung lateral weiter entfernter Bereiche. Die Dampf front breitete sich schließlich bis zum Sensor bei 9,85 m aus (Abb. 18, 11.03.2020), so dass ein vollständiger Dampfraum grob von 4 bis 10 m u. GOK entstand (Abb. 19, Profil vom 10.03.2020). Grundwasser ist hier also nicht mehr vorhanden.

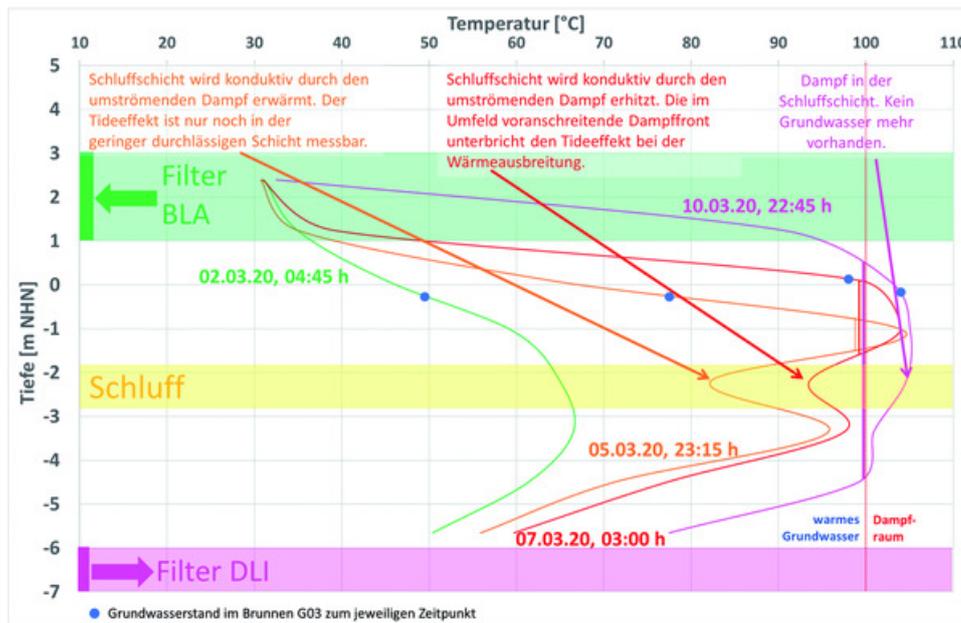
116 **Abb. 18: Temperaturverlauf des Profils 0606 über die gesamte Sanierungstiefe, sowie der Grundwasserspiegel des Sanierungsbrunnens G03 (graue vertikale Linien: Zeitpunkte der Temperaturverteilung in Abb. 19). (Quelle: reconsite GmbH, 2020)**



Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 4 Erkenntnisse aus dem Sanierungsbetrieb / 4.3 Sanierungsfortschritt an der Dampfausbreitung im Grundwasser erkennen

117

Abb. 19: Dampfausbreitung im Profil 0606 innerhalb von neun Tagen. (Quelle: reconsite GmbH, 2020)

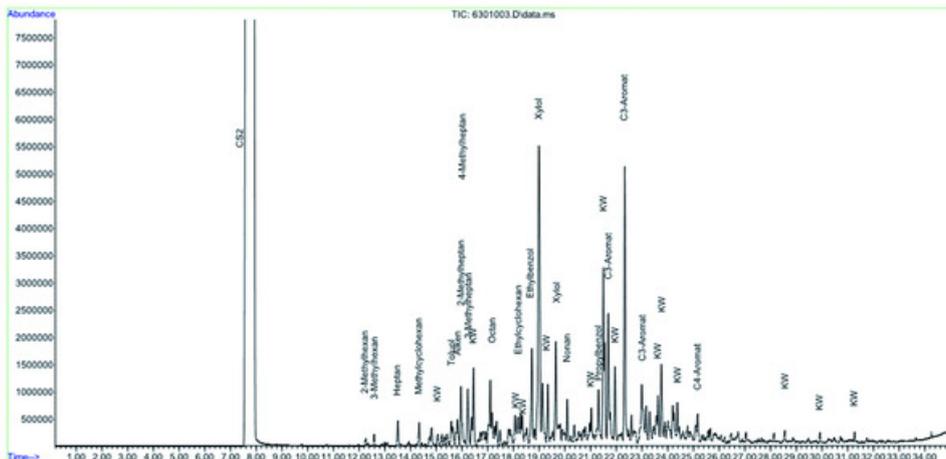


4.4 Quantifizierung des Schadstoffaustrags

- 118 Die Auswertung des Schadstoffaustrags erfolgte anhand der Daten eines online-GC-PID (Gaschromatograph mit Photoionisations-Detektor) und eines Summen-FID (Flammenionisationsdetektor) automatisiert in der entwickelten Datenmanagementsoftware. Die Messungen wurden von n-Pentan, n-Hexan und nicht spezifizierten Kohlenwasserstoffen (kwx) dominiert. Das komplexe Schadstoffgemisch wurde im laufenden Betrieb zunächst in Methanäquivalente als Summenparameter umgerechnet. Hierdurch ergibt sich eine gewisse Bilanzierungstoleranz, da sich die stoffspezifische Zusammensetzung des extrahierten Schadstoffgemisches räumlich und zeitlich beim Sanierungsbetrieb veränderte.
- 119 Das Chromatogramm veranschaulicht das breite Schadstoffspektrum (Abb. 20). Der volatile Schadstoffcocktail setzte sich unter anderen zusammen aus Methylhexan, Methylcyclohexan, Ethylcyclohexan, Heptan, Methylheptan, Toluol, Ethylbenzol, Xylol, Propylbenzol, C3- und C4-Aromaten und vielen weiteren nicht spezifizierten Kohlenwasserstoffen (KW).
- 120 Es ergab sich ein Gesamtaustrag von über 280 t Benzin-KW, was über 330 t Methanäquivalente entspräche. Mit dem GC-PID ließen sich differenzierter 5,4 t n-Pentan, 14,3 t n-Hexan, 14 t BTEX sowie 133,6 t kwx bilanzieren. Die Differenz der GC-PID Bilanz von rund 167 t zum Gesamtaustrag von über 280 t Benzin-KW ergibt sich aus der Sensitivität des GC, der länger-kettige Kohlenwasserstoffe nicht erfasst.
- 121 **Abb. 20: Exemplarisches Chromatogramm der geförderten Bodenluft, resultierend aus der verdampften Leichtphase am Petroleumhafen Hamburg. (Quelle: reconsite GmbH, 2019)**

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 4 Erkenntnisse aus dem Sanierungsbetrieb / 4.4 Quantifizierung des Schadstoffauftrags

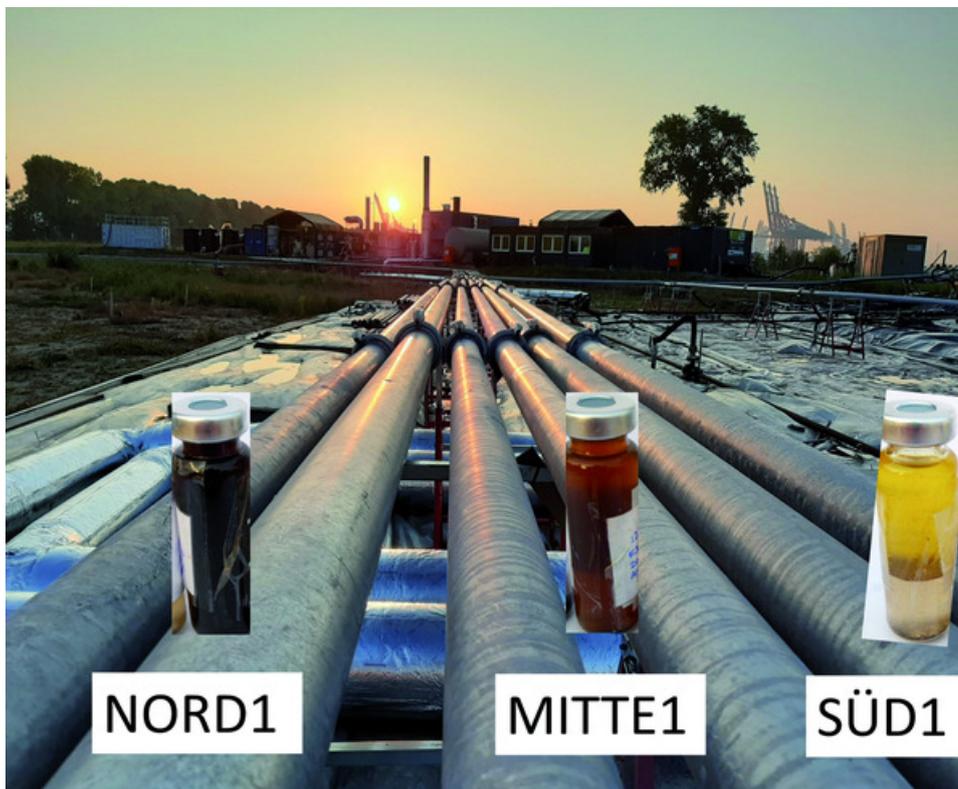
File :Y:\Aktuell\GC\GC10\04Data2019\Oktober2019\01Okt\6301003.D
 Operator : GC 10 / hk
 Acquired : 4 Oct 2019 9:12 using AcqMethod CBSC16.M
 Instrument : Instrument #1
 Sample Name: F-19516403-005
 Misc Info :
 Vial Number: 63



122 Vor der thermischen Sanierung wurde keine standortspezifische Pilotierung mit dem TUBA-Verfahren durchgeführt. Dies stellte sich während der Sanierung als sinnvoll heraus, da die Verteilung der Schadstoffe und die hydrogeologischen Bedingungen selbst innerhalb der Sanierungsbereiche teils sehr unterschiedlich waren. Ähnliche Bedingungen wurden für eine durchschnittliche Fläche von etwa 500 m² festgestellt, was in der Regel etwa oder weniger als der Hälfte eines Sanierungsbereichs entsprach. Exemplarisch ist das Kondensat aus der Bodenluft aus drei Sanierungsbereichen des ersten Hauptabschnitts in Abbildung 21 dargestellt.

123 **Abb. 21: Zusammensetzung der geförderten Ölphase aus drei Sanierungsbereichen am Petroleumhafen Hamburg. Im Vordergrund die Bodenluftabsaugleitungen aus verschiedenen Sanierungsbereichen, im Hintergrund die TUBA-Sanierungsanlage (v. l. n. r.) mit Grundwasserreinigungsanlage, BLA und RTO (unter der Sonne) sowie Dampferzeuger (langer Schornstein), Büro und Schwarz-Weiß-Anlage. (Quelle: reconsite GmbH, 2019)**

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 4 Erkenntnisse aus dem Sanierungsbetrieb / 4.4 Quantifizierung des Schadstoffaustrags



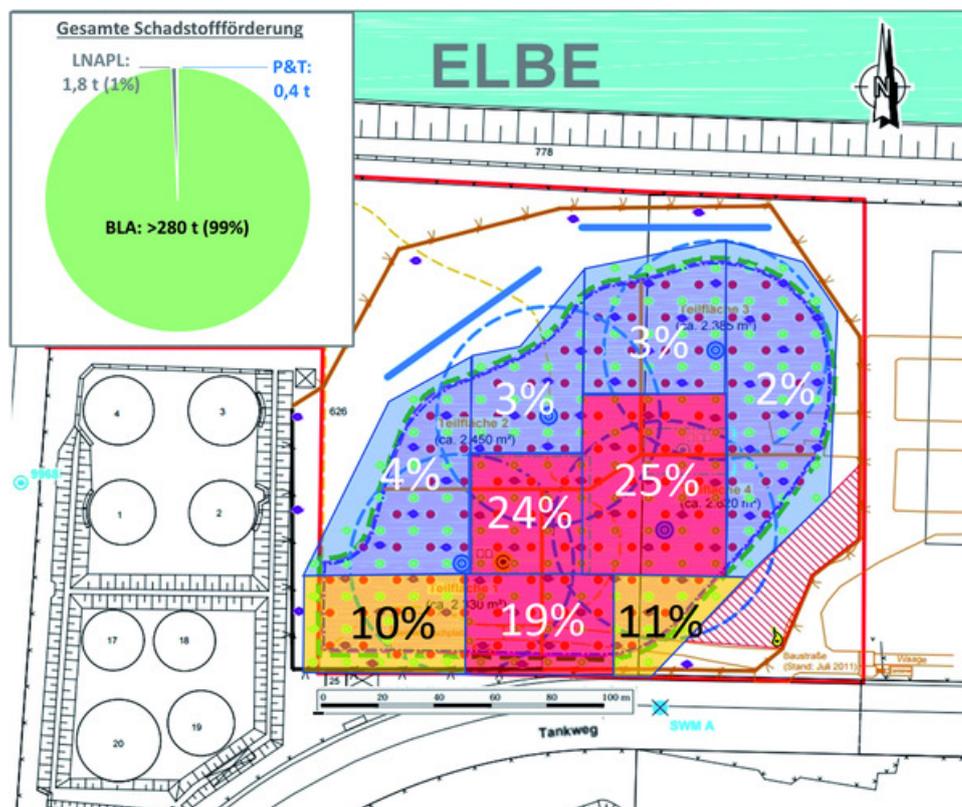
- 124 Für die hydraulische Abstomsicherung wurden etwa 10 800 m³ Wasser gefördert und über die Wasserreinigungsanlage gereinigt. Hierbei wurden ca. 403 kg Schadstoff (17 % Kohlenwasserstoffe, 24 % Benzin-KW, 44 % BTEX, 13 % C3-Aromaten, 2 % PAK) aus dem geförderten Grundwasser und dem Kondensat entfernt. Dies entspricht etwa 0,1 % der insgesamt geförderten Schadstoffmenge. Die Gesamtaustragsleistung der Grundwasserreinigungsanlage (400 kg) nach 17 Monaten entsprach grob der Förderleistung der Bodenluftabsaugung in ca. 18 Stunden (mittlere Förderrate > 520 kg/d).
- 125 Im Rahmen der auftraggeberseitigen Abschlussbeprobung des Sanierungsfeldes etwa ein Jahr nach Beendigung des Sanierungsbetriebs wurden lokal noch Temperaturen von > 37 °C gemessen [5]. Anhand der hierbei ermittelten Restgehalte im Boden und der Bodenluft erfolgte eine Umrechnung der Methanäquivalente in Benzin-KW.
- 126 Der Gesamtschadstoffaustrag wurde mit diesen Werten final auf ca. 280 t Benzin-KW bilanziert [5]. Damit wurden rund 80 t mehr Schadstoffe aus dem Untergrund entfernt, als vor der Sanierung als Gesamtschadstoffinventar abgeschätzt worden war. Der Schadstoffaustrag erfolgte fast ausschließlich über die Bodenluftabsaugung (Abb. 22). Die hydraulische Abstomsicherung darf in diesem Kontext in der

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 4 Erkenntnisse aus dem Sanierungsbetrieb / 4.4 Quantifizierung des Schadstoffaustrags

Projektbewertung als irrelevant für den Schadstoffaustrag bewertet werden. Der Großteil des Schadstoffaustrags (88 %) erfolgt aus rund 60 % der Sanierungsfläche (Abb. 22, Summe der roten und gelben Sanierungsbereiche).

127

Abb. 22: Zuordnung des Schadstoffaustrags von über 280 t Benzin-KW aus der thermischen Grundwassersanierung mit dem TUBA-Verfahren. Oben links: Zuordnung je Fördersystemen. Lageplan: Zuordnung je Sanierungsbereich. (Quelle: reconsite GmbH, 2022)



5 Tideeinfluss auf die Sanierungsdynamik/Besondere technische Herausforderungen

5.1

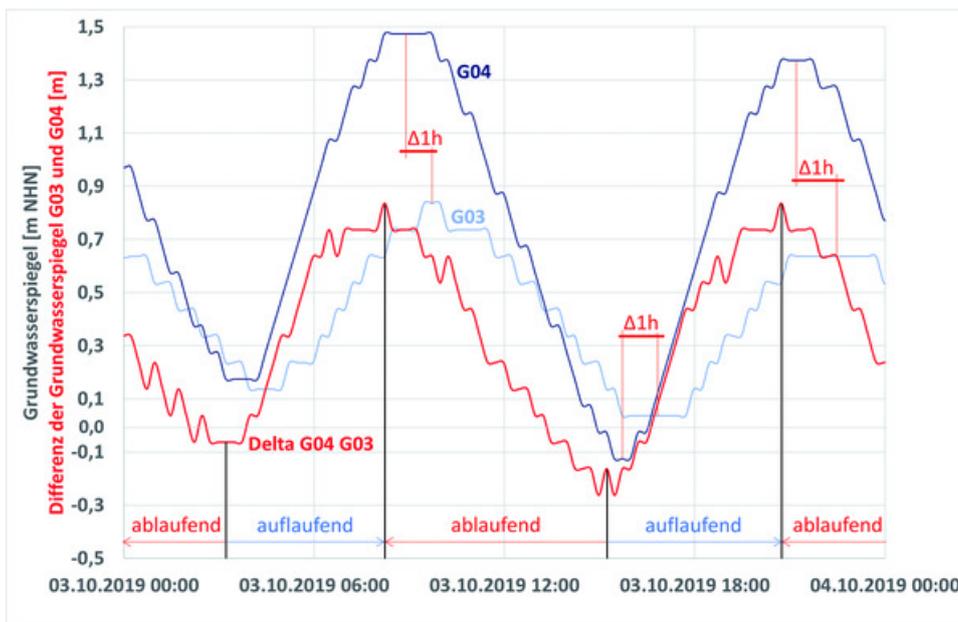
Tidebedingte Grundwasserdynamik

- 128 Der zu sanierende Schadensherd befand sich unmittelbar neben der Elbe. Trotz der umlaufenden Spundwand zwischen Elbe und ehemaligem Tanklager war der Grundwasserspiegel den Gezeiten (Tiden) ausgesetzt.
- 129 Der mittlere Tidenhub in der Elbe bei Hamburg beträgt etwa 3,66 m und der Gezeitenstrom bewegt sich mit rund 75 m/min [21]. In den Grundwasserbrunnen wurden diese Schwankungen des Grundwasserspiegels im Sanierungsfeld mittels Datenloggern aufgezeichnet. Für die Auswertung der Daten wird nachfolgend ein Datensatz analysiert, bei dem eine Grundwasserförderung nicht in Betrieb war (Abb. 23). Der Abstand zur Elbe betrug beim Brunnen G04 rund 65 m, beim Brunnen G03 rund 115 m. Erwartungsgemäß war der Tidehub im Grundwasser in Elbenähe (G04) mit 1,3–1,4 m höher und dämpfte sich mit steigender Entfernung zur Elbe auf 0,5 m ab (G03, Abb. 24).
- 130 Die beiden Grundwasserbrunnen G03 und G04 waren etwa 60 m voneinander entfernt. Eine Überlagerung der Grundwasserstände verdeutlicht die tidebedingte Grundwasserschwankung (Abb. 23). Aus dem Beispiel ergibt sich ein zeitlicher Versatz der beiden Tidewellen von etwa einer Stunde, was grob einer Geschwindigkeit der Gezeiten im Grundwasser von 1 m/min entspricht. Erwartungsgemäß dämpfen somit nicht nur die umlaufende Spundwand, sondern auch der Bodenkörper die Amplitude der Wellenbewegung und ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Aus der Differenz der Grundwasserstände und dem Abstand der Brunnen ergibt sich der Gradient und das Verständnis, ob die tidebedingte Grundwasserwelle im Sanierungsbereich auf- oder ablaufend war.
- 131 Ein Verständnis des Tideeinflusses auf die Grundwasserdynamik ist für das Anlagendesign, die Sicherheitseinrichtungen und das Sanierungsmanagement unerlässlich. Die Grundwasserdynamik bewirkt ständig wechselnde Druckverhältnisse an einem Dampf-Luft-Injektionspegel sowie sich ändernde Grundwassergradienten und Fließrichtungen.

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 5 Tideinfluss auf die Sanierungsdynamik/Besondere technische Herausforderungen / 5.1 Tidebedingte Grundwasserdynamik

132

Abb. 23: Grundwasserspiegel in den Sanierungsbrunnen G03 und G04 (Entfernung zueinander rund 60 m) sowie die Differenz zwischen beiden Grundwasserspiegeln. (Quelle: reconsite GmbH, 2019)



Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumphafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 5 Tideeinfluss auf die Sanierungsdynamik/Besondere technische Herausforderungen / 5.2 Beeinflussung der Dampfausbreitung durch die Tide

5.2 Beeinflussung der Dampfausbreitung durch die Tide

- 133 Aus dem Tideeinfluss auf das Grundwasser lassen sich Rückschlüsse auf die Hydrogeologie ziehen. In den hydraulisch aktiven Schichten (gute Durchlässigkeit) beeinflussen vorgenannte Druckschwankungen unmittelbar die konvektive Dampfausbreitung. Anhand der gemessenen Temperaturentwicklungen lassen sich hieraus Rückschlüsse für die Hydraulik ableiten, das konzeptionelle Standortbild verfeinern und der Sanierungsbetrieb optimieren.
- 134 Der hydrostatische Druck auf die Filterstrecken ist relevant für den Injektionsdruck des Dampfes. Generell bedingt ein tiefer Grundwasserstand einen geringeren, ein hoher Grundwasserstand einen größeren hydrostatischen Druck (vgl. Schnitt Abb. 15). Bei gleichem Injektionsdruck wirkt eine Ebbe somit begünstigend, eine Flut limitierend auf die laterale Dampfausbreitung im Grundwasser.
- 135 Werden in den Temperaturmessprofilen (5 m Abstand zu den umliegenden Dampfinkjektionspegeln) rhythmisch schwankende Temperaturverläufe gemessen, so deutet dieses auf eine Schicht mit guter hydraulischer Durchlässigkeit hin. Hierbei korrelieren im Grundwasser hohe Temperaturen mit der Ebbe, niedrige Temperaturen mit der Flut.
- 136 Exemplarisch wurden die Temperaturganglinien in den Temperaturprofilen 0205, 0305, 0503, 0606, 0701 und 0802 genutzt, um verschiedene Prozesse bei der Dampfausbreitung zu erklären. Die Abstände der einzelnen Temperaturprofile zur tidebeeinflussten Elbe sind in Tabelle 4 zusammengestellt, die Lage im Sanierungsfeld in Abb. 24.

137

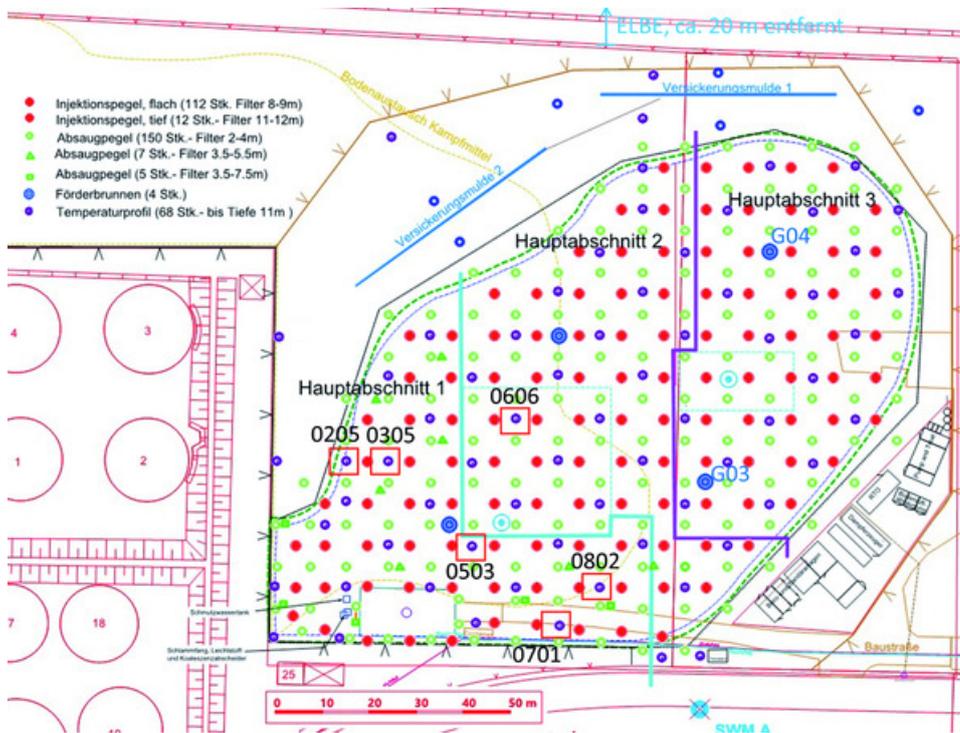
Tab. 4: Abstände der Temperaturprofile zur tidebeeinflussten Elbe. (Quelle: reconsite GmbH, 2019)

Bezeichnung Temperaturprofil	Abstand zur Elbe [m]
0205	114
0305	114
0503	131
0606	102
0701	147
0802	138

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 5 Tideeinfluss auf die Sanierungsdynamik/Besondere technische Herausforderungen / 5.2 Beeinflussung der Dampfausbreitung durch die Tide

138

Abb. 24: Lage ausgewählter Temperaturprofile im Sanierungsfeld. Abstand zur Elbe s. Tab. 4. (Quelle: reconsite GmbH, 2019)



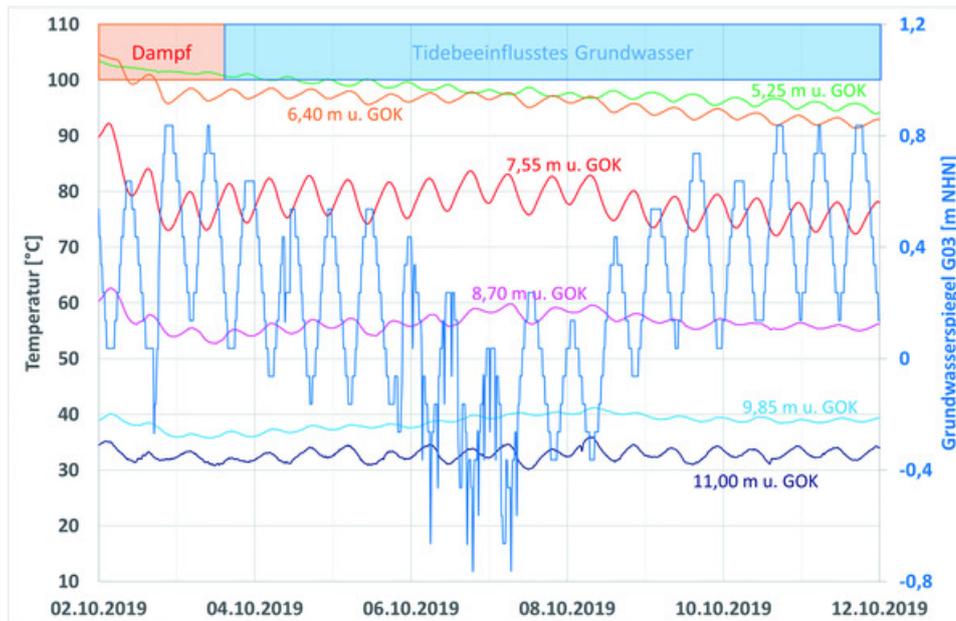
139 Beispielhaft lassen sich die Effekte gut erklären, wenn Grundwasserstände und Temperaturen in ähnlichem Abstand zur Elbe miteinander verglichen werden. Hierzu wurden der Grundwasserbrunnen G03 und das Temperaturprofil 0205 gewählt. Der Grundwasserspiegel im G03 (gemessen in einer Phase ohne Grundwasserförderung) wurde zusammen mit den Temperaturmessungen im randlich am Hauptabschnitt 1 gelegenen 0205 dargestellt (Abb. 25). Alle Temperaturverläufe in diesem Profil zeigten eine weitestgehend gleichmäßige Amplitude und Frequenz in der jeweiligen Tiefe. Es stehen somit über die gesamte Mächtigkeit zwischen 5 und 11 m u. GOK hydraulisch gut durchlässige Sande an.

140 Wenn die Grundwasserwechselzone mit Dampf erfüllt ist (Abb. 25, Zeitraum 02.–03.10.2019, Tiefe: 5,25 m u. GOK), so dominiert dieser die thermo-hydraulischen Prozesse. Ein Tideeinfluss wird messtechnisch nicht quantifiziert. Die Größe des Dampfraums ergibt sich durch Umrechnung der Temperaturen in den Wasserdampfdruck (Abb. 6, Abb. 7).

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumphafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 5 Tideinfluss auf die Sanierungsdynamik/Besondere technische Herausforderungen / 5.2 Beeinflussung der Dampfausbreitung durch die Tide

141

Abb. 25: Temperaturverlauf des Profils 0205 über die gesamte Sanierungstiefe, sowie der Grundwasserspiegel im Grundwasserbrunnen G03. (Quelle: reconsite GmbH, 2019)



- 142 Bei Temperaturen unter 100 °C, also ohne Dampfraum, verhalten sich in der Grundwasserwechselzone bei 5,25 m u. GOK die Tidewelle und die Temperaturschwankungen nahezu synchron. In die Wechselzone wird durch die Tide bei Hochwasser warmes Grundwasser gehoben und drainiert bei Niedrigwasser wieder. Bereits 1 m tiefer, bei 6,40 m in der gesättigten Zone, waren die Amplituden der Temperaturverläufe gegenüber denen in der Grundwasserwechselzone gegenläufig ausgeprägt (Abb. 25).
- 143 Im Grundwasser, also bei 6,4 m u. GOK und darunter, begünstigte das Niedrigwasser eine laterale Dampfausbreitung (Dampfinjektion bei 8-9 m u. GOK) (vgl. Schnitt Abb. 15). Entsprechend waren die Temperaturen im Messprofil bei Niedrigwasser höher, bei Hochwasser geringer. Die Amplitude betrug in dieser Betriebsphase beispielsweise in der Tiefe 7,55 m u. GOK ± 3 Kelvin [K].
- 144 Interessanterweise ist dieser Effekt bei dem gewählten Beispiel auch noch in 11 m u. GOK deutlich nachweisbar, also 2 Meter unter der Unterkante der Dampfinjektion. Trotz eines geringeren Temperaturniveaus als im Bereich der Dampfinjektion verdeutlicht dieses, dass der vertikal nach unten gerichtete Auswirkungsraum der Wärme über die Umhüllende der Brunnentiefpunkte hinaus reicht. Dieses kann, wie bei der hier erfolgten Tanklagersanierung, durchaus positiv genutzt werden. Beispielsweise kann

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 5 Tideinfluss auf die Sanierungsdynamik/Besondere technische Herausforderungen / 5.2 Beeinflussung der Dampfausbreitung durch die Tide

die Wärme zur Stimulation natürlicher mikrobiologischer Abbauprozesse im Bereich der Verschmierungszone um den Schadensherd herum genutzt werden.

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 5 Tideeinfluss auf die Sanierungsdynamik/Besondere technische Herausforderungen / 5.3 Räumliche und zeitliche Interpretation des Tideinflusses

5.3 Räumliche und zeitliche Interpretation des Tideinflusses

145 Komplexer wird die Interpretation der räumlichen und zeitlichen Strömungsverhältnisse und ihre Kopplung mit dem Wärmetransport. Exemplarisch werden nachfolgend die Temperaturkurven vom 03.10.2019 von vier Temperaturprofilen in den Tiefen 8,70 m und 9,85 m u. GOK dargestellt (Abb. 26) und erläutert. Der Abstand zwischen den Profilen 0701 und 0802 (ca. 14 m) verdoppelt sich grob zum Profil 0503 und vervierfacht sich etwa zum Profil 0305 (Tab. 5). Der Grundwasserspiegel im G03 verdeutlicht die Tidebewegung an der Grundwasseroberfläche und damit den hydrostatischen Wasserdruck.

146

**Tab. 5: Abstände der Temperaturprofile zueinander [m].
Lageplan s. Abb. 24. (Quelle: reconsite GmbH, 2019)**

Profil-Nr.	0701	0802	0503	0305
0701		14	28	57
0802	14		32	58
0503	28	32		28
0305	57	58	28	

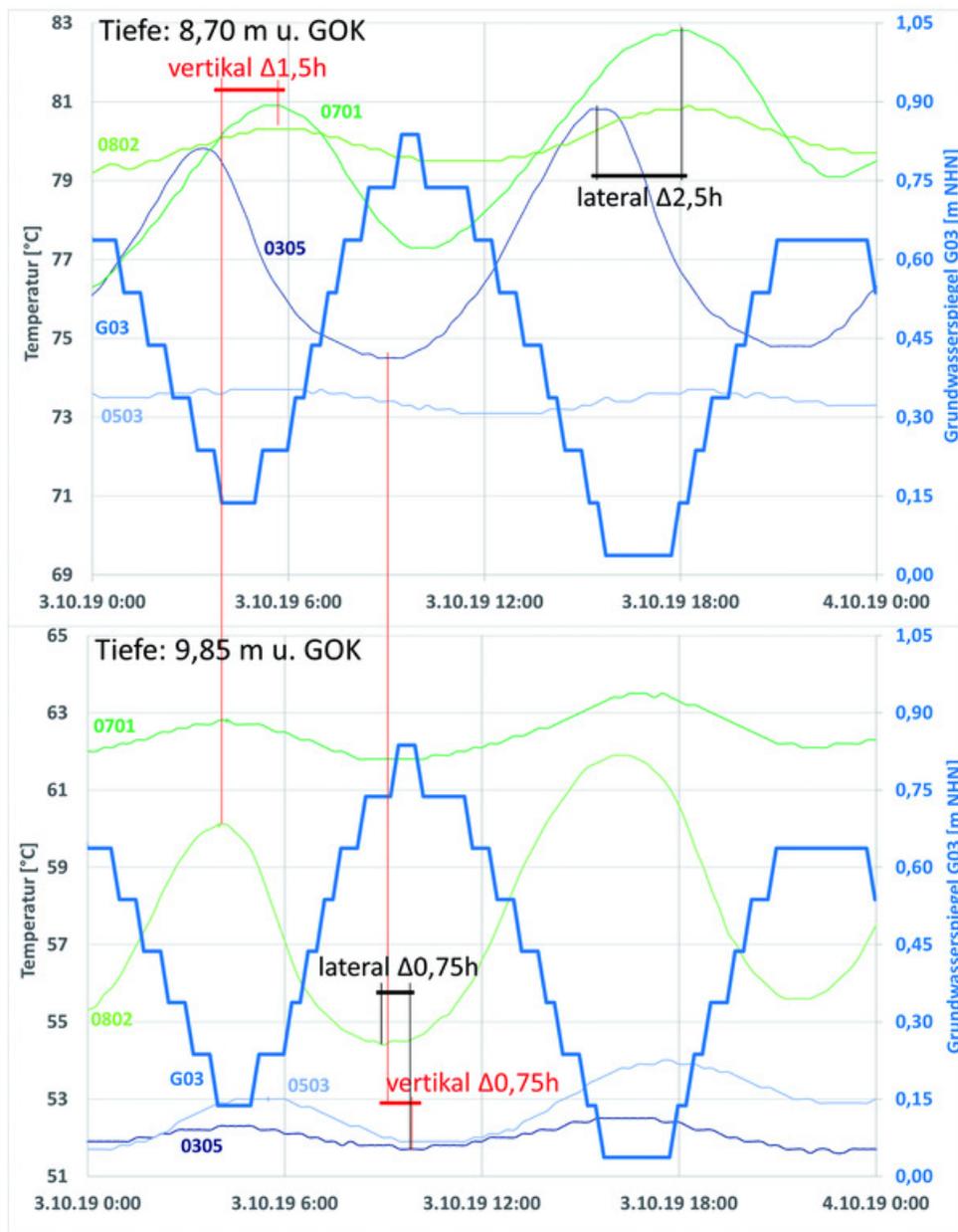
147 In beiden Tiefen wurden bei Hochwasser die Temperaturminima und bei Niedrigwasser die Temperaturmaxima erreicht. Amplitude und Frequenz der Temperaturverläufe waren dabei u. a. von der hydraulischen Durchlässigkeit der Bodenschichten und dem Abstand zur Elbe beeinflusst. Analysiert man einen lateralen Tideeinfluss in einer Tiefe von 8,70 m, so traten beispielsweise die Temperaturmaxima zwischen den Profilen 0305 und 0701 mit einem Zeitverzug von rund 2,5 h auf (Abb. 26, oben). Der Abstand zwischen den Profilen betrug rund 57 m. Profil 0701 war etwa 33 m weiter von der Elbe entfernt als Profil 0305.

148 In der Tiefe von 9,85 m trat hingegen das Temperaturmaxima bei Profil 0802 rund 0,75 h vor dem in Profil 0305 auf (Abb. 26, unten), obwohl beide Profile ähnlich weit von der Elbe entfernt waren und beide Profile zueinander einen ähnlichen Abstand aufwiesen wie die vorgenannten Profile (rund 58 m). Analysiert man analog exemplarisch einen vertikalen Tideeinfluss beispielsweise zwischen den Tiefen 8,70 m und 9,85 m, so traten die Extrema bei 0305 zunächst bei 8,7 m und etwa 0,75 h später in der Tiefe auf. Beim Profil 0802 war der Effekt genau entgegengesetzt: Extrema waren zuerst in der Tiefe nachweisbar und erst 1,5 h später nur 1,15 m darüber.

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 5 Tideinfluss auf die Sanierungsdynamik/Besondere technische Herausforderungen / 5.3 Räumliche und zeitliche Interpretation des Tideinflusses

- 149 Ergänzend wurden die Temperaturdifferenzen zum 01.10.2019, 00:00 ermittelt (Zeitpunkt willkürlich gewählt) und dargestellt (Abb. 27), um die hydraulisch aktiveren Zonen zu verdeutlichen. Sie sind an den hohen Amplituden identifizierbar. Die Temperaturdifferenz kann mehrere Kelvin in einer Tide betragen. In einer Tiefe von 8,70 m wiesen die Profile 0305 und 0701 diese Dynamik auf. Hingegen deuten die gedämpften Amplituden in den Profile 0503 und 0802 auf eine geringe hydraulische Durchlässigkeit hin. In der Tiefe von 9,85 m waren hingegen in den Profilen 0503 und 0802 bessere Durchlässigkeiten gegeben. In den Profilen 0305 und 0701 war die tidebedingte Amplitude im Temperaturverlauf quantifizierbar, aber von untergeordneter Relevanz für den Sanierungsbetrieb.
- 150 Zusammenfassend ist aus den Auswertungen ersichtlich, dass eine kombinierte Auswertung von Grundwasserständen und Temperaturverläufen das konzeptionelle Standortbild erheblich erweitern kann. Die Auswirkungen von Flut und Ebbe sind dabei bei jedem Profil anders ausgeprägt.
- 151 **Abb. 26: Temperaturverlauf der Profile 0305, 0503, 0701 und 0802 in einer Tiefe von 8,70 m und 9,85 m sowie der Grundwasserspiegel des Sanierungsbrunnens G03. Exemplarisch wurde die Tidewelle in lateraler und vertikaler Ausbreitung dargestellt. (Quelle: reconsite GmbH, 2019)**

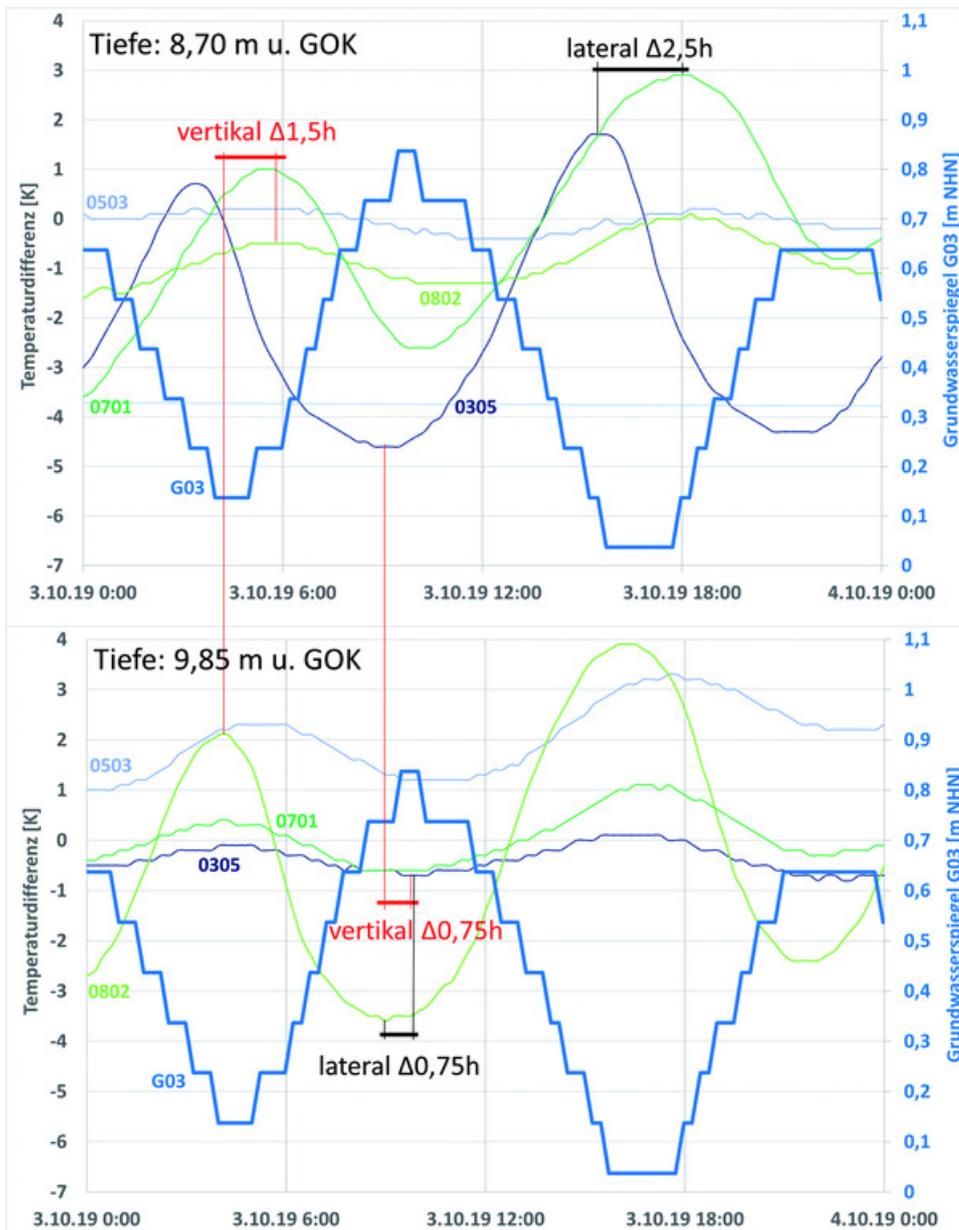
Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 5 Tideinfluss auf die Sanierdynamik/Besondere technische Herausforderungen / 5.3 Räumliche und zeitliche Interpretation des Tideinflusses



152

Abb. 27: Temperaturdifferenzen der Profile 0305, 0503, 0701 und 0802 in einer Tiefe von 8,70 m und 9,85 m sowie der Grundwasserspiegel des Sanierungsbrunnens G03. Exemplarisch wurde die Tidewelle in lateraler und vertikaler Ausbreitung dargestellt. (Quelle: reconsite GmbH, 2019)

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 5 Tideinfluss auf die Sanierungsdynamik/Besondere technische Herausforderungen / 5.3 Räumliche und zeitliche Interpretation des Tideinflusses

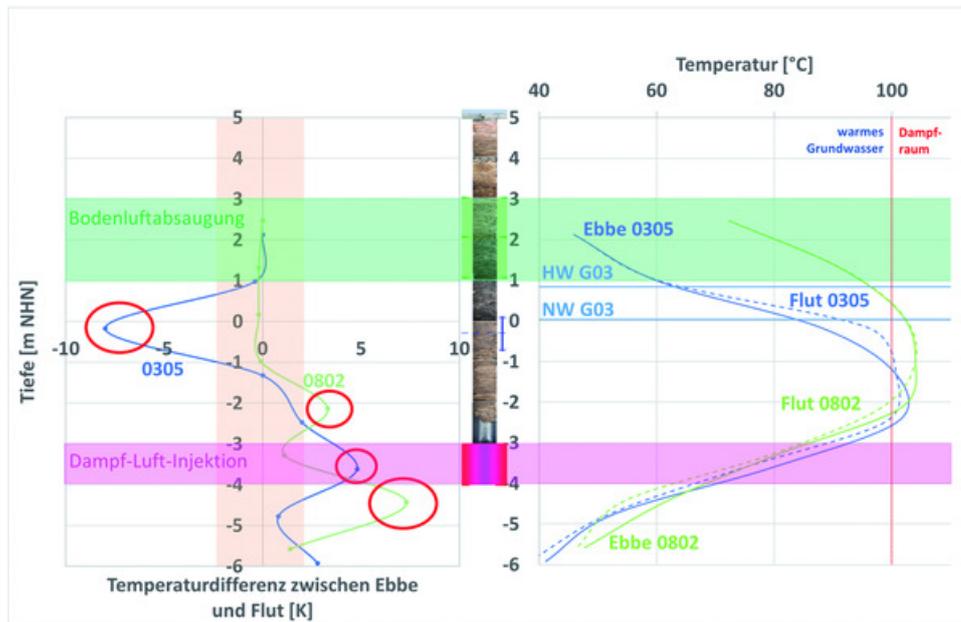


Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 5 Tideeinfluss auf die Sanierungsdynamik/Besondere technische Herausforderungen / 5.4 Erkennen hydraulisch aktiver Zonen anhand des Tideeinflusses

5.4 Erkennen hydraulisch aktiver Zonen anhand des Tideeinflusses

- 153 Anhand des Tideeinflusses auf die Grundwassertemperatur lassen sich zudem hydraulisch aktive Zonen einfach, systematisch und automatisiert im laufenden Sanierungsbetrieb erkennen. Ein konzeptionelles Standortmodell erweitert sich so sukzessiv. Beispielhaft wird das Vorgehen anhand der vorgenannten Datensätze und der Profile 0305 und 0802 erläutert.
- 154 Basierend auf den Temperaturverläufen aus Abbildung 26 wurden die Temperaturmaxima und Temperaturminima in Abbildung 28 (rechts) als Profile dargestellt. Ebenso wurden Bereiche der Bodenluftabsaugung und der Dampf-Luft-Injektion angegeben. Hohe Temperaturdifferenzen mit mehr als ± 3 Kelvin zwischen Hoch- und Niedrigwasser sind nur durch konvektive Prozesse möglich. Einströmender Dampf, aber auch einströmendes Wasser dominieren diese schnellen Temperaturänderungen. Konduktive Prozesse sind hingegen viel langsamer. Temperaturschwankungen kleiner ± 2 Kelvin können daher eher geringer durchlässigen Schichten oder, bei über $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, einem stetig präsenten Dampfraum zugeordnet werden.
- 155 Die exemplarische Auswertung zeigt, dass die hydraulisch besser leitenden Schichten (Abb. 28, rechts) in den beiden gewählten Profilen in der Tiefe differieren. Ob diese Schichten im hydraulischen Kontakt stehen, bedarf dann im Einzelfall einer vertiefenden Auswertung aller umliegenden Temperaturprofile.
- 156 Wichtig für das Verständnis ist, dass die Informationen aus den Temperaturverläufen ein mächtiges Werkzeug sind, um Standorte während des Sanierungsbetriebs deutlich besser zu charakterisieren. Der Sanierungsbetrieb lässt sich mit vorgenannten Auswertungen deutlich optimieren. Vereinbarungen zwischen Sanierungspflichtigem, zuständigen Umweltbehörden und Dritten zur dauerhaften Außerbetriebnahme der Sanierungsanlage in einem Sanierungsbereich lassen sich so datenbasiert souverän ableiten.
- 157 **Abb. 28: Vergleich zwischen Temperaturdifferenz und Temperaturverlauf der Profile 0305 und 0802 bei Ebbe und Flut (Datengrundlage: 03.10.2019). (Quelle: reconsite GmbH, 2019)**

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 5 Tideinfluss auf die Sanierungsdynamik/Besondere technische Herausforderungen / 5.4 Erkennen hydraulisch aktiver Zonen anhand des Tideinflusses



6 Ökologische und ökonomische Bewertung

6.1

Technischer Sanierungserfolg

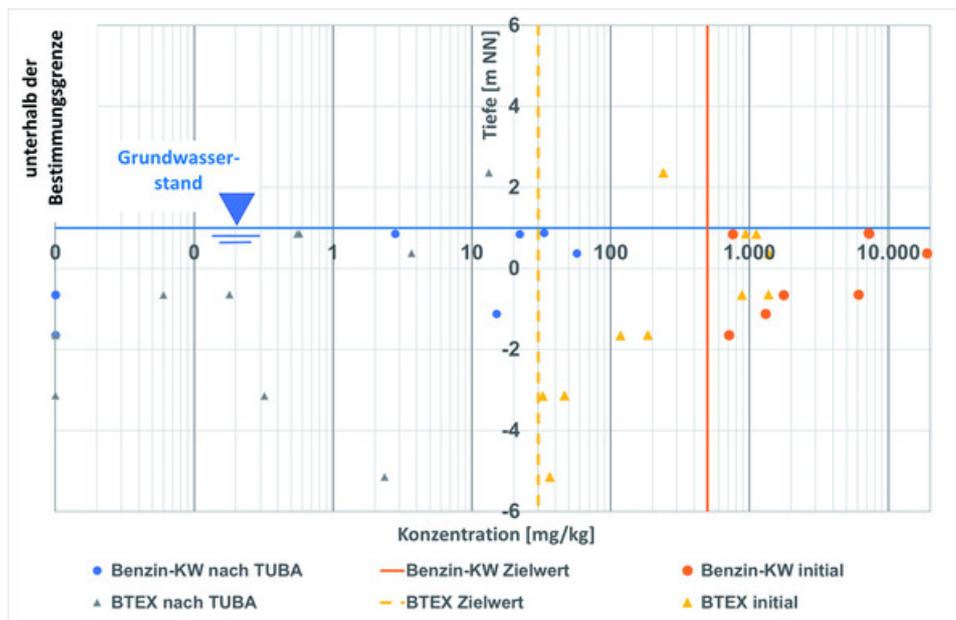
- 158 Der Sanierungsstandort Petroleumhafen Hamburg hatte im Schadensherd (TP1) eine Grundfläche von etwa 10 000 m². Die Sanierungstiefe variierte zwischen 9 und 12 m u. GOK. Das vorgegebene Layout zur Dampf-Luft-Injektion, Bodenluftabsaugung, Grundwasserförderung und Temperaturmessung war gleichförmig über das gesamte Sanierungsfeld angeordnet. Im Zuge der Installation der Brunnen sowie beim laufenden Sanierungsbetrieb zeigte sich, dass der Standort deutlich komplexer und heterogener gegliedert war, als es aus dem vorgegebenen, gleichförmigen Brunnenlayout zu erwarten war. Die Grundfläche von ähnlich charakterisierten Sanierungsabschnitten lag grob in der Größenordnung von rund 500 m².
- 159 Im Sanierungsverlauf war daher eine sehr dynamische Betriebsführung erforderlich, um die zahlreichen standortspezifischen Limitierungen für die Dampf-Luft-Injektion, die Bodenluftabsaugung und -reinigung sowie die Wasseraufbereitung erfolgreich zu überwinden. Trotz der automatisierten Fernüberwachung der Sanierungsanlage und des automatisierten Datenmanagements war ein erheblich höherer und permanent am Standort präsenter Personaleinsatz erforderlich, um den standortspezifischen Gegebenheiten gerecht zu werden.
- 160 Mit der abgeschlossenen TUBA-Sanierung wurden über 280 t Benzin-KW aus dem Boden und dem Grundwasser ausgetragen und bilanziert. Mit einem GC-PID konnten hiervon 167 t dem leichtflüchtigen Schadstoffspektrum zugeordnet werden. Gegenüber dem geplanten Sanierungsverlauf wurde die Betriebszeit der Sanierung um rund ein Drittel verlängert. Insgesamt wurde aber doppelt so viel Schadstoff ausgetragen als ursprünglich geplant. Berücksichtigt man auch die nicht gemessene und nur rechnerisch abgeschätzte Reinigungsleistung einer gesteigerten mikrobiologischen Schadstoffreinigung im Umfeld, so ist davon auszugehen, dass in Summe aller sanierungsrelevanten Effekte über 300 t Schadstoff kontrolliert ausgetragen und fachgerecht beseitigt oder mikrobiologisch in-situ abgebaut wurden.
- 161 Um den Erfolg der TUBA-Sanierung zu bewerten, wurden Zielwerte für maximale Schadstoffgehalte im Boden von der Umweltbehörde festgelegt. Als Zielwerte wurden 500 mg/kg für Benzinkohlenwasserstoffe

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumphafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 6 Ökologische und ökonomische Bewertung / 6.1 Technischer Sanierungserfolg

und 30 mg/kg für BTEX festgelegt (Abb. 29). Bewertungskriterium war die Korrelation der ursprünglichen Konzentrationen im Boden mit den Konzentrationen nach Beendigung der TISS. Die anfänglichen Konzentrationen im Boden, die die Zielwerte überstiegen, wurden durch die TUBA-Sanierung um einen Faktor von fast 1 000 reduziert. Dies entspricht einem durchschnittlichen Sanierungserfolg von 99,7 %. Nach der TUBA-Sanierung lagen mehrere Schadstoffkonzentrationen im Boden unter der Nachweisgrenze.

162

Abb. 29: Bewertung des Sanierungserfolgs anhand von Zielwerten: Vergleich der initialen sanierungsbedürftigen Schadstoffkonzentrationen im Boden (Zielwertüberschreitung vor der Sanierung) und der Schadstoffkonzentrationen an fast gleicher Stelle ca. 1 Jahr nach Beendigung der Sanierung. (Quelle: Daten aus [5], grafische Darstellung durch reconsite GmbH, 2022)

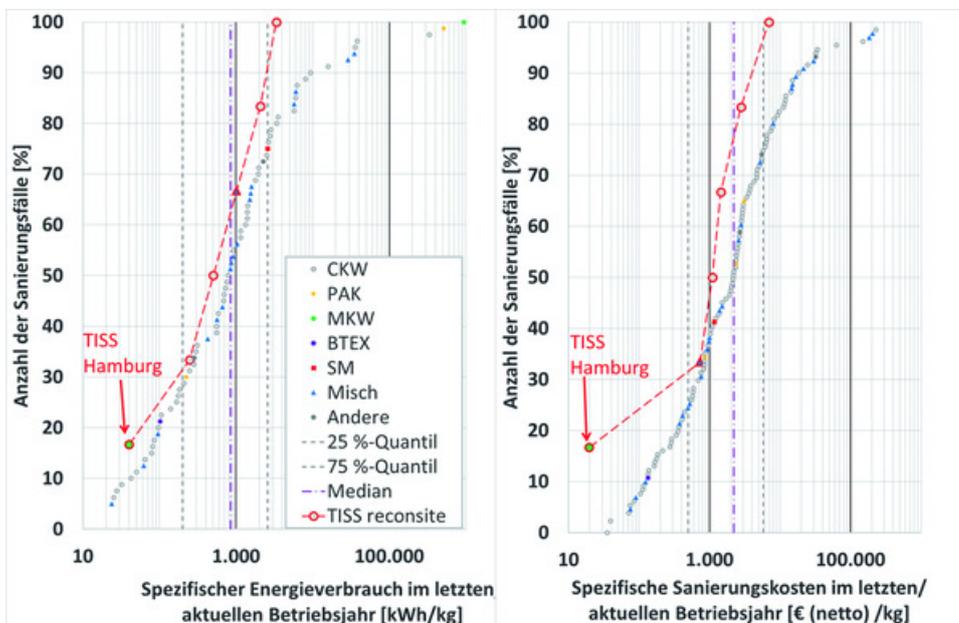


6.2 Ökologischer Sanierungserfolg

- 163 Für den Betrieb des Dampferzeugers wurden rund 1 030 000 Liter Heizöl verfeuert. Dies entspricht einem Energiegehalt von 10 080 000 kWh. Ferner wurden zum Betrieb der Anlagen 1 075 000 kWh elektrischer Strom verbraucht. Bezogen auf die ausgetragene Schadstoffmenge von über 280 t Benzin-KW entspricht dies einem Energieeinsatz von rund 36 kWh/kg Schadstoff. Bezogen auf die gereinigte Bodenmasse ergibt sich ein Energieeinsatz von unter 55 kWh/t gereinigtem Boden.
- 164 Die thermische in-situ-Sanierung am Standort Petroleumhafen Hamburg (TP1) mit dem TUBA-Verfahren der reconsite GmbH darf daher als hochgradig energieeffizient und energiesparend bezeichnet werden (Abb. 30). Grundlage hierfür war eine robuste Verfahrenstechnik in Kombination mit einer wissenschaftlichen, sehr dynamischen Betriebsführung unter laufender Berücksichtigung sich ändernder Randbedingungen.
- 165 Vergleichende Auswertungen erfolgten ergänzend zwischen thermischen in-situ Sanierungen und langlaufenden Grundwassersanierungen (Pump and Treat; P & T). Die Auswertungen zu langlaufenden Grundwassersanierungen wurden in [22] veröffentlicht. Die Auswertungen zu thermischen in-situ Sanierungen umfasste sechs Quellensanierungen aus den Jahren 2015-2021 mit Grundflächen zwischen 25 und 10 000 m². Verglichen wurden jeweils der spezifische Energieverbrauch je Kilogramm Schadstoff sowie die spezifischen Kosten je Kilogramm Schadstoff.
- 166 Generell zeigt sich, dass bei beiden Verfahren spezifischer Energieverbrauch und spezifische Kosten aufgrund der Standortrandbedingungen um ungefähr den Faktor 10 um den Mittelwert schwanken können. Bei TISS stehen die beiden Summenkurven jedoch steiler und links der Auswertungen für langlaufende Grundwassersanierungen. TISS dürfen daher als energiesparend und kosteneffizient bewertet werden. Sie sind daher effizient und steigern die Nachhaltigkeit bei der Altlastensanierung, im Speziellen bei der Beseitigung von Schadensherden mit organischen Schadstoffen.
- 167 **Abb. 30: Spezifischer Energieverbrauch und spezifische Sanierungskosten: Vergleich verschiedener thermischer Sanierungsprojekte der Jahre 2015-2021 mit P&T-Projekten aus der LUBW-Arbeitshilfe aus den Jahren 1985-2019 mit Hochrechnung der Kosten entsprechend der Preissteigerung auf**

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 6 Ökologische und ökonomische Bewertung / 6.2 Ökologischer Sanierungserfolg

das Jahr 2019. (Quelle: [22], ergänzt um TISS-Daten durch reconsite GmbH, 2022)



6.3 Ökonomische Bewertung der Sanierungsmaßnahme

168 Die Kosten der Sanierung lagen bei rund 6 000 000 €. Bezogen auf die ausgetragene, bilanzierte Schadstoffmasse entspricht dies einem Preis von rund 21 €/kg Schadstoff. Bezogen auf die gereinigte Bodenmasse ergibt sich ein Preis von rund 30 €/t gereinigtem Boden (Abb. 31).

169 Für das 1. Halbjahr 2019 liegen Entsorgungspreise für einen Bodenaushub vor. Rechnet man diese auf den sanierten Schadensherd um, so ergäben sich bei einem klassischen Bodenaustausch bereits Kosten von rund 65 €/t nur für die Entsorgung des Bodens. Kosten beim Bodenaustausch für den Aushub, den Transport und einen Wiedereinbau von neuem Material sowie Kosten für eine Wasseraufbereitung sind hier noch nicht berücksichtigt. Die Gesamtkosten dürften bei einem Bodenaustausch daher in der Größenordnung von 130-200 €/t liegen. Die Kosten für einen Bodenaustausch lassen sich damit sehr grob mit 26 Mio. € und höher abschätzen, also mehr als das 4-fache der Kosten für das TUBA-Verfahren. Die thermische in-situ Sanierung am Standort Petroleumhafen Hamburg mit unserem TUBA-Verfahren darf daher als sehr wirtschaftlich bezeichnet werden (Abb. 30), auch im Verfahrensvergleich mit einem Bodenaustausch.

170

Abb. 31: Auswertung der spezifischen Kosten und des spezifischen Energieverbrauchs. (Quelle: reconsite GmbH, 2022)

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 6 Ökologische und ökonomische Bewertung / 6.3 Ökonomische Bewertung der Sanierungsmaßnahme



7 Fazit und Ausblick

- 171 Eine thermische in-situ Sanierung (TISS) ermöglicht eine schnelle und sichere Reinigung von Boden, Bodenluft und Grundwasser. Auch im tidebeeinflussten Grundwasser hat sich TISS zur Beseitigung von Schadensherden bewährt. Der Größenmaßstab der thermischen in-situ Sanierung am Standort Petroleumhafen Hamburg ist in Europa einzigartig. Aus einem Bodenvolumen von rund 100 000 m³ wurden in 17 Monaten Sanierungsbetrieb über 280 t Benzin-KW entfernt. Das entspricht gemittelt einem Austrag von knapp 3 kg Benzin-KW/m³ Boden bzw. knapp 16,5 t Benzin-KW/Monat. Der Umfang der Schadstoffrückgewinnung überstieg das vormals abgeschätzte Schadstoffinventar um 40 %. Der Sanierungserfolg von 99,7 %, ermittelt aus den sanierungsbedürftigen Bodenkonzentrationen, ist nachhaltig und dauerhaft. Synergieeffekte ergeben sich für die mikrobiologische Aktivität beim Schadstoffabbau in Folge der Restwärme im Umfeld des ehemaligen Schadensherdes, sofern sich dort lateral Restbelastungen befunden haben.
- 172 Das TUBA-Verfahren war hier wirtschaftlicher und energiesparender als konventionelle Sanierungsmethoden (Kap. 6.2, 6.3). Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus Ökobilanzen zu thermischen in-situ Verfahren, die bereits vor 20 Jahren publiziert wurden [7]. Aufgrund seiner Besonderheiten und der kurzen Gesamtzeit von unter zwei Jahren Inanspruchnahme der Fläche für die Sanierungsarbeiten wurde das Projekt bei den „Brownfield24 Awards 2022“ eingereicht. Es wurde bei diesem Flächenrecyclingpreis mit einem 1. Platz ausgezeichnet.
- 173 Zum Erfolg einer thermischen in-situ Sanierung trägt, neben einem detaillierten Prozessverständnis, auch eine schnelle Reaktionsfähigkeit der Verfahrensbetreiber bei. Aufgrund der Wärme laufen viele Prozesse in Boden und Grundwasser erheblich schneller ab als bei konventionellen in-situ Sanierungen. Daher sind auch die Projektbeteiligten gefordert, schnelle Entscheidungen zu treffen. Eine hohe Flexibilität und Entscheidungsfreudigkeit aller Projektbeteiligten sind daher bei der Umsetzung von thermischen in-situ Sanierungen hilfreich.
- 174 Die Entscheidungsprozesse können durch eine Vielzahl von online-Vor-Ort-Messungen, kombiniert mit automatisierten Auswertungen vereinfacht und beschleunigt werden. Grundlage hierfür sollte ein konzeptionelles Standortmodell sein. Dieses lässt sich anhand der Erkenntnisse und Messdaten aus dem Betrieb kontinuierlich weiterentwickeln. Hierfür sollten, besonders bei größeren Sanierungsprojekten, auftraggeberseitig die erforderlichen Ressourcen zur Verfügung gestellt werden. Gerade

bei thermischen in-situ Sanierungen ist eine hohe Vernetzung der Kompetenzen aus sicherem Anlagenbetrieb, Mess- und Regelungstechnik und dem Verständnis hydro-geologischer Verhältnisse und thermo-hydraulischer Mehrphasenprozesse unerlässlich. Ein hoher Digitalisierungsgrad bei der automatisierten Prozessdatenauswertung ist daher bei vielen Sanierungen üblich. Der Umfang solcher Auswertungen ist projektabhängig. Empfohlen wird eine frühzeitige detaillierte Abstimmung der Projektbeteiligten.

- 175 Die Art der Auswertung und die Interpretation der zugehörigen, dominanten Prozesse erfordert viel Erfahrung. Geologische und hydrogeologische Randbedingungen, thermodynamische und hydraulische Prozesse und verschiedenste Betriebszustände sind hierbei zu berücksichtigen. Ob sich anhand der Datenverläufe künftig mit künstlicher Intelligenz der Sanierungsbetrieb weiter optimieren lässt, erscheint derzeit unklar. Hieran wird jedoch zurzeit geforscht.

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / 8 Danksagung

8 Danksagung

- 176 Wir danken unserem Auftraggeber BUKEA (Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft, Freie und Hansestadt Hamburg), dem Büro Umtec | Prof. Biener | Sasse | Konertz mbB (Bremen) (Fachliche Überwachung und Begleitung sowie Sicherheits- und Gesundheitsschutzkoordination) und unseren Projektpartnern für die sehr gute Zusammenarbeit bei diesem herausragenden und erfolgreichen Projekt.

Literatur

- [1] https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_Hamburger_Hafenanlagen, abgerufen 17.05.2023, 15:20
- [2] Helmig R (1997) Multiphase Flow and Transport Processes in the Subsurface: A Contribution to the Modeling of Hydrosystems, Springer Berlin Heidelberg (1997), ISBN 3-540-62703-0, 978-3-642-64545-7, 367 Seiten
- [3] Freie und Hansestadt Hamburg: Pressemitteilung <https://www.hamburg.de/altlastensanierung/12177848/petroleumhafen/>, abgerufen 15.02.2023, 15:34
- [4] Freie und Hansestadt Hamburg: Ausschreibungsunterlagen 2018 zur Sanierung Petroleumhafen, Teilprojekt 1 (TP1); Thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung (TUBA)
- [5] Umtec: Abschlussbericht – Sanierung Petroleumhafen, Teilprojekt 1 TP1), Freie und Hansestadt Hamburg; Thermisch unterstützte Bodenluftsanierung (TUBA). März 2022
- [6] Uwe Hiester und Laura Bieber (2017) Dominierende Prozesse bei der thermischen In-situ-Sanierung (TISS) kontaminierter Geringleiter. Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 22: 185–195, ISSN 1430-483X print. DOI:10.1007/s00767-017-0366-z
- [7] Hiester U, Schrenk V & Weiss, T.: Environmental Balancing of „Cold“ SVE and Thermally Enhanced Soil Vapour Extraction – Practical Support for Decision Makers. Poster Session, Annokkée G.J.; Arendt F.; O. Uhlmann (ed.) ConSoil 2003. Conference Proceedings of the 8. International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil 12–16.5.2003, pp. 2253–2262, Gent, Belgium Org.: The Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO)
- [8] Hiester U & Schrenk, V.: In-situ thermal remediation: Ecological and Economic Advantages of the TUBA and THERIS methods. Annokkée G.J., Arendt F. & O. Uhlmann (ed.), Proceedings of the 9. International FZK/TNO Conference on Soil-Water Systems ConSoil 2005 (Conference-CD), 3–7.10.2005 Bordeaux Convention Centre France ISBN: 3-923704-50-X Org.: Forschungszentrum Karlsruhe (FZK)
- [9] Uwe Hiester, Laura Bieber, Martina Müller (2018) Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung – Erfahrungen mit einer thermischen In-situ-Sanierung (TISS). altlasten spektrum 27 (2018), 3, ISSN 0942-3818, S. 108–114
- [10] Reid RC, Prausnitz JM, Poling BE The Properties of Liquids and Gases. McGrawHill, New York, USA, 4. Auflage, 1987

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumphafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / Literatur

- [11] Hiester, Uwe: Technologieentwicklung zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone mit festen Wärmequellen. Promotionsschrift, Institut für Wasserbau, Eigenverlag (Publ.), Mitteilungsheft des Instituts für Wasserbau, 9.2009 (178) Universität Stuttgart ISBN, 978-3-933761-82-8
- [12] <https://www.chemie.de/lexikon/Z%C3%BCndtemperatur.html>, abgerufen 31.05.2023, 17:15 Uhr
- [13] https://www.bgrci.de/fileadmin/BGRCI/Downloads/DL_Praevention/Explosionsschutzportal/Wissen/Grundlagen/Grundlagen_zum_Explosionsschutz_Teil_3_V_2.pdf, abgerufen 22.06.2023, 14:30 Uhr
- [14] GESTIS Stoffdatenbank: <https://gestis.dguv.de/>, abgerufen 19.05.2023, 16:23
- [15] E. Beitinger M Cornelsen, S. Gier, M. Nerger (2017): Arbeitshilfe H1-15 „Anlagen zur Sanierung von Boden-, Bodenluft- und Grundwasserkontaminationen – Produktsicherheit und CE-Konformität“. ITVA-Fachausschuss H1 „Technologien und Verfahren“, Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA), Juni 2017
- [16] U. Hiester M Müller, H.-P. Koschitzky, O. Trötschler, U. Roland, F. Holzer: Leitfaden: Thermische in situ Sanierungsverfahren (TISS) zur Entfernung von Schadensherden aus Boden und Grundwasser. Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (bmbf) und vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ). August 2012
- [17] Susanne Laumann: Material Flow Analysis: An Effectiveness Assessment Tool for In Situ Thermal Remediation. *Vadose Zone Journal* 12 (1). February 2013. DOI: 10.2136/vzj2012.0113
- [18] <https://www.pegelonline.wsv.de/webservices/zeitreihe/visualisierung?parameter=Wasserstand%20Rohdaten&pegelnummer=5952050>, abgerufen 15.02.2023, 16:08
- [19] Bieber L and Hiester U, Shut-down criteria for in-situ thermal remediation (ISTR) based on hot vapor concentration. *AquaConSoil 2017 Lyon*. Proceedings of the 14th International Conference on Sustainable Use and Management of Soil, Sediment and Water Resources, 26.-30. June 2017
- [20] Hiester U, Jungk V, Canzler W, Poetke D, Ulrich K-U, Umweltverträgliche Nutzung geothermischer Wärmespeicher – Ermittlung und Bewertung thermischer Veränderungen im Grundwasser. [Hrsg.] Umweltbundesamt Berlin, Texte 113/2022, Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Forschungskennzahl FKZ 3717 43 249 0, FB000823. Umweltbundesamt: Fachgebiete: FG II 2.1 – Übergreifende Angelegenheiten Wasser & Boden,

Handbuch Altlastensanierung / 5000 Sanierungsverfahren / 5700 Bodenluft- und Gasbehandlungsverfahren / 5710 Allgemeines, Übersichten / 5716 Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung / 5716.01 Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) / Literatur

FG V 1.3 – Erneuerbare Energien, Dezember 2021, ISSN 1862–4804. DOI:
10.13140/RG.2.2.23987.30248

- [21] <https://www.hafen-hamburg.de/de/gezeiten/>, abgerufen 14.02.2023, 14:30 Uhr
- [22] LUBW (2020) Ermittlung fachtechnischer Grundlagen zur Vorbereitung der Verhältnismäßigkeitsprüfung von langlaufenden Pump-and-Treat-Maßnahmen – Fortschreibung 2020, ISBN: 978–3-88251–405–6