

Grundwassersanierung in Hamburg-Eppendorf – Variantenprüfung im Rahmen der Konzepterstellung

Thomas Haupt, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Altlastensanierung

Billstraße 84, 20539 Hamburg, Tel.: 040 4 28 45 – 3593, Fax: - 3572

www.altlastensanierung.hamburg.de

Als öffentlicher Auftraggeber steht man häufig in der Kritik, innovative Techniken in der Altlastensanierung nicht ausreichend anzuwenden. Die herkömmlichen Verfahren werden den neuen Techniken oft ohne Grund vorgezogen. Auf diese Weise wird die Innovation gehemmt und der Fortschritt der Sanierungstechnologie nicht ausreichend berücksichtigt.

Am Beispiel des Sanierungsfalls Hamburg-Eppendorf soll gezeigt werden, wie die Abwägung zwischen dem Einsatz konventioneller und innovativer Technologie erfolgt und wie sich die Entscheidung für ein konventionelle Pump & Treat Maßnahme letztendlich begründet.

Die Bearbeitung des Schadensfalles, angefangen mit der Erkundung und der Sanierungskonzeption über Entwurfs- und Genehmigungsplanung bis zur Vergabe sowie Unterstützung der örtlichen Bauleitung erfolgt durch die URS Deutschland GmbH, Hamburg, im Auftrag der Umweltbehörde, heute Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Abteilung Altlastensanierung.

Im Rahmen der Variantendiskussion wurde eine detaillierte Betrachtung zum Thema Funnel & Gate unter dem Titel „Bautechnische Realisierung einer 'Reaktiven Wand' im innerstädtischen Bereich – eine innovative Technik zur Reinigung kontaminierten Grundwassers in der Altlastensanierung“ als Diplomarbeit im Studiengang Bauingenieurwesen der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg durchgeführt. Die Durchführung der Diplomarbeit wurde durch die Abteilung Altlastensanierung und durch die URS Deutschland GmbH, Hamburg fachlich betreut. Diese Ergebnisse wurden bei der Sanierungsentscheidung maßgeblich berücksichtigt.

1. Darstellung der Ausgangslage und des Sanierungszieles.

In Hamburg-Eppendorf liegt ein Boden- und Grundwasserschaden mit Leichtflüchtigen Chlorierten Kohlenwasserstoffen (LCKW) vor. Der Schaden wurde durch eine ehemalige chemische Reinigung sowie durch den Betrieb eines Lager- und Werkstattbereiches verursacht. Die Kontamination des Grundwassers erfolgte durch LCKW aus der ungesättigten Bodenzone im Schadenszentrum, im obersten Grundwasserleiter wurde eine ca. 1,1 km lange Schadstofffahne ausgebildet.

Die Kontamination des Bodens und der Bodenluft ist zwischenzeitlich durch die Verursacher saniert worden, damit ist die Schadstoffquelle im Schadenszentrum beseitigt. Der Grundwasserschaden wird auf Grund öffentlich-rechtlicher Verträge durch die Freie und Hansestadt Hamburg saniert. Von der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt wurde ein Sanierungsziel für das Schadenszentrum und den Abstrombereich von $10 \mu\text{g/l}$ LCKW_{gesamt} festgelegt. Die Belastung im Schadenszentrum liegt maximal bei $1.200 \mu\text{g/l}$ LCKW, im Verlauf der Fahne liegen die Belastungen maximal

zwischen 500 und 1.000 µg/l LCKW. Die Kartendarstellung in Abbildung 1 zeigt die Gesamtausdehnung der Grundwasserbelastung. Ein Abbau der Schadstoffe wird kaum beobachtet, der Grundwasserleiter zeigt weitestgehend aerobe, oxidierende Verhältnisse. Hauptschadstoff ist Tetrachlorethen, das in den meisten Pegeln mit mehr als 90% Schadstoffanteil deutlich vorherrscht. Die Anteile von cis-1,2-Dichlorethen liegen dagegen meist unter 1%.

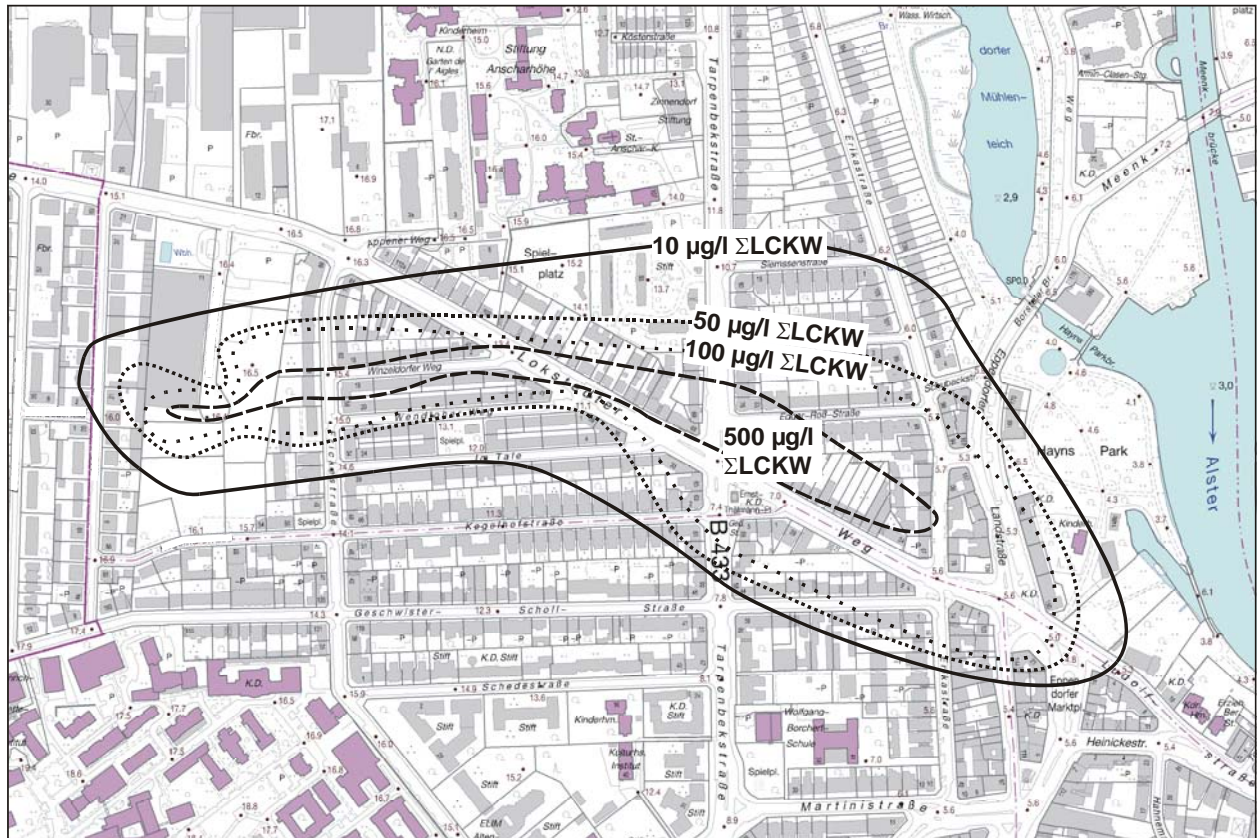


Abb. 1: Übersichtsplan mit Schadstoffverteilung LCKW_{gesamt} Februar 2003

Der oberste Grundwasserleiter steht unter einer mehrere Meter mächtigen ungesättigten Bodenzone weitgehend ohne schützende Deckschichten als freier Wasserleiter an. Abbildung 2 zeigt in einem geologischen Profischnitt den Aufbau des Untergrundes in Grundwasserfließrichtung von dem Schadenszentrum bis zur Alster. Die Aquifermächtigkeit beträgt außerhalb der Alsterrinne max. 5 m, bereichsweise keilt der Wasserleiter ganz aus. Mit dem Übertritt in die Alsterrinne verdreifacht sich die Mächtigkeit auf bis zu 15 m. Im Bereich der Alsterrinne sind mit Torfen und Mudden organische Schichten in den Grundwasserleiter eingelagert. Die Aquiferbasis bilden Geschiebemergel der Saalekaltzeit, die in einer Bohrung mit ca. 10 m Mächtigkeit aufgeschlossen sind. Der tiefere Grundwasserleiter steht nicht im Kontakt mit dem obersten, er weist keine negative Beeinträchtigung durch den Grundwasserschaden auf.

Die Nutzungssensibilität des obersten Grundwasserleiters ist als gering einzustufen, da er nicht zur Trinkwassergewinnung dient. Es ist eine Gefahrenabwehr hinsichtlich einer weiteren diffusen Ausbreitung der Schadstoffe erforderlich. Als weiteres Schutzgut ist die Alster, ein großes innerstädtisches Gewässer als Vorfluter zu berücksichtigen. Die Untersuchungen zeigen, dass die Alster im hydraulischen Kontakt mit dem belasteten Grundwasser steht.

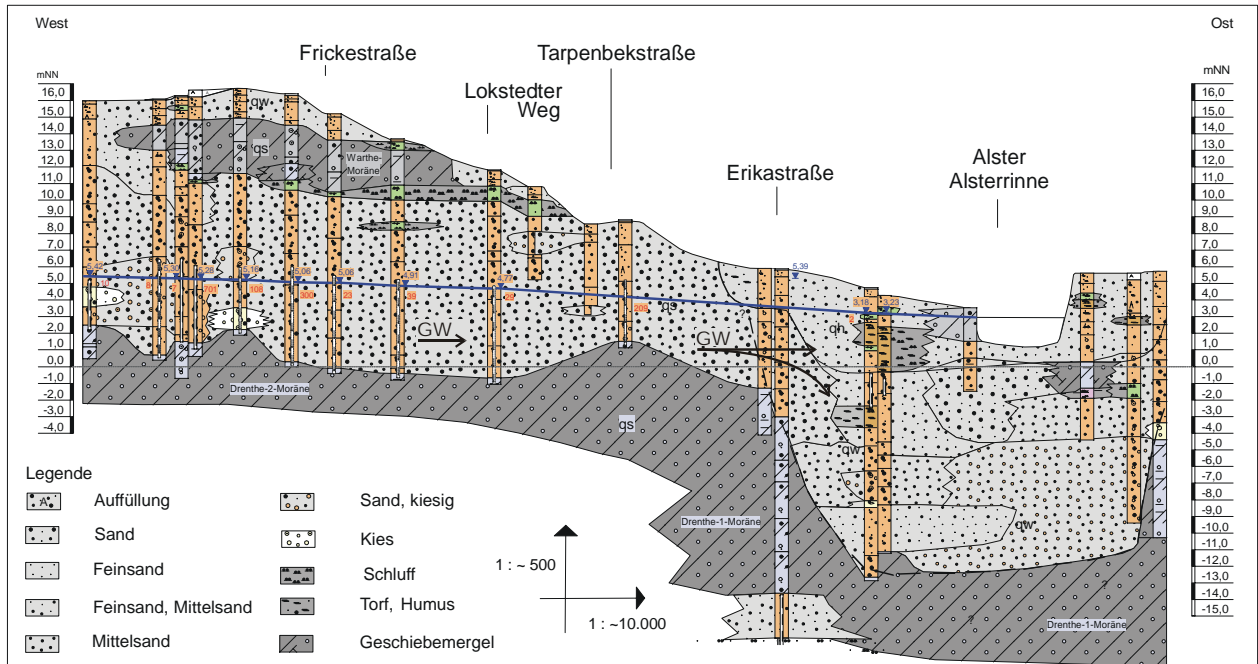


Abb. 2: Hydrogeologischer Profilschnitt durch den belasteten Bereich

2. Grundsätzlich geeignete Sanierungstechnologien

Im Rahmen der Konzepterstellung wurden für die Sanierung des Grundwasserschadens Hamburg-Eppendorf umfangreiche Überlegungen zur Festlegung der ökologisch und ökonomisch optimalen Sanierungstechnologie durchgeführt. Hierbei sind zunächst die grundsätzlich geeigneten Ex-situ Verfahren und In-situ Verfahren identifiziert und bewertet worden. In einem zweiten Schritt wurden die Verfahren einander gegenübergestellt und das optimale Verfahren bzw. die optimale Verfahrenskombination ermittelt.

2.1 Ex-situ Verfahren

Bei den Ex-situ Verfahren wird durch Grundwasserentnahme der Grundwasserspiegel lokal abgesenkt, wodurch ein hydraulisches Gefälle zur Entnahmeeinrichtung hin erzeugt wird. Durch angepasste Platzierung der Entnahmeeinrichtungen und entsprechend abgestimmte Entnahmeraten kann somit eine hydraulische Kontrolle des zu sanierenden Grundwasserbereiches erreicht werden. Bei den Ex-Situ Verfahren ist die Art der Grundwasserförderung, die Aufbereitungstechnologie sowie die Ableitung des gereinigten Wassers für die Bewertung relevant.

Im Sanierungsfall Hamburg-Eppendorf kann die Grundwasserentnahme durch Sanierungsbrunnen (vertikal oder horizontal) oder durch einen Drainageschlitz erfolgen. Auf Grund der räumlichen Bedingungen und der Aquifereigenschaften sind Förderbrunnen hier die optimale Entnahmetechnologie.

Für die Wasseraufbereitung kommen biologische, chemische und physikalisch-chemische Verfahren in Frage. Bei den biologischen Verfahren wird in einem Reaktor versucht, das kontaminierte Wasser mikrobiologisch zu reinigen. Dieses Verfahren ist für LCKW grundsätzlich wenig geeignet. Bei den chemischen Verfahren erfolgt der Schadstoffabbau durch die Zugabe von Oxidationsmitteln, vorzugsweise Ozon oder Wasserstoffperoxid, die die Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen der Schadstoffe oxi-

dieren und diese so beseitigen. Auf Grund der hohen Betriebskosten für die Erzeugung der Oxidationsmittel und die Prozesssteuerung werden diese Verfahren kaum eingesetzt. Bei den physikalisch-chemischen Verfahren kommt vor allem das Strippen der Schadstoffe mit nachgeschalteter Aktivkohleadsorption zum Einsatz. Dieses Verfahren ist für die vorhandenen Schadstoffe gut geeignet und stellt den Stand der Technik dar.

Für die Beseitigung des gereinigten Grundwassers stehen im Allgemeinen die Reinfiltration, die Einleitung in das Schmutzwassersiel und die Einleitung in ein Oberflächengewässer zur Verfügung. Die Reinfiltration ist bei Ex-Situ Maßnahmen grundsätzlich anzustreben, da sie die Entnahme des Grundwassers unmittelbar ausgleicht und damit den Einriff in das natürliche Regime minimiert. Eine Reinfiltration kann zusätzlich die Sanierung unterstützen, wenn z.B. eine Schadstofffahne fokussiert wird. Eine Reinfiltration sollte jedoch nicht im kontaminierten Grundwasser erfolgen, daher resultieren aus ihr oft hohe Investitionskosten für Leitungen und Brunnen. Bei der Einleitung in das Schmutzwassersiel (Indirekteinleitung) ist eine Reinigung des Grundwassers von solchen Stoffen erforderlich, die in der Kläranlage nicht problemlos abgebaut werden können. Daher wären die LCKW vor der Indirekteinleitung aus dem entnommenen Grundwasser zu entfernen, so dass hier kein Vorteil durch eine verminderte Aufbereitung zu erwarten wäre. Es fallen allerdings hohe Sielgebühren an. Die Möglichkeiten für eine Einleitung in ein Oberflächengewässer (Direkteinleitung) hängt von dem Vorhandensein eines solchen Gewässers ab. Für den Abstrombereich ist die Direkteinleitung in die Alster generell möglich, die geforderten Einleitwerte können durch eine Wasseraufbereitungsanlage eingehalten werden. Im Bereich des Schadenszentrums steht kein geeigneter Vorfluter zur Verfügung, daher ist hier die Reinfiltration die Vorzugslösung.

Die Vorzugsvariante für die Ex-situ Verfahren sieht daher die Entnahme durch Sanierungsbrunnen, die physikalisch-chemische Aufbereitung durch Aktivkohleadsorption (ggf. mit Strippkolonne) sowie die Reinfiltration (Schadenszentrum) bzw. Direkteinleitung (Abstrombereich) vor. Diese Technologie wird im weiteren als hydraulische Sanierung oder Pump & Treat bezeichnet.

2.2 In-situ Verfahren

In-situ Verfahren nutzen den Aquifer als Reaktionsraum, wobei durch Brunnen, Pegel oder Injektionen Hilfsstoffe eingebracht werden, die den chemischen oder biologischen Umbau der im Grundwasser befindlichen Schadstoffe bewirken oder unterstützen. Für eine Bewertung sind hier Zugänglichkeit bzw. Platzbedarf, Energiekosten bzw. Kosten von Chemikalien/Hilfsstoffen im Sanierungsbetrieb und damit die Sanierungsdauer von besonderer Bedeutung.

Bei den In-situ Verfahren kommen grundsätzlich die gleichen Verfahren zur Anwendung wie für die Ex-situ Aufbereitung, also biologische, chemische und physikalisch-chemische Verfahren. Die Anwendbarkeit der einzelnen Verfahren unterliegt jedoch grundsätzlich anderen Bedingungen. Bei den physikalisch-chemischen Verfahren ist zunächst das Air-Sparging zu nennen, das dem Ex-situ Verfahren des Strippens entspricht. Hierbei werden die Schadstoffe durch Lufteinblasen in Grundwasserbrunnen entfernt. Auf Grund der geringen Reichweite der Brunnen ist hier ein sehr engmaschiges Brunnennetz erforderlich, das bei der intensiven Bebauung des Schadensbereiches nicht herstellbar wäre. Gleichzeitig werden bei diesem Verfahren die

Schadstoffe in die Bodenluft verlagert und müssen wiederum aus dieser entfernt werden. Auch dies ist unter den gegebenen Randbedingungen am Standort nicht möglich. Andere physikalisch-chemische Verfahren wie elektrokinetische Verfahren o.ä. scheiden auf Grund der vorhandenen Schadstoffe ebenfalls aus.

Die chemischen In-situ Verfahren entsprechen in ihrer Wirkungsweise den Ex-situ Verfahren, hier wird über Brunnen Oxidationsmittel in den Grundwasserleiter eingebracht. Problematisch ist auch hier die geringe Reichweite der Injektionen und die geringe Beständigkeit der Reagenzien. Auch mit einem Zusatz von Stabilisatoren und mit optimierter Durchmischung im Grundwasser durch Grundwasserzirkulationsbrunnen sind diese Verfahren am Standort nicht wirtschaftlich anwendbar.

Am weitesten verbreitet sind die biologischen In-situ Verfahren. Unter den entsprechenden Milieubedingungen sind die am Standort vorhandenen LCKW gut mikrobiologisch abbaubar. Voraussetzung für einen optimalen Prozess ist ein reduktiver Abbau der höher chlorierten LCKW unter anaeroben Bedingungen und ein oxidativer Abbau der niedrig chlorierten unter aeroben Bedingungen. Da in vielen Schadensfällen der reduktive Abbau unter natürlichen Bedingungen abläuft, sind die Voraussetzungen für den oxidativen Abbau durch Zugabe von Oxidationsmitteln einzustellen. Im LCKW-Schadensfall Hamburg-Eppendorf liegen jedoch zunächst oxidative Bedingungen vor, d. h. es müsste zunächst eine Milieuumkehr zu reduktiven Bedingungen erfolgen, z. B. durch die Zugabe von geeigneten Hilfsstoffen oder Co-Substraten über Brunnengalerien. Unter diesen Bedingungen werden die hochchlorierten LCKW vorrangig zu cis-1,2-Dichlorethen und Vinylchlorid umgesetzt. Nach erfolgter Umsetzung ist dann ein oxidierendes Milieu für den aeroben Abbau der niedrigchlorierten LCKW herzustellen. Dieses Verfahren wird auf Grund seiner Vorteile in der Anwendung bei der Variantendiskussion weiter berücksichtigt. Es entspricht im weitesten Sinne dem Enhanced Natural Attenuation (ENA).

2.3 In-situ Reinigungswände

Beim Einsatz einer Reaktiven Wand durchfließt das kontaminierte Grundwasser den Filterbereich eines in den Boden eingelassenen Körpers. Das Grundwasser durchströmt die mit reaktiven Materialien gefüllte Wand auf Grund seines natürlichen Fließgefälles, ohne dass von außen Energie zugeführt werden muss. Die Anlage wird dabei als langfristig wirksame Einrichtung im Abstrom senkrecht zur Grundwasserfließrichtung im Untergrund installiert. Den Filterbereich bilden entweder die komplette Wand (Permeable Wand) oder nach hydraulischer Modellierung positionierte Durchlassbereiche (Gates) in Verbindung mit einem Leitwandsystem (Funnel and Gate - F&G). Während des Durchströmens des Filters werden die im Grundwasser befindlichen Schadstoffe mit Hilfe der speziellen Füllmaterialien entweder abgebaut, gefällt oder adsorbiert.

Im Bereich des Grundwasserschadens Hamburg-Eppendorf muss das Grundwasser hauptsächlich von LCKW gereinigt werden. Beim Einsatz eines reaktiven Systems wäre der Abbau (Dehalogenierung) von LCKW durch Reduktion an nullwertigem Eisen in Form von Eisenspänen möglich. Zur Erfassung der LCKW-Fahne in der gesamten Breite ist eine Baulänge von ca. 630 m erforderlich (Ergebnis der hydraulischen Modellierung). Um bei diesen Abmessungen eine wirtschaftliche Herstellung zu ermöglichen, sollte ein Funnel and Gate System gewählt werden, bei dem die Abmessungen der Gates auf das hydraulisch erforderliche Mindestmaß be-

schränkt werden. Das Verfahren wird in Form eines Funnel and Gate Systems für eine weitere Betrachtung berücksichtigt, da es eine gute Wirksamkeit als Abstromsicherung zur Alster erwarten lässt und trotz hoher Investitionskosten als passives System geringe Betriebskosten verursacht.

3. Bewertung der Einzelvarianten und Auswahl der Variantenkombinationen zur Sanierung des Gesamtschadens

Auf Grund der unterschiedlichen Sanierungsrandbedingungen im Bereich des Schadenszentrums und des Abstroms erscheint es sinnvoll, diese Bereiche hinsichtlich der Durchführung von Grundwassersanierungsmaßnahmen getrennt voneinander zu betrachten. Für die Erreichung des Sanierungszieles ist eine Fahnensanierung im Abstrom erforderlich. Zur Optimierung der Maßnahme kann zusätzlich eine Sanierung im Bereich der Quelle sinnvoll sein. Die für das Schadenszentrum und den Abstrombereich ausgearbeiteten Sanierungsvarianten werden miteinander kombiniert, um die optimale Sanierungsstrategie für den gesamten Bereich des Grundwasserschadens zu entwickeln.

Einzelvarianten zur Sanierung Schadenszentrum (Abb. 3)

- Variante A – Pump & Treat gesamtes Schadenszentrum
- Variante B – Pump & Treat Quellbereich

Einzelvarianten zur Sanierung Abstrombereich (Abb. 4)

- Variante 1 – Pump & Treat durch Brunnengalerie
- Variante 2 – Funnel and Gate System
- Variante 3 – In-situ Biologie

Im nächsten Schritt sind die Maßnahmen für das Schadenszentrum (Index A und B) mit den Maßnahmen des Abstroms (Index 1 bis 3) zu Sanierungsvarianten (Index A1 etc.) kombiniert:

Kombinierte Sanierungsvarianten Gesamtbereich:

Variante A1 - Pump & Treat im Schadenszentrum kombiniert mit Pump & Treat durch Brunnengalerie im Abstrom

Variante A2 - Pump & Treat im Schadenszentrum kombiniert mit Funnel & Gate System im Abstrom

Variante B1 - Pump & Treat im Quellbereich kombiniert mit Pump & Treat durch Brunnengalerie im Abstrom

Variante B2 - Pump & Treat im Quellbereich kombiniert mit Funnel & Gate System im Abstrom

Variante A3 - Pump & Treat im Schadenszentrum kombiniert mit In-situ Biologie

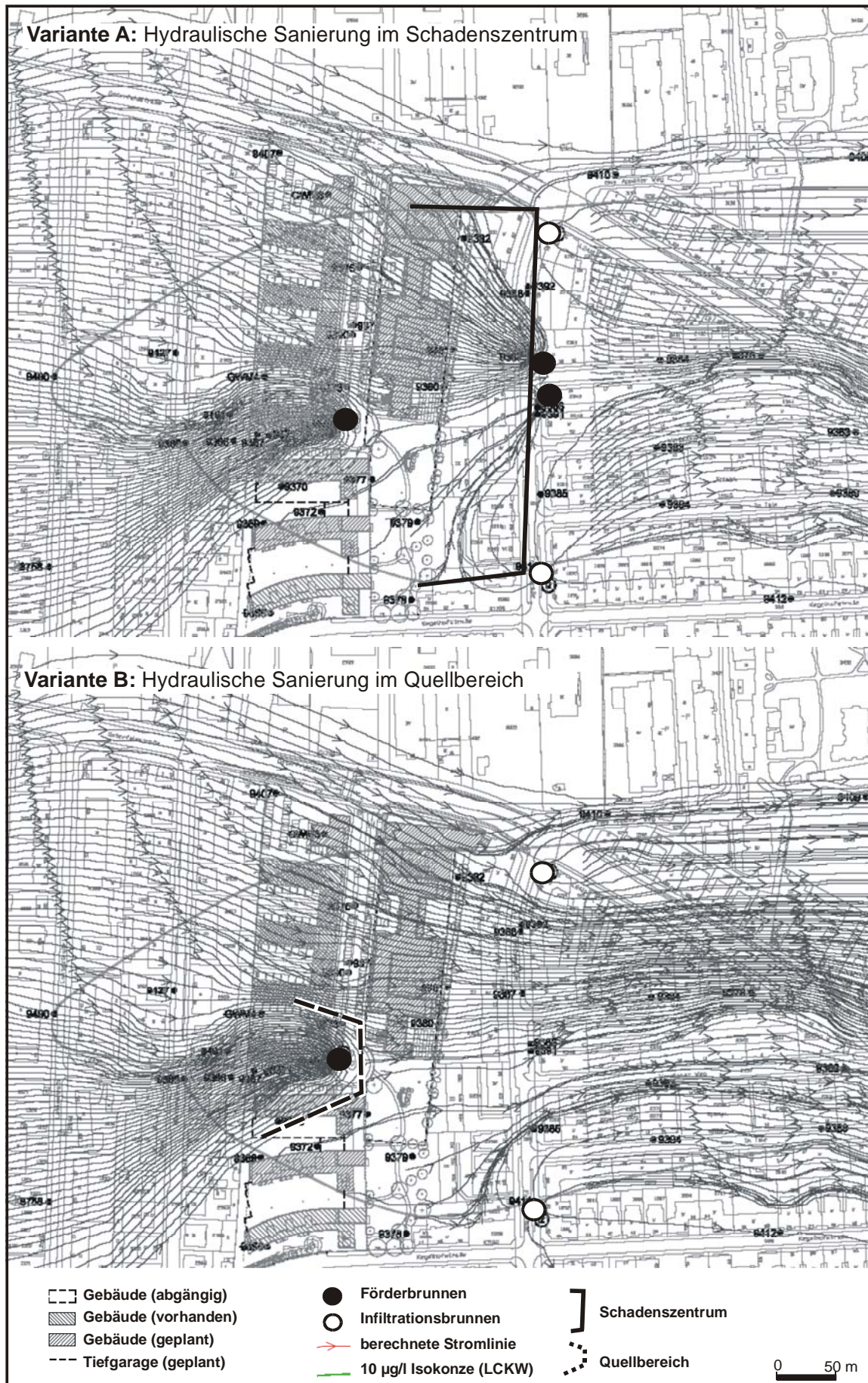


Abb. 3: Sanierungsvarianten im Schadenszentrum und im Quellbereich

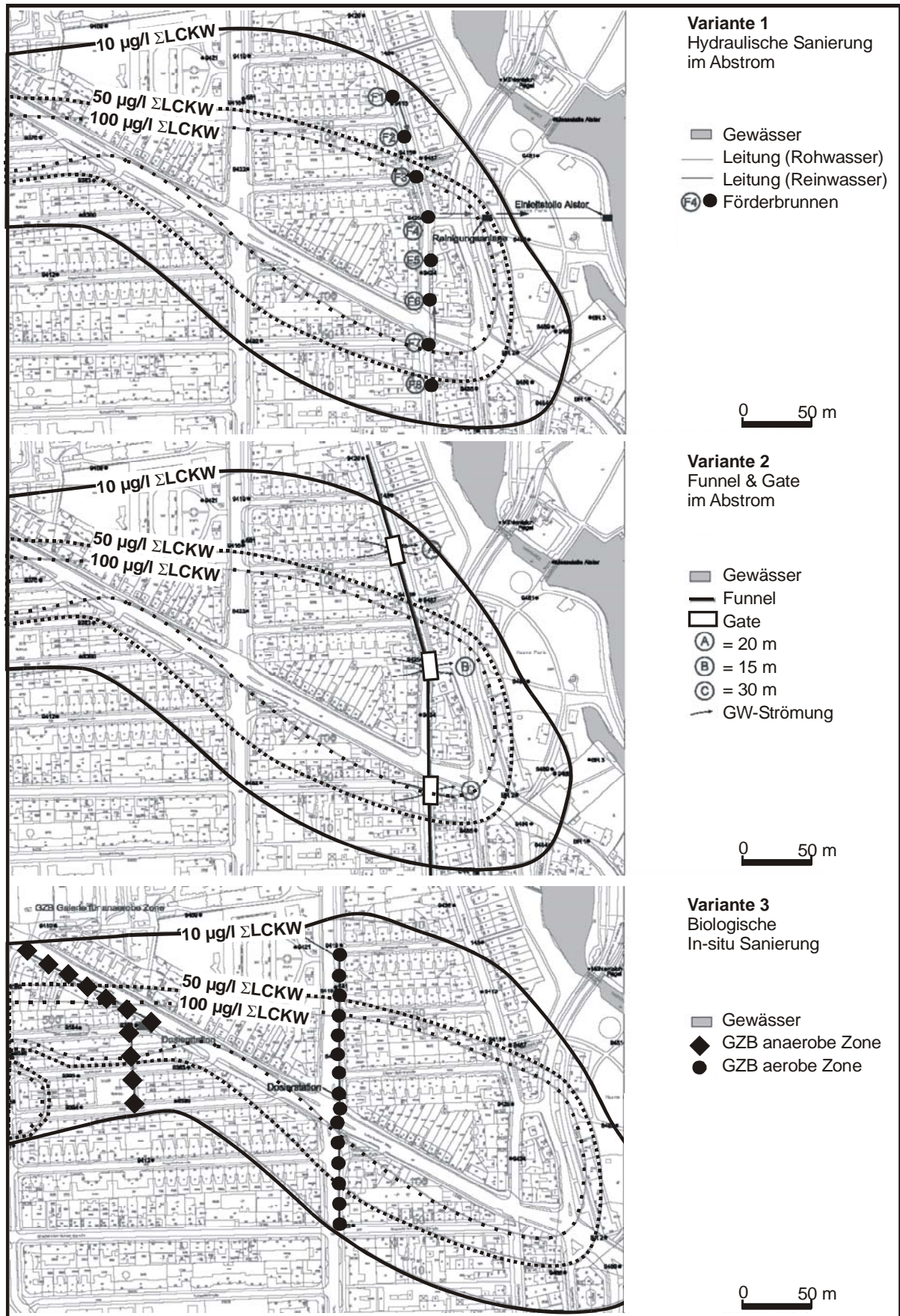


Abb. 4: Sanierungsvarianten im Abstrombereich

Die Vorgehensweise der nicht-monetären Bewertung ist in der Tabelle 1 dargestellt:

Bewertungskriterium	Pump+Treat	Pump+Treat	Pump+Treat	In-situ	In-situ	Reaktive
	phys.-chem	chemisch	biologisch	chemisch	biologisch	Wand
Wirksamkeit						
Gefahrenabwehr Grundwasser	+	+	+	+	+	+
Sanierungsdauer	+	+	-	+	+	+
Flexibilität/Beherrschbarkeit von Inputschwankungen	+	+	-	-	-	-
Reinigungsleistung der Sekundärtechnik (bei pump + treat)	+	0	-	0	0	0
Schadstoffaustrag/Restrisiko	+	+	-	-	-	+
Herstellbarkeit						
Standortvoraussetzungen (geol./hydrogeol.)	+	+	+	-	-	0
Flächenbedarf	+	+	-	+	+	-
Infrastrukturbedarf	-	-	-	0	0	+
Arbeits- und Emissionsschutz	0	0	0	+	+	-
Zeitbedarf	+	+	+	+	+	-
Wartung/Überwachung						
Wartungsaufwand	-	-	-	0	0	+
Überwachungsaufwand	0	0	0	-	-	0
Kontrollierbarkeit des Sanierungserfolges	+	+	+	-	-	+
Störanfälligkeit	-	-	-	+	+	+
Auswirkungen/Umweltverträglichkeit						
Beeinträchtigung Anwohner/Betriebe	0	0	-	+	+	+
Material-/Rohstoffverbrauch	0	-	+	-	-	+
Reststoffanfall	-	+	+	+	+	+
Energiebedarf Herstellung/Betrieb	0	-	0	+	+	0
Wirtschaftlichkeit						
Investitionsbedarf	+	0	+	+	+	-
Betriebskosten	0	-	0	-	+	+
Sonstiges						
Genehmigungsfähigkeit	+	+	+	-	0	+
Entwicklungsstand/Referenzen	+	-	-	0	0	0
Zusätzlicher Untersuchungsaufwand	+	+	-	-	-	-
Summe Plus	+13	+11	+8	+10	+10	+12
Summe Minus	-4	-7	-11	-8	-7	-6
Gesamtbewertung	+9	+4	-3	+2	+3	+6

+ geeignet 0 neutral - weniger geeignet

Tab. 1: Bewertungsmatrix Sanierungsverfahren Abstrombereich

Der Abschätzung der jeweiligen Sanierungsdauer liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Die Sanierung der LCKW-Quelle in der ungesättigten Bodenzone ist im Bereich des Schadenszentrums erfolgt, d.h., es findet kein weiterer LCKW-Eintrag in das Grundwasser statt.
- Abstandsgeschwindigkeiten des Grundwassers gemäß der vom Geologischen Landesamt Hamburg durchgeführten hydraulischen Modellierungen.
- Zur Sanierung ist mindestens eine 5-fache Durchströmung des kontaminierten Bereichs erforderlich.
- Die Retardation für PER beträgt ca. 1,5.
- Bei biologischen In-situ Maßnahmen wird von einer Reduzierung der erforderlichen Sanierungsdauer um ca. 1/3 bezogen auf eine hydraulische Maßnahme ausgegangen.

Variante A1 und A2: Grundwasserfließzeit ca. 3,5 Jahre
Sanierungsdauer bei 5-facher Durchströmung, Retardation 1,5 =
 $3,5 * 5 * 1,5 =$ **25 Jahre**

Variante B1 und B2: Grundwasserfließzeit ca. 4 Jahre
Sanierungsdauer bei 5-facher Durchströmung, Retardation 1,5 =
 $4 * 5 * 1,5 =$ **30 Jahre**

Variante 1 und 2: Grundwasserfließzeit ca. 4,5 Jahre
Sanierungsdauer bei 5-facher Durchströmung, Retardation 1,5 =
 $4,5 * 5 * 1,5 =$ **34 Jahre**

Variante A3: Verkürzung der Dauer gegenüber Variante A1 um ca. 1/3 =
 $25 * 0,66 =$ **17 Jahre**

Es wird ersichtlich, dass die Sanierungsdauer für den Bereich des Schadenszentrums durch eine hydraulische Maßnahme nicht verkürzt wird. Dies ist durch die hydraulische Modellierung verifiziert worden und kann durch die von Natur aus hohen Strömungsgeschwindigkeiten des Grundwassers am Standort erklärt werden, die bis zu 400 m/a betragen.

4. Kosten-Nutzen-Analyse der zur Verfügung stehenden Varianten

Im Rahmen der Kosten/Nutzen-Analyse werden die untersuchten Sanierungsvarianten im Zentrum und an der Fahnen Spitze einzeln und in Kombination bewertet. Dabei werden jeweils die notwendige Sanierungsdauer und die Gesamtkosten berücksichtigt (Tab. 2). Mit Hilfe der Barwertmethode werden die anfallenden Kosten über die gesamte Sanierungsdauer ermittelt. Als optimale Variante wird die Maßnahme umgesetzt, die nach ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten die beste Lösung darstellt.

Kombinierte Varianten	Einzelvarianten Zentrum: Index "A" und "B" Abstrom: Index "1" bis "4"	Betriebsdauer (Jahre)	Betriebskosten* gesamt (EUR)	Investkosten* gesamt (EUR)	Gesamtkosten* gerundet (EUR)
A1			4.162.500	937.000	5.100.000
	Variante A: pump + treat Schadenszentrum 10 m³/h	5	750.000	470.000	1.220.000
	Variante 1: pump + treat Abstrom - 9m³/h	25	3.412.500	467.000	3.880.000
A2			750.000	3.192.000	3.940.000
	Variante A: pump + treat Schadenszentrum 10 m³/h	5	750.000	470.000	1.220.000
	Variante 2: Funnel & Gate System im Abstrom	25	0	2.722.000	2.720.000
B1			4.265.000	783.000	5.050.000
	Variante B: pump + treat Schadenszentrum 4 m³/h	2,5	170.000	316.000	490.000
	Variante 1: pump + treat Abstrom - 9m³/h	30	4.095.000	467.000	4.560.000
B2			170.000	3.038.000	3.210.000
	Variante B: pump + treat Schadenszentrum 4 m³/h	2,5	170.000	316.000	490.000
	Variante 2: Funnel & Gate System im Abstrom	30	0	2.722.000	2.720.000
Variante 1			4.641.000	467.000	5.110.000
	Variante 1: pump + treat Abstrom - 9m³/h	34	4.641.000	467.000	5.110.000
Variante 2			0	2.722.000	2.720.000
	Variante 2: Funnel & Gate System im Abstrom	34	0	2.722.000	2.720.000
A3			2.365.000	1.081.000	3.450.000
	Variante A: pump + treat Schadenszentrum 10 m³/h	5	750.000	470.000	1.220.000
	Variante 3: In-situ Biologie mit GZB im Abstrom	17	1.615.000	611.000	2.230.000

* Nominalkosten ohne Berücksichtigung von Kostenbarwerten

Tab. 2: Kostenübersicht der Sanierungsvarianten (Einzelvarianten Zentrum/Abstrom sowie kombinierte Varianten)

Die Herstellkosten und jährlichen Betriebskosten der Sanierungsmaßnahmen werden an Hand von Marktpreisen abgeschätzt. Die Ermittlung der geschätzten Gesamtkosten über die voraussichtliche Sanierungsdauer erfolgt sowohl statisch (Nominalkosten ohne Abzinsung) als auch dynamisch unter Berücksichtigung unterschiedlicher Zinssätze (3%, 4%, 5%, 6,25%) nach der Barwertmethode. Hierbei ist 6,25% der kalkulatorische Zinssatz der BSU, der jedoch nicht inflatorisch bereinigt ist. Gem. LAWA-Leitfaden sollte für dynamische Kostenvergleichsrechnungen ein Zinssatz von 3% zugrundegelegt werden. Der Zeitanatz für die Sanierungsdauer ist jeweils konservativ gewählt.

Im Vergleich der Sanierungsvarianten wird deutlich, dass die Varianten 1 und 2 trotz der längsten Laufzeit bei einer Betrachtung der abgezinsten Barwerte im unteren bzw. mittleren Bereich der Kostenspanne liegen (Tab. 3). Dies ist dadurch bedingt, dass keine zusätzliche Investition für eine Sanierungsanlage im Schadenszentrum erforderlich wird. Der Vergleich mit den Varianten A1 und A2 macht folgendes deutlich:

- Eine zusätzliche Sanierungsmaßnahme im Schadenszentrum verkürzt nicht den Zeitraum, in dem im Schadenszentrum der Sanierungsleitwert unterschritten wird.
- Die Sanierungszeit der Fahne wird durch eine zusätzliche Sanierung im Schadenszentrum zwar verkürzt, ist jedoch nach der Barwertmethode mit deutlich höheren Gesamtkosten verbunden als eine reine Abstomsanierung.
- Bei einer Nutzen-Kosten Betrachtung entsteht kein Vorteil durch eine zusätzliche Maßnahme im Schadenszentrum.

Variante	Maßnahmen Zentrum / Fahne	San.dauer Zentrum (Jahre)	San.dauer Fahne (Jahre)	Sanierungskosten über Laufzeit	
				abgezinst Barwerte gerundet (EUR) Zinssatz 3%	Nominalwerte gerundet (EUR)
Variante A1	hydraulisch 10 m³/h / hydraulisch 9 m³/h	3 - 5	25	3.810.000	5.100.000
Variante A2	hydraulisch 10 m³/h / funnel & gate	3 - 5	25	3.750.000	3.940.000
Variante B1	hydraulisch 4 m³/h / hydraulisch 9 m³/h	3 - 5	30	3.530.000	5.050.000
Variante B2	hydraulisch 4 m³/h / funnel & gate	3 - 5	30	3.170.000	3.210.000
Variante 1	-- / hydraulisch 9 m³/h	3 - 5	34	3.300.000	5.110.000
Variante 2	-- / funnel & gate	3 - 5	34	2.720.000	2.720.000
Variante A3	hydraulisch 10 m³/h / In-situ Biologie	3 - 5	17	2.830.000	3.450.000

Tab. 3: Übersicht der geschätzten Sanierungslaufzeiten und der Kosten der Sanierungsvarianten

Die In-situ Variante A3 wird trotz der relativ kurzen Sanierungsdauer und der niedrigen Kosten nicht als Vorzugsvariante weiter verfolgt, da auf Grund der schlechten technische Realisierbarkeit im innerstädtischen Bereich erhebliche Schwierigkeiten bei der Umsetzung zu erwarten wären.

Als Vorzugsvariante wird eine Abstomsicherung an der Alsterrinne ohne zusätzliche Maßnahme im Schadenszentrum gewählt, entsprechend der Sanierungsvariante 1 oder 2.

5. Möglichkeiten der Realisierung einer Reaktiven Wand als Funnel & Gate im innerstädtischen Bereich

Mit Hilfe des hydraulischen Modellierungsprogramms MODFLOW wurde das Fließverhalten des Grundwassers hinsichtlich der Strömungswege untersucht und verschiedene Lagen der Wand simuliert. Die Trassierung ergab sich aus der Untersuchung planungsrelevanter Einflussfaktoren im hydrogeologischen, geologischen und infrastrukturellen Bereich sowie aus der Verteilung der Schadstoffkonzentrationen. Das Funnel wird auf etwa 680 m Länge ausgelegt. Zur Abreinigung der Schadstoffe im Grundwasser wurden nach der hydraulischen Modellierung drei Gates mit jeweils 60 m² Grundfläche errechnet und positioniert. Die Breite der Schadstofffahne beträgt hier etwa 450 m. Dabei laufen einige, den Schadensherd tangierende Strömungslinien südlich an der Wand vorbei (Abb. 5). In diesem Bereich wurden jedoch keine nennenswerten Schadstoffkonzentrationen gemessen. Es wird daher davon ausgegangen, dass diese Länge der Wand zur Erfassung der Schadstofffahne ausreicht.

In dem Bereich der Trasse sind Leitungen der folgenden öffentlichen Versorgungsträger vorzufinden:

- Hamburger Wasserwerke (HWW)
- Hamburger Stadtentwässerung (HSE)
- Hamburger Gaswerke – Hanse/EON
- Hamburger Elektrizitätswerke (HEW)
- Deutsche Telekom
- Kabel Deutschland GmbH

In der geplanten Trasse der Reaktiven Wand verlaufen mehrere kreuzende Leitungen der o. g. Versorgungsträger. Die Versorgungsträger betreiben zusätzlich Einstiegs- und Kontrollschächte. Die Anordnung der einzelnen Leitungen ist unterschiedlich. Telekommunikations-, Gas- und Elektrizitätsleitungen befinden sich hauptsächlich im Gehwegbereich, während Wasser- und Entwässerungsleitungen im Fahrbahnbereich liegen.

Da in der Trasse mehrere Randbedingungen im Bebauungs- und Oberflächenbereich bestehen, muss ein Bauverfahren ausgewählt werden, das diese Punkte berücksichtigt.

- Durch die relativ alte, engstehende Bebauung sind Baumaßnahmen erschütterungs- und vibrationsarm auszuführen.
- Durch die relativ engen Straßenverhältnisse und den aufrechtzuerhaltenden Verkehr sind die räumlichen Kapazitäten einer seitlichen Ausdehnung der Baustelle begrenzt. Werden Vollsperrungen notwendig, ist zumindest der Zugang zu den Häusern und Gewerbebetrieben zu gewährleisten.
- Die Lärmentwicklung ist zu minimieren.

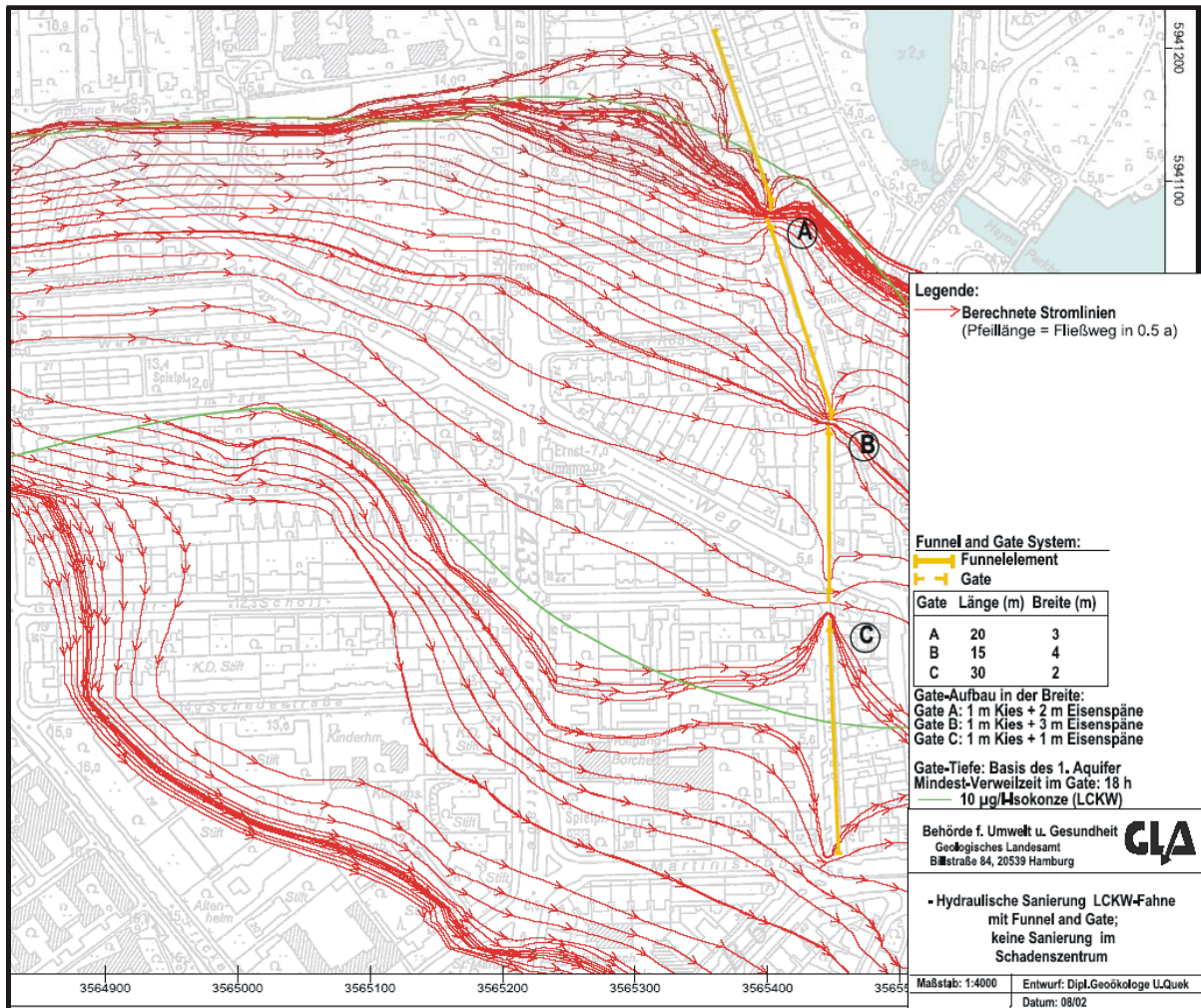


Abb. 5: Sanierungsvariante 2, Funnel & Gate im Abstrom

Die Auswahl eines geeigneten Herstellungsverfahrens kann im Vorwege zur Minimierung der Risiken und Probleme in der Bauphase beitragen. Zur Diskussion steht daher die Ausführung des Funnel als Spundwandbauwerk, als Bohrpfahlwand oder als Einphasenschlitzwand. Für spezielle Zwangspunkte kann eine Soilcrete-Wand zum Einsatz kommen.

- Der größte Teil des Funnel kann als Einphasen-Schlitzwand ausgeführt werden. Die Platzverhältnisse im nördlichen Abschnitt werden bei Anwendung eines entsprechend kleinen Gerätes und der "vor-Kopf" Arbeitsweise als ausreichend angesehen. Zusätzlich existieren in diesem Abschnitt die geringsten Aushubtiefen.
- Die Sielkreuzungen können mit dem Soilcrete-Injektionsverfahren (HDI-Wand) in die Dichtwand eingebunden werden.
- Im südlichen Bereich kann das Funnel als Spundwand weitergeführt werden, da hier die engsten Platzverhältnisse vorherrschen.
- Für den Bau der Gates kann eine Bohrpfahlwand zur Anwendung kommen. Die Anbindung an das Funnel erfolgt über das Eintreiben bzw. Einschlitzen in den Gate-Körper.

Für die Herstellung des Funnel & Gate Systems sind die Kosten von entscheidender Bedeutung (Tab. 4). Es wird angenommen, dass 50% der Gasleitungen temporär

ausgebaut werden müssen. Eine Hochdruckgasleitung liegt im Bereich der HDI-Wand. Bäume müssen nicht gefällt werden. Dafür sind bei der Hälfte der Bäume die Wurzeln gegen Austrocknen und Beschädigungen zu schützen. Über die gesamte Länge ist die Straßenbeleuchtung einseitig zu demontieren. Alle Abwasserhausanschlüsse und 50% der Trummen müssen erneuert werden.

<i>Position</i>	<i>Faktor</i>	<i>Einheit</i>	<i>Menge</i>	<i>Einheits-Preis (EUR)</i>	<i>Gesamtsumme (EUR)</i>
Herstellungskosten					
Funnel als Spundwand	1/3	m ²	5.300	130	234.000
Zusatzkosten	1/3	m ²	5.300	20	36.000
Funnel als Schlitzwand	2/3	m ³	6.600	150	1.320.000
HDI-Wand (2-reihig)	pauschal	m ²	160	50.000	50.000
Gate als Bohrpfahl	1	m ²	1600	300	480.000
Füllmaterial	1	m ³	1600	350	560.000
Zwischensumme I					2.680.000
Zusatzkosten					
Gasleitungen < 90 mm	1	Stück	6	1.200	7.200
Gasleitungen ≥ 90 mm	1	Stück	3	3.000	9.000
Straßenbeleuchtung	1	Stück	20	2.000	40.000
Hausanschlüsse	1	m ³	132	350	46.200
Trummen	0,5	m ³	60	350	10.500
Wanddurchführungen	1	Stück	45	500	22.500
Elektroleitungen	1	pauschal	15 Leitungen	300.000	300.000
Wasserleitungen	1	m	700	250	175.000
Wasserhausanschlüsse	1	m	1125	150	170.000
Telekommunikation	1	pauschal	8 Leitungen	75.000	75.000
Bäume	1	Stück	20	2.000	40.000
Zwischensumme II					980.000
Gesamtsumme					3.660.000

Tabelle 4: Kostenschätzung für die Baurealisierung

6. Realisierung der Sanierung

Im Rahmen der Sanierungsstudie wurden Verfahren und Vorgehensweisen zur Sanierung des LCKW- Grundwasserschadens Hamburg-Eppendorf untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung für die am Standort vorliegenden Randbedingungen bewertet. Auf der Grundlage der Erkenntnisse aus der Studie wurden folgende Empfehlungen zum weiteren Vorgehen ausgesprochen: Als Vorzugsvariante für die Sanierung des Grundwasserschadens wird eine Brunnengalerie im Bereich der Fahnen spitze empfohlen. Eine zusätzliche aktive Sanierung im Schadenszentrum ist nicht sinnvoll, da hierdurch kein zeitlicher Vorteil für die Sanierung des Schadenszentrums sowie kein wirtschaftlicher Vorteil für die Gesamt sanierung entsteht.

Die für den Grundwasserschaden Hamburg-Eppendorf erarbeiteten Faktoren insbesondere in Bezug auf das enge Leitungsnetz und die beengten Platzverhältnisse zeigen deutlich auf, dass die Herstellung einer Reaktiven Wand in diesem Bereich nur mit sehr hohem technischen und zeitlichen Aufwand sowie mit einem hohen, vor Allem wirtschaftlichen Ausführungsrisiko verbunden ist. Allein die Schlussfolgerung, dass bei einer Wandlänge von ca. 600 m aus baupraktischen Überlegungen insgesamt vier verschiedene Bauverfahren (Spundwand, Einphasen-Schlitzwand, Soilcrete-Wand und überschnittene Bohrpfahlwand) zum Einsatz kommen sollen, zeigt, dass die Herstellung einer Dichtwand hier aus baupraktischen Gesichtspunkten nicht sinnvoll ist.

Zur Sanierung der Schadstofffahne wird im Abstrombereich eine Pump & Treat Maßnahme durchgeführt. Dazu wurden acht Förderbrunnen errichtet. Das geförderte Rohwasser wird unterflur in zwei getrennten Sammelleitungen einer Wasseraufbereitungsanlage zugeführt. Das aus den Förderbrunnen abgepumpte Grundwasser wird zunächst mittels Flockung / Kiesfilter vorgereinigt und im Weiteren über Wasseraktivkohle geleitet, an der die Schadstoffe direkt adsorbieren. Nach der Reinigung des Wassers wird das Reinwasser über eine Ablaufleitung und ein Einleitbauwerk in den Vorfluter Alster eingeleitet.

Mit der Durchführung der Maßnahme wurde im Oktober 2004 begonnen. Die Sanierungsanlage wird bis zum Frühjahr 2005 fertiggestellt, die Investitionskosten belaufen sich auf ca. 900.000,-- EUR. Der Sanierungsbetrieb beginnt im April 2005, die Sanierungsdauer ist zunächst auf 20 Jahre angelegt. Die jährlichen Betriebskosten werden derzeit mit ca. 100.000,-- EUR abgeschätzt.