

Erfolge und Grenzen der hydraulischen Sanierung von Grundwasserschäden

Dipl.-Geol. Andreas Zimmermann, GESA mbH / BvS

1. Einführung

Das Berliner Stadtgebiet weist mit seiner Gemengelage von Wohngebieten und schadstoffbelasteten Industriestandorten sowie den flächigen Verunreinigungen des oberen unbedeckten Grundwasserleiters im Einzugsgebiet zweier Wasserwerke deutschlandweit durchaus Alleinstellungsmerkmale auf. In Folge dieser Konstellation nehmen die Erkundung und hydraulische Sanierung von Grundwasserschäden hier einen breiten Raum ein.

Der Beitrag widmet sich deshalb ausgewählten Berliner Grundstücken, die dem Verwaltungsabkommen der Altlastenfinanzierung (nachfolgend: VA) unterfallen und mit hydraulischen Sanierungsverfahren bearbeitet wurden bzw. werden.

Bei Betrachtung der teils seit 1994 laufenden Maßnahmen sind erfolgreich und weniger erfolgreich bearbeitete Schadensfälle zu verzeichnen. Im Rückblick wird deutlich, dass die für eine hydraulische Sanierung prognostizierten Zeiträume und Sanierungskosten teilweise von dem erreichten Sanierungsstand abweichen. Obwohl schon lange Rebound- und Tailingeffekte bei der Grundwassersanierung bekannt sind, haben sich die Beteiligten bei der Maßnahmenplanung vielfach an zu optimistischen Zielsetzungen orientiert.

Nachfolgend werden die Verläufe von Berliner Grundwassersanierungsmaßnahmen deshalb einer kritischen Betrachtung unterzogen. Unabhängig davon, dass jeder Schadensfall seine eigene Spezifik entwickelt und somit Sanierungsmaßnahmen nur eingeschränkt miteinander verglichen werden können, lassen sich nach 15 Jahren der VA-Altlastenbearbeitung in Berlin eine Reihe von allgemeingültigen Schlussfolgerungen und Erkenntnissen ableiten, die wesentlich zur effizienten Bearbeitung der noch aktiven Sanierungsfälle beitragen und auch überregional von Interesse sein können.

2. Auswahl der Schadensfälle

In Berlin wurden 30 VA-Altlastenstandorte mit sanierungsrelevanten Grundwasserbelastungen festgestellt. Davon sind 24 Standorte saniert bzw. befinden sich in der aktiven Sanierung/Sicherung, 6 Standorte werden derzeit erkundet bzw. befinden sich in der Sanierungsplanung. Hinzu kommen drei flächig verunreinigte Transferpfade von grundstücksbezogenen Eintragsquellen zu den Fördergalerien der Wasserwerke Wuhlheide und Johannisthal. Die stoffliche Charakteristik der Grundwasserschäden ist in Tabelle 1 ausgewiesen.

	LHKW-Schäden	BTEX-Schäden	Komplexe GW-Schäden (LHKW, BTEX, CB, Alkylphenole, OCP)	PAK und MKW-Schäden (untergeordnet LCKW)	Sonstige Schäden (Cyanide, Arsen)	Summe
Anzahl der Grundstücke	16	4	4	5	1	30
Transferbereiche	2				1	3
Anteil in %	54	13	13	17	3	100

Tabelle 1: Charakterisierung von Grundwasserschäden bei VA-Standorten in Berlin

Wie die Tabelle 1 zeigt, sind LHKW- und BTEX-Monoschäden auf 20 von insgesamt 30 Flächen verbreitet. In den Transfergebieten dominieren ebenfalls LHKW-Belastungen, die sich über eine Fläche von ca. 10 km² erstrecken und von denen hier 3 Teilareale des Transferbereiches Nord in die vergleichende Betrachtung eingehen. Damit spiegelt die Situation im Ostteil Berlins eine ähnliche Schadstoffverteilung wider, wie sie bei einer deutschlandweiten Datenerhebung zu Grundwasserschäden ermittelt wurde, nämlich dass im überregionalen Maßstab ca. zwei Drittel aller Grundwasserschadensfälle LCKW-Belastungen sind.

Aufgrund des heterogenen und relativ hohen Schadstoffpotenzials der komplexen Grundwasserschäden, die nur individuell bewertet werden können und kaum quantitative Vergleichsbetrachtungen zulassen, konzentrieren sich die nachstehenden Ausführungen auf insgesamt 18 Grundwasserschäden mit ausschließlichen LHKW- bzw. BTEX-Belastungen. Sicherungsmaßnahmen, die allein als hydraulische Barriere ausgelegt sind, um den Schadstofftransport in den Grundwasseranstrom zu unterbinden oder den Anstrom zu den Wasserwerken zu sichern, bleiben unberücksichtigt, da deren Erfolg nicht an einer Schadenssanierung gemessen werden kann. Insoweit werden nur hydraulische Sanierungsmaßnahmen auf Grundstücken

und in definierten Transferbereichen betrachtet, die lediglich im Einzelfall auch eine parallele Sicherungsfunktion wahrnehmen.

Die ausgewählten Sanierungsfälle reichen bis in das Jahr 1994 zurück und fassen eine rd. 14jährige hydraulische Sanierungsbilanz zusammen. Die LHKW-Schäden bestehen aus einem über mehrere Grundstücke und den Transferpfad Nord reichenden FCKW-Eintrag und ansonsten aus LCKW-Belastungen (Tetrachlorethen, Trichlorethen, weniger cis-Dichlorethen und Monochlorethen). Überwiegende „Metabolitenschäden“ treten nur in einem Transferbereich auf. Als LHKW-Schaden wird im Folgenden die Mischung aus LCKW/FCKW-Belastungen bezeichnet, fehlt die FCKW-Indikation, handelt es sich um einen LCKW-Schaden. Von den drei betrachteten BTEX-Schäden können zwei als Xylol- und einer als Toluolschaden eingestuft werden.

3. Erkundung der Schadensfälle

Die Erkundung der hier betrachteten Grundwasserschäden erfolgte im Wesentlichen in den Jahren 1991-1994. Da hieraus unmittelbare Gefahren für die Berliner Wasserwerke (bzw. für das Schutzgut Mensch) abgeleitet wurden, haben THA/BvS und Land Berlin Ende 1994 die sogenannten „Vorgezogenen Maßnahmen“ beschlossen. Diese umfassten die hydraulische Sanierung und Sicherung auf Grundstücken mit gefahrenrelevanten Auswirkungen auf die beiden Wasserwerke. Auf der Grundlage des damaligen - aus heutiger Sicht vielfach unzureichenden - Erkenntnisstandes sind 1994/1995 die ersten der z. T. noch heute aktiven hydraulischen Grundwassersanierungen begonnen worden.

Die ersten Schadenserkundungen beinhalteten Boden-, Bodenluft- und Grundwasseruntersuchungen mit Rammkernsondierungen, ausgebauten Messstellen, Rammpegeln sowie Bodenluftpegeln.

Untersuchungsmethoden, die heute repräsentativere und differenziertere Gefährdungsabschätzungen und Schadenseingrenzungen gestatten, waren damals nicht Stand der Technik. Dies betrifft insbesondere:

- Bodenuntersuchungen im Linerverfahren zur Probenahme mit ungestörter Schichtenfolge,
- Entnahme von Feststoffproben aus dem gesättigten und ungesättigten Bereich mit leichtflüchtigen Komponenten,
- teufenorientierte Probenahme im Grundwasser mittels Drucksondierungen oder anderen dazu entwickelten Bohrverfahren und in-situ-Messtechnik.

Ohne Anwendung dieser Methoden galten viele Grundwasserschäden zu Beginn der hydraulischen Sanierung als scheinbar gut lokalisiert und abgegrenzt. Im Nachhinein offenbarten sich aber mit stagnierenden Sanierungsfortschritten wesentliche Erkundungsdefizite. Diese bestanden insbesondere in der mangelnden Kenntnis über die vertikale Schadstoffverteilung im Grundwasserleiter und die differenzierten Anreicherungsformen von Schadstoffen im gesättigten Bereich. Insoweit ist die Erkundung der Schadensfälle in den neunziger Jahren auch nicht als abschließend zu bezeichnen. Vielmehr wurden die aktiven Sanierungen in den letzten Jahren - gestützt von einem langfristigen Monitoring - von intensiven Untersuchungen zur Neubewertung des Schadensbildes und der Optimierung der Sanierungsverfahren geprägt. Somit bedeuten 15 Jahre ÖGP Berlin auch eine stetige Verbesserung der Methoden zur Schadenscharakterisierung.

4. Definition der Sanierungsziele

Ein grundsätzliches Erfordernis zur Prüfung von Maßnahmen zur Gefahrenabwehr wird seitens der zuständigen Behörde gemäß der seit 2005 geltenden Berliner Liste gesehen, wenn die Summe der LHKW im Grundwasser $>100 \mu\text{g/l}$ oder bei VC $>2,5 \mu\text{g/l}$ überschreitet. Die Sanierungszielwerte orientieren sich an den Geringfügigkeitsschwellenwerten der LAWA in Höhe von $20 \mu\text{g/l}$ (Summenparameter LHKW) und $0,5 \mu\text{g/l}$ (VC). Für BTEX gelten Sanierungszielwerte von $20 \mu\text{g/l}$ in der Summe und $1 \mu\text{g/l}$ bei Benzol. Da vom Gesetzgeber eine hinreichend bestimmte und tatsächlich erreichbare Zielvorgabe verlangt wird, liegt es im Ermessensspielraum der zuständigen Behörde, diese pauschalen und mit den realen Bedingungen meist nicht übereinstimmenden Zielwerte unter Berücksichtigung des Sanierungsverlaufes entsprechend anzupassen. Dies erfolgt in Berlin mit dem Zusatz in den Anordnungen, dass die Sanierung nach Abstimmung mit der Behörde unter bestimmten Bedingungen auch bei Nichterreichen der Sanierungszielwerte beendet werden kann.

Bei den VA-Schadensfällen hat die zuständige Behörde ihren Ermessensspielraum im Sinne der Verhältnismäßigkeit oftmals ausgeschöpft. So wurden z.B. in einem speziellen Fall Grundwasserbelastungen mit Konzentrationen um $500 \mu\text{g/l}$ LCKW in ihrer Ausdehnung erkundet und hinsichtlich ihres Gefahrenpotenzials und der Sanierungsfähigkeit bewertet. Nach

intensiver Prüfung und Abwägung der Verhältnismäßigkeit der Mittel verständigten sich BvS und Land Berlin darauf, hier keine Sanierungsmaßnahme zu veranlassen. Eine solche Herangehensweise ist im Einzelfall begründet, wenn sich Grundwasserbelastungen in dieser Größenordnung außerhalb der Einzugsgebiete von Wasserwerken befinden und die Grundstücksgrenzen nicht überschreiten.

Die im Folgenden betrachteten Schadensfälle wiesen zum Beginn der Sanierung ausnahmslos sehr hohe LHKW- oder BTEX-Konzentrationen in Größenordnungen von mehreren Zehntausend µg/l auf, so dass in diesem Beitrag nicht das unbestrittene Erfordernis zur Gefahrenabwehr, sondern der Sanierungsverlauf der hydraulischen Maßnahmen im Hinblick auf die Verhältnismäßigkeit der Zielwerte diskutiert wird.

5. Verlauf der hydraulischen Sanierungsmaßnahmen

Für die 18 ausgewählten Sanierungsfälle können drei unterschiedliche generalisierte Verlaufskurven abgeleitet werden, die in der Abbildung 1 dargestellt sind.

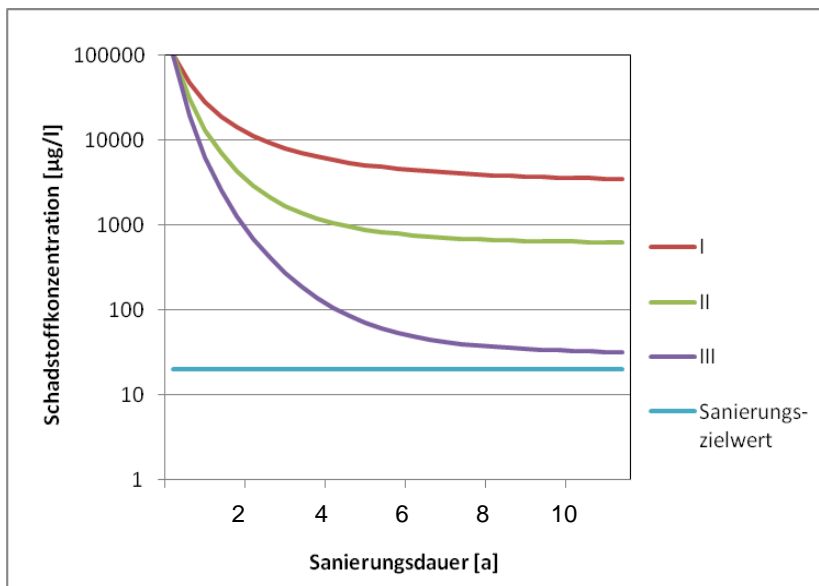


Abbildung 1: Sanierungsverläufe bei LHKW- und BTEX-Grundwasserschäden in Berlin (generalisiert)

Der Diskussion dieser Sanierungsverläufe in den Abschnitten 5.1 - 5.3 soll vorangestellt werden, dass sich der Autor über die begrenzten Möglichkeiten einer aussagefähigen vergleichenden Betrachtung verschiedener Sanierungsfälle durchaus im Klaren ist. Jeder Schaden stellt einen spezifischen Einzelfall dar – eine alte Regel der Altlastenbearbeitung, die auch von den hier behandelten Beispielen bestätigt wird. Insoweit sind die in den Tabellen 2 bis 4 miteinander verglichenen Daten als Größenordnung zu verstehen, ohne dabei die Einzelspezifika eines jeden Falles gebührend berücksichtigen zu können.

Die Zusammenstellung dieser Daten erfolgte auf der Grundlage der nachstehenden Kriterien:

Schaden:	Grundwasserbelastungen auf Grundstücken und im Transferbereich Nord (im Transfer Nord wurden drei räumlich definierte Sanierungsmaßnahmen berücksichtigt),
Lage:	Hydrogeologische Einordnung der Schäden, U= Urstromtal; H=Hochfläche,
Zeit:	Zeitdauer (in Jahren) von der Inbetriebnahme bis zum Rückbau der hydraulischen Sanierung, mit + gekennzeichnete Maßnahmen bezeichnen derzeit noch aktive hydraulische Sanierungen,
SWM:	Geförderte und behandelte schadstoffbelastete Grundwassermenge,
OSK-B:	Obere Schadstoffkonzentration zu Sanierungsbeginn,
MSK-A:	Mittlere aktuelle Schadstoffkonzentration, bei den beendeten Maßnahmen ist diese identisch mit den Durchschnittswerten bei Abschluss der hydraulischen Sanierungsmaßnahme in den Sanierungsbrunnen,
S-Austrag:	Schadstoffaustrag für LHKW bzw. BTEX mittels der hydraulischen Sanierung aus dem Grundwasser
G-Kosten:	Gesamtkosten für die hydraulische Sanierung einschließlich der ingenieurtechnischen und analytischen Sanierungsbegleitung,
S-Kosten:	Spezifische Kosten pro kg ausgetragener Schadstofffracht für LHKW bzw. BTEX.

5.1 Sanierungsverlauf I – nicht erfolgreich abgeschlossene hydraulische Sanierungen

Der Verlauf I zeigt die Entwicklung der Schadstoffkonzentrationen für diejenigen LHKW- und BTEX-Schäden, für die mit der hydraulischen Sanierung allein die Sanierungsziele nicht erreicht werden konnten. Davon sind sechs der untersuchten Fälle umfasst, d. h. rd. 33 % der betrachteten Objekte.

Schaden	Lage	Zeit (a)	SWM (m ³)	OSK-B (µg/l)	MSK-A (µg/l)	S-Austrag (kg)	G-Kosten (EUR)	S-Kosten (EUR)
1-(LCKW)	U	12+	2.900.000	80.000	1.000	2.630	1.300.000	490
2-(LCKW)	H	5	293.000	80.000	2.000	310	510.000	1.645
3-(LHKW)	U	4	130.000	2.500	700	90	180.000	2.000
4-(BTEX)	U	13+	2.850.000	20.000	2.000	3.600	2.200.000	611
5-(BTEX)	U	4	540.000	30.000	1.000	940	1.200.000	1.270
6-(LCKW)	H	9,5+	350.000	50.000	4.000	3.500	815.000	233

Tabelle 2: Eckdaten zur Charakterisierung des Sanierungsverlaufes I

Der Sanierungsverlauf I zeigt für diese Fälle, unabhängig von den z. T. sehr hohen Ausgangsbelastungen, eine weitgehende Stagnation bei der Reduzierung der Schadstoffkonzentrationen im Bereich von ca. 2.000 µg/l LHKW/BTEX. Bei den vier im Urstromtal befindlichen Standorten handelt es sich um meist langjährig betriebene Grundwassersanierungen in einem mittel- bis feinkörnigen, gut durchlässigen Aquifer. Problematisch wirken hier die meist weichselglazialen bindigen Bildungen, welche die Sande vielfach mit Schluffen und Torfen durchsetzen und aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung Schadstoffe binden. Da diese Sedimente mit geringeren Fließgeschwindigkeiten durchströmt werden, sind die hier akkumulierten Schadstoffe hydraulisch nur schwer extrahierbar und verursachen daher den ungenügenden Sanierungserfolg.

Die bisher aufgewandten Kosten für die Maßnahmen mit dem Sanierungsverlauf I betragen rd. 6,2 Mio. EUR. Die spezifischen Kosten des Schadstoffaustrags zeigen eine große Bandbreite und belaufen sich im Durchschnitt auf 1.040 EUR. Hier zeigen die Beispielfälle „Schaden 1“ und „Schaden 6“, dass auch bei den als nicht erfolgreich eingeschätzten hydraulischen Sanierungen Schadstoffe relativ kostengünstig über lange Sanierungszeiträume ausgetragen werden können. Längerfristig betrachtet würden sich aber auch diese spezifischen Kosten mit steigender Tendenz entwickeln, da hier mit nachträglichen Erkundungen ein Schadstoffpotential ermittelt wurde, dass hydraulisch mit einem verhältnismäßigen Aufwand nicht sanierbar ist. Diese beiden Fälle werden ebenso wie die im Kapitel 6 diskutierten „Schaden 4“ und „Schaden 5“ derzeit zusätzlich bzw. alternativ mit ergänzenden Sanierungsverfahren bearbeitet.

Die Sanierungen der Schadensfälle „Schaden 2“ (vgl. Kap. 6) und „Schaden 3“, die mit Abstand die höchsten spezifischen Kosten in Höhe von durchschnittlich rd. 1.800 EUR/kg verursachten, wurden nach relativ kurzen Laufzeiten aufgrund des mangelnden Maßnahmenerfolges abgebrochen. Dies bedeutet, dass hierfür Mittel in Höhe von rd. 0,7 Mio. EUR ohne ein nachhaltiges Ergebnis aufgewandt wurden.

BvS und Land Berlin haben sich mit dem Verlauf der unbefriedigenden Sanierungen intensiv auseinandergesetzt und für die im Urstromtal gelegenen Schadensfälle folgende Ursachen identifiziert:

- Die wesentlichen Schadenserkundungen erfolgten von Anfang bis Mitte der 90er Jahre zu einem relativ frühen Zeitpunkt der Altlastenbearbeitung im Rahmen des VA.
- Die späteren Nachuntersuchungen zeigten erhebliche Defizite bei den früheren Schadenserkundungen und der Bewertung der Schadensumfänge, insbesondere bei der vertikalen Ausgrenzung der gelösten Schadstoffe im Aquifer.
- Die Sanierungsbrunnen wiesen folgerichtig in vielen Fällen nicht die optimale Verfilterung auf. Die vielfach nur geringmächtigen schadstoffangereicherten Bereiche wurden beim Messstellenausbau größtenteils mit lang bemessenen Filterstrecken durchteuft, um den Grundwasserleiter möglichst in seiner gesamten Mächtigkeit und dabei insbesondere die liegenden Bereiche zu erfassen, da aufgrund der vorherrschenden Fachmeinung die LHKW's in tieferen Grundwasserbereichen vermutet wurden. Dies trifft weder überall zu, noch hat sich eine vollkommene Verfilterung des Grundwasserleiters für die Quellensanierung bewährt, weil damit eine zu hohe Schadstoffverdünnung eintritt und zu wenig Fracht gefördert wird.
- Die Bilanzierungen der Schadstoffinventare und die darauf aufbauenden Planungen zum Umfang der Sanierungsmaßnahmen ließen vielfach Flüssigphase und Schadstoffdepots in feinsandigen und schluffigen Einlagerungshorizonten der Talsande unberücksichtigt, da diese bei früheren Altlastenerkundungen im gesättigten Bereich nicht auf flüchtige Schadstoffe untersucht worden sind.

Diese Analyse zeigt, dass die ursprünglich als abgeschlossen betrachtete Untersuchungsphase der Schäden eben nicht ausreichte, um für alle Altlastenfälle den Sanierungserfolg zu gewährleisten. Insofern haben sich BvS und Land Berlin im Rahmen der Projektgruppenarbeit in den letzten Jahren intensiv mit der nachträglichen Schadenserkundung und möglichen Sanierungsalternativen befasst. Im Ergebnis wurden einige hydraulische Regime mit Infiltration, neuen Brunnenstandorten und einem effektiveren Brunnenausbau modifiziert. Damit konnten Schadstoffausträge zwar gesteigert, der Sanierungserfolg aber nicht durchgreifend erreicht werden.

Als eine der Hauptursachen für den ausbleibenden hydraulischen Erfolg ist das Auftreten von lokalen Flüssigphasen (DNAPL, Fingering) und BTEX-Hot-spots im gesättigten Bereich erkannt worden. Dies bedeutete, dass im Vergleich zur hydraulischen Sanierung der Sanierungserfolg mit weitaus kostenintensiveren Maßnahmen, wie z. B. Bodenaushub, gesucht werden musste. Aus diesem Grund sind sowohl die Finanzmittel als auch die Sanierungszeiträume für einige der Altlastenstandorte, welche die Verlaufskurve I repräsentiert, neu überdacht und konzipiert worden.

5.2 Sanierungsverlauf II – aktive erfolgreiche hydraulische Sanierungen

Der Verlauf II zeigt die Entwicklung der Schadstoffkonzentrationen für diejenigen LHKW- und BTEX-Schäden, deren hydraulische Sanierung derzeit noch als erfolgreich bewertet wird, aber nicht abgeschlossen ist. Dies betrifft 7 Objekte, d. h. 39 % der hier betrachteten hydraulischen Sanierungen. Für diese ist ein asymptotischer Verlauf auf unterschiedlichem Niveau zwar erkennbar, die aktuellen Frachtausträge und die damit einhergehenden Schadstoffreduzierungen im Grundwasser rechtfertigen aber den Weiterbetrieb der Sanierung. Die hier extrahierten ca. 21,5 t Schadstofffracht stehen für rd. 56 % der in den betrachteten Schadensfällen bisher ausgetragenen Gesamtschadstoffmenge. Je nach der spezifischen Gefährdung von Schutzgütern (z. B. Lage zu den Wasserwerken) und der Entwicklung der spezifischen Kosten ist in Zukunft einzelfallbezogen über den Sanierungsabschluss zu entscheiden und festzulegen, ob die erreichten Schadstoffkonzentrationen als Sanierungsziel akzeptiert werden können oder weiterführende Maßnahmen erforderlich sind.

Schaden	Lage	Zeit (a)	SWM (m³)	OSK-B (µg/l)	MSK-A (µg/l)	S-Austrag (kg)	G-Kosten (EUR)	S-Kosten (EUR)
7-(LCKW)	U	12+	5.800.000	30.000	500	2.000	2.300.000	1.140
8-(LHKW)	U	2+	480.000	1.000	300	140	240.000	1.710
9-(LCKW)	U	12+	2.200.000	7.700	150	400	852.000	2.130
10-(LCKW)	U	7+	1.240.000	17.000	2.000	8.000	1.680.000	210
11-(LCKW)	U	5+	970.000	7.000	600	1.000	400.000	400
12-(LCKW)	H	6+	545.000	50.000	10.000	9.800	850.000	90
13-(FCKW)	U	0,5+	43.000	32.000	3.500	156	60.000	380

Tabelle 3: Eckdaten zur Charakterisierung des Sanierungsverlaufes II

Die Gesamtkosten für diese Maßnahmen betragen bisher ca. 6,4 Mio. EUR. Die durchschnittlichen spezifischen Kosten in Höhe von rd. 866 EUR/kg weisen ebenfalls eine sehr hohe Bandbreite zwischen 90 EUR/kg und 2.130 EUR/kg auf. Die relativ hohen Kosten für die Schadensfälle „Schaden 7“, „Schaden 8“ und „Schaden 9“ ergeben sich aus der anstromigen Position dieser Grundstücke zu den Wasserwerken und der damit verbundenen teilweisen Sicherungsfunktion der hydraulischen Sanierungsmaßnahmen. Hier muss in Zukunft entschieden werden, in welcher Höhe verbleibende Schadstoffkonzentrationen akzeptabel sind, um eine Gefährdung der Trinkwasserfassungen über den Transferpfad dauerhaft auszuschließen.

Der „Schaden 12“ befindet sich in einem bedeckten Grundwasserleiter auf der Hochfläche und weist von allen betrachteten hydraulischen Sanierungen die niedrigsten spezifischen Kosten auf. Diese sind auf die derzeit noch hohen gelösten verfügbaren Schadstoffkonzentrationen zurückzuführen. Um auch hier in Zukunft die Verhältnismäßigkeit der Mittel zu wahren, werden derzeit umfangreiche planerische Vorarbeiten zur späteren Ablösung der hydraulischen Maßnahme durch Stimulierung des natürlichen in-situ Abbaus geleistet.

5.3 Sanierungsverlauf III – erfolgreich abgeschlossene hydraulische Sanierungen

Der Verlauf III zeigt die erfolgreichen hydraulischen Sanierungsfälle. Von den 18 betrachteten Schäden konnten bisher lediglich 5 Fälle, d. h. 28 % allein mit hydraulischen Maßnahmen abschließend saniert werden. Hierbei ist es zwar nicht gelungen, die in den behördlichen Auflagen enthaltenen Sanierungszielwerte vollständig zu erreichen, mit dem Unterschrei-

ten von Konzentrationen < 100 µg/l LHKW/BTEX in den Sanierungsbrunnen galt aber das wesentliche Sanierungsziel als erfüllt, nämlich eine signifikante und dauerhafte Reduzierung des Schadstoffinventars im Grundwasserleiter sicherzustellen.

Schaden	Lage	Zeit (a)	SWM (m³)	MSK-B (µg/l)	MSK-A (µg/l)	S-Austrag (kg)	G-Kosten (EUR)	S-Kosten (EUR)
14-(LCKW)	U	6	1.500.000	80.000	70	600	600.000	100
15-(LHKW)	U	4	990.000	2.000	400	450	300.000	670
16-(LHKW)	U	11	2.700.000	5.300	250	2.350	1.520.000	650
17-(LCKW)	U	7	824.000	9.000	80	500	1.100.000	2.200
18-(BTEX)	U	10	1.320.000	40.000	50	1.500	1.300.000	870

Tabelle 4: Eckdaten zur Charakterisierung des Sanierungsverlaufes III

Die Kosten für die erfolgreich sanierten Schadensfälle belaufen sich auf insgesamt rd. 4,8 Mio. EUR. Sie betragen damit rd. 27 % der für die hydraulischen Sanierungen aufgewandten Gesamtkosten und stehen für einen Erfolg im Vergleich von Aufwand und Nutzen. Die mittleren spezifischen Kosten betragen ca. 900 EUR/kg, bei einer großen Bandbreite zwischen 100 EUR/kg und 2.200 EUR/kg. Ohne Berücksichtigung des im Anstrom zum Wasserwerk gelegenen „Schaden 17“, bei dem die Grundstückssanierung auch eine Sicherungsfunktion erfüllte, ergeben sich für die allein hydraulisch erfolgreich abgeschlossenen Maßnahmen spezifische Kosten in Höhe von akzeptablen, rd. 570 EUR/kg.

Eines der erfolgreichsten Beispiele einer hydraulischen Sanierung zeigt hierbei der „Schaden 14“ (LCKW), bei dem innerhalb von 6 Jahren eine Reduzierung des Schadstoffinventars von 80.000 µg/l auf rd. 70 µg/l erreicht werden konnte. Das Schadstoffpotenzial befand sich hier weitgehend hydraulisch verfügbar in einem mittelsandigen Aquifer, so dass die Ergebnisse der ersten Erkundung bzw. Sanierungsuntersuchung umfänglich zutrafen und die Maßnahme wie geplant ablief. Obwohl sich nach Sanierungsabschluss der Reboundeffekt mit einem lokal begrenzten, temporären Anstieg der Konzentration auf ca. 1.000 µg/l LCKW einstellte, zeigt das nachlaufende Monitoring der letzten Jahre eine konstant geringe LCKW-Belastung <100 µg/l in den meisten Messstellen und damit einen durchgreifenden Sanierungserfolg.

Aufschlussreich ist die Betrachtung der beim Sanierungsverlauf III ausgetragenen Schadstoffmengen. Diese erreichen mit rd. 5.400 kg nur ca. 14 % der in den untersuchten Schadensfällen hydraulisch ausgetragenen Gesamtfracht. Das deutet darauf hin, dass die abgeschlossenen Sanierungen u. a. auch deshalb erfolgreich verlaufen sind, weil das hier vorhandene Schadstoffpotential im Vergleich zu den bisher mit den Verlaufskurven I und II ausgetragenen 32.500 kg Schadstoff relativ gering ausfällt.

6. Beispieldiskussion

Die Einschätzung eines Sanierungserfolges ist immer wieder mit der Frage der Verhältnismäßigkeit der Mittel verknüpft. Dies lässt sich am Besten anhand von Beispielen der Verlaufskurve I darstellen. Diese stehen für die intensiven Diskussionen in der Projektgruppe Berlin zu den optimalen Sanierungsstrategien und zur Wahrung der Verhältnismäßigkeit der Mittel, um insbesondere bei unbefriedigend verlaufenden hydraulischen Grundwassersanierungen die angemessenen Schlussfolgerungen für die weitere Verfahrensweise zu ziehen.

1. So erfolgte bei dem „Grundstück 5“ Bodenaushub in der gesättigten Zone zur Gewährleistung der weiteren Investitionen als Bürostandort zu ähnlichen Kosten, wie sie bis dahin die fast vierjährige hydraulische Grundwassersanierungsmaßnahme erforderte. Hier stehen rd. 1 Mio. EUR für den Austrag von 938 kg BTEX bei der hydraulischen Grundwassersanierung den 1,3 Mio. EUR für 1.000 kg BTEX-Austrag bei dem anschließenden Bodenaushub gegenüber. Dieses Beispiel dokumentiert die verhältnismäßige Ergänzung einer nicht erfolgreich abzuschließenden hydraulischen Sanierung. Mit der Bodensanierung wurde ein Schadstoffinventar aus bindigen und der hydraulischen Sanierung kaum zugänglichen Horizonten entfernt, das erst durch nachträgliche Erkundungsmaßnahmen festgestellt werden konnte. Ohne Auskofferung wäre hier die hydraulische Sanierung ggf. noch auf unabsehbare Zeit gelaufen. Im Anschluss an die Bodenaushubmaßnahme konnte im Rahmen des mehrjährigen Monitorings eine konstante und dauerhafte Reduzierung <20 µg/l BTEX im Grundwasser auf dem Grundstück registriert werden.
2. Nicht immer ist ein solches angemessenes Verhältnis von Aufwand und Nutzen zu realisieren. So wurde auf dem „Grundstück 4“ ein 1991 festgestellter BTEX-Schaden bis 1993 erkundet und seit 1994 hydraulisch saniert. Da die Schadstoffverteilung scheinbar gut lokalisiert werden konnte, sahen die Beteiligten den Sanierungsfall lange Zeit nicht als problematisch an. Aus heutiger Sicht sicher eine Fehleinschätzung! Nachdem an dem Standort bis 2007 ein rd. 200-

facher Wasseraustausch stattgefunden hatte und der asymptotische Verlauf der hydraulischen Sanierung auf dem Niveau von ca. 2.000 µg/l BTEX seit Jahren stagnierte, führte dies folgerichtig zu einer Ursachensuche.

Mehrere Nacherkundungen des tieferen gesättigten Bereiches zeigten mit einem berechneten Potenzial von rd. 13.000 kg BTEX zwischen 6-10 m Tiefe die Ursache der mangelnden hydraulischen Sanierungswirkung. Nach Prüfung mehrerer alternativer Sanierungsvarianten (u. a. Chemische Oxidation) wurde auch hier Bodenaushub als Maßnahme zur abschließenden Gefahrenabwehr vorgesehen. Die Kostenrelation gestaltet sich in diesem Fall wesentlich ungünstiger, den bisher in 13 Jahren aufgewandten rd. 2,2 Mio. EUR für die hydraulische Sanierung stehen dann zusätzliche 4,0-5,0 Mio. EUR für den Bodenaushub gegenüber. Da sich aber der Schadensherd nur 120 m vor der Wasserwerksgalerie befindet und bei ungehindertem Ausbreiten die Schadstofffront zeitnah den ersten Wasserwerksbrunnen erreichen würde, besteht für eine Modifizierung von Sanierungszielwerten wenig Ermessensspielraum. Das Sanierungsziel wurde nach Diskussion in der Projektgruppe Berlin mit 5 µg/l Benzol im vom Grundstück in Richtung Wasserwerk abströmenden Grundwasser festgelegt. Auf dem Grundstück werden nach der erfolgten Quellensanierung auch höhere Werte im Aquifer akzeptiert.

Das nutzen- und kostenentscheidende, oftmals lebhaft diskutierte Problem beim Bodenaushub besteht in der Festlegung des optimalen Aushubvolumens, um eine nachhaltige Grundwasserentlastung sicher zu erreichen und die hydraulische Maßnahme dauerhaft zu ersetzen. Hierbei sind insbesondere an die gutachterlichen Untersuchungen und ingenieurseitigen Planungsarbeiten hohe Anforderungen gestellt.

Neben dem Bodenaushub sind von der Projektgruppe Berlin in den letzten Jahren intensiv alternative in-situ Sanierungsmaßnahmen diskutiert und geprüft worden. Hierzu ist festzustellen, dass unter Bedingungen, bei denen die hydraulische Sanierung an ihre Grenzen stößt, auch die chemische Oxidation oder die Stimulierung biologischer Prozesse nur limitiert Anwendung finden können. Da die reaktiven Stoffe aufgrund der Schadstoffverteilungen bzw. ungünstiger hydrodynamischer Bedingungen die Quellbereiche kaum durchdringen, lassen sich damit Herdsanierungen auch nur in Einzelfällen realisieren.

3. Ein drittes Beispiel soll das differenzierte Vorgehen bei der Verlaufskurve I anhand des „Schadens 2“ illustrieren. Hier wurde auf der Hochfläche ein LCKW-Grundwasserschaden im oberen schwebenden Grundwasserkörper und im bedeckten Grundwasserleiter begleitend zur Bodenluft hydraulisch saniert. Während die pneumatische Sanierung nach ca. 3 Jahren erfolgreich abgeschlossen werden konnte, stellten sich im Grundwasser an den einzelnen Sanierungsbrunnen unterschiedliche Verlaufskurven ein, die alle drei in der Abbildung 1 dargestellten Varianten repräsentierten. Im Gegensatz zu den langfristigen Grundwassersanierungen im ÖGP wurde hier bereits frühzeitig festgestellt, dass sich ein Großteil der Schadstoffe im schluffig bis feinsandig ausgebildeten Geschiebemergel befindet und nur wenig Aussicht auf einen durchgreifenden Sanierungserfolg besteht. Die Debatte führten Behörde und BvS um die Verhältnismäßigkeit der Grundwassersanierung, da keine Gefahr für eine Trinkwasserförderung zu besorgen war. Nach umfangreichen gutachterlichen Bewertungen des Sachverhalts sowie in Anbetracht eines berechneten Schadstoffpotentials von ca. 3.000 kg LCKW bei einem Austrag von nur 310 kg in vier Jahren wurde die Grundwassersanierung eingestellt und ein mehrjähriges Monitoring vereinbart. Die Monitoringergebnisse bestätigten den erwarteten Reboundeffekt mit einem partiellen LCKW-Anstieg auf die Ausgangskonzentrationen. Im Gegensatz zu den o. g. beiden Beispielen besteht hier aus Sicht der BvS auf Grund der eingeschränkten Schutzgütergefährdung kein Erfordernis für eine künftige alternative Maßnahme.

Angesichts der für den letztgenannten Fall aufgewandten Mittel ist zu hinterfragen, inwieweit eine hydraulische Grundwassersanierung bei ungünstigen hydrogeologischen Bedingungen und fehlenden wasserwirtschaftlichen Nutzungen überhaupt zweckmäßig ist. Im Einzelfall könnte hier auf sonstige Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen in Kombination mit der Ermittlung des natürlichen Selbstreinigungs- und Immobilisierungspotentials orientiert werden.

In diesem Rahmen diskutieren BvS und Behörde fallweise kontrovers, zu welchem Zeitpunkt eine hydraulische Grundwassersanierung nach Erreichen des Tailings oberhalb des Sanierungszielwertes eingestellt werden sollte. Insbesondere bei nicht hinreichend bekannten Schadstoffpotentialen stellt sich die Frage nach dem mit der ausgetragenen Fracht erzielten Sanierungserfolg. Oftmals übersteigen bei den untersuchten Fällen die extrahierten Schadstoffmengen die zuvor theoretisch berechneten Frachtpotentiale um ein Vielfaches, ohne dass eine signifikante Reduzierung des Schadstoffinventars erreicht wird. Somit ist nicht bekannt, ob nach mehreren Sanierungsjahren lediglich einige Prozent oder ein sehr hoher Anteil des vorhandenen Schadenspotentials beseitigt wurde, da das jeweils erreichte Konzentrationsniveau dazu nur einen ungenügenden Aufschluss gibt. Aus Sicht der BvS ist dies unbefriedigend, weil diese Sanierungen nicht auf gesicherten fachlichen Erkenntnissen beruhen. Insoweit sollte im Rahmen der vorlaufenden Untersuchungsprogramme möglichst das gesamte

vorhandene Schadstoffpotential mit hinreichender Sicherheit bilanziert werden, soweit dies mit verhältnismäßigem Aufwand leistbar ist.

Das Land Berlin setzt dieser Sichtweise im Einzelfall den ordnungsbehördlichen Ansatz entgegen und argumentiert mit der Verpflichtung, bei signifikanten und sich ausbreitenden Grundwasserbelastungen hydraulisch eine Schadensminderung zu erreichen, sofern keine andere erfolgversprechende Möglichkeit der Schadensbeseitigung besteht. Die Verhältnismäßigkeit der Maßnahme prüft die Behörde dann im Zuge der fortschreitenden Sanierung, die damit zu einem iterativen Erkenntnisprozess qualifiziert wird.

Die fallweise unterschiedlichen Positionen erfordern eine pragmatische Projektgruppenarbeit und die Bereitschaft beider Seiten, tragfähige Kompromisse zu schließen. Als Voraussetzung dafür ist die gutachterliche Erkundung, Planung und Begleitung der Maßnahmen auf einem qualitativ hohen Niveau zu führen. Das Schadensbild soll detailliert und in seiner Differenziertheit möglichst umfassend mit fundierten Detail- und Sanierungsuntersuchungen ermittelt werden. Auch wenn diese Herangehensweise kosten- und zeitintensiv sein kann, wird dies vom Nutzen einer begründeten und nachvollziehbaren Abwägung geeigneter Sanierungsszenarien mehr als aufgewogen.

Im Gegensatz zu den partiell konfliktbehafteten Schadensfällen der Verlaufskurven I und II vermittelt die Verlaufskurve III einen planmäßigen Sanierungsablauf, wie er nach den bis 1997 erstellten Teilsanierungskonzepten im ÖGP vorgesehen war. Allerdings trifft dies auf weniger als die Hälfte der Schadensfälle zu. In diesem Rahmen müssen heute auch die Sanierungsstrategien der BvS kritisch hinterfragt werden. So standen bis zum Ende der 90er Jahre die Begriffe „Bodenaushub“ oder „Bodensanierung“ der gesättigten Zone ob der damit verbundenen hohen Kosten vielfach gleichbedeutend für unnötige und nicht verhältnismäßige Maßnahmen. Insbesondere bei der Kostenplanung hat man sich die theoretischen Ansätze einer erfolgreichen hydraulischen Sanierung zu Eigen gemacht und ist davon ausgegangen, dass die erkundeten Grundwasserschäden hydraulisch in einem überschaubaren Zeitraum von ca. 5-10 Jahren sanierbar wären. Dieses Szenario ist so nicht eingetreten und verdeutlicht damit einmal mehr die Problematik, hinreichend belastbare langfristige Zeit- und Kostenrahmen für die Alllastenbearbeitung zu erstellen.

7. Schlussfolgerungen

Aus den o. g. Darlegungen können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

1. Bei der Ermittlung von Grundwasserschäden sind kombinierte moderne Untersuchungsmethoden zu nutzen, um ein hinreichend gesichertes Schadensbild zu erstellen. Diese umfassen:
 - teufenorientierte Grundwasserbeprobungen mit dafür geeigneter Technik,
 - Probenahme bis in den tieferen, belasteten gesättigten Bereich, u. a. zur Bestimmung von leicht-flüchtigen Kontaminanten,
 - numerische Modellierungen (GW-Strömungsmodelle, Schadstofftransportmodelle),
 - zwei- und dreidimensionale Darstellung der Schadensverteilung,
 - qualitativ durch periodische Ringversuche abgesicherte Analytik,
 - Schadstoffmengenbilanzierung und Einschätzung des hydraulisch verfügbaren Potentials,
 - Analyse und Bewertung der Indikatoren „natürlicher Schadstoffabbau/Immobilisierung“,
 - Erkundung und Konfiguration von Schadstoffdepots im gesättigten Bereich.
2. Die hydraulische Sanierung ist ingenieurseitig auf fachlich hohem Niveau zu begleiten, um frühzeitig aus dem Sanierungsverlauf Erfordernisse für weitere Erkundungen abzuleiten bzw. die Modifizierung der Maßnahme zu konzipieren.
3. Der Filterausbau der Sanierungsbrunnen hat sich an den vertikalen Schadstoffverteilungen zu orientieren, wobei fallweise auf möglichst geringe Förderraten und große Bohrdurchmesser orientiert werden sollte. Bei einer absehbar langfristigen hydraulischen Grundwasserförderung sind Ausbaumaterialien zu wählen, die eine umfassende Regenerierung der Brunnen ermöglichen.
4. Neben einer hydraulischen Sanierung von gelösten Schadstoffen im Schadenszentrum ist der frühzeitigen Erfolgsabschätzung von nachlaufenden in-situ Methoden entsprechende Aufmerksamkeit zu widmen. Hier müssen sich insbesondere die Gutachter und Planungsbüros den hohen fachtechnischen Ansprüchen zur Bearbeitung dieser

Aufgabe stellen. Im gleichen Maße sind von BvS und Land Berlin die Finanzierung von entsprechenden Untersuchungsmaßnahmen bzw. innovativen Sanierungsverfahren abzusichern.

5. Mit fortdauernder Zeit verbleiben die komplexen Schadensfälle in der Bearbeitung, für die keine einfachen und schnellen Lösungen bestehen. Da „ewig dauernde“ Sanierungsszenarien seitens der BvS nicht akzeptabel sind, sollten die Beteiligten Kompromisslösungen prüfen, wie z.B.:
 - Modifizierung der Sanierungsziele zur Beendigung einer hydraulischen Sanierung ohne weiterführende ergänzende Maßnahmen,
 - Einstufung eines Schadens als mit verhältnismäßigen Mitteln nicht sanierbar,
 - Initiierung und Finanzierung von begründeten Pilotversuchen oder Sanierungstests, die noch nicht Stand der Technik sind oder Anspruch auf eine Erfolgsgarantie erheben,
 - Prüfung der natürlichen Rückhalte- und Abbaupotentiale und deren Einschätzung für eine nachhaltige Schadensminderung.
6. Auch nach einer 15jährigen Bearbeitung des ÖGP Berlin sind zuverlässige Kostenschätzungen für viele der noch in der Bearbeitung befindlichen Sanierungsfälle nicht möglich. Langfristig angelegte und belastbare Kostenrahmen können deshalb nur im Ergebnis der fortschreitenden Sanierungen erstellt werden.

8. Zusammenfassung

Im Rahmen der VA-Altlastenbearbeitung im Ostteil Berlins wurden 18 hydraulische Sanierungen von LHKW- und BTEX-Schäden hinsichtlich ihrer bisherigen Ergebnisse bewertet. Als Resultat ist festzustellen, dass rd. ein Drittel der hydraulischen Sanierungen erfolgreich abgeschlossen werden konnte, ein Drittel derzeit noch aktiv ist und bei einem Drittel ergänzende Maßnahmen (z. B. Bodenaushub) notwendig waren bzw. sind, um die Sanierungsziele dauerhaft zu erreichen.

Die für die hydraulische Sanierung dieser Schäden aufgewandten Gesamtkosten belaufen sich auf rd. 17 Mio. EUR. Die spezifischen Kosten pro Kg ausgetragener Schadstoffmenge betragen im Durchschnitt ca. 930 EUR mit einer großen Bandbreite, die sich zwischen 90 EUR/kg und 2.200 EUR/kg bewegt.

Als eine Ursache für die nicht erfolgreich abgeschlossenen hydraulischen Sanierungen wurden komplexe Schadstoffverteilungen im gesättigten Bereich ermittelt, die erst durch moderne Untersuchungsmethoden erkennbar waren.

Bei den aktiven und derzeit noch als erfolgreich eingeschätzten hydraulischen Maßnahmen orientiert die Projektgruppe Berlin auf eine umfassende nachträgliche Schadenscharakterisierung, die verstärkte Einbeziehung von in-situ Maßnahmen und auf natürliche Abbauprozesse zum Erreichen einer nachhaltigen Schadensminderung. Pragmatische Kompromisse im Hinblick auf die Festlegung oder Neuorientierung von Sanierungszielen werden angestrebt.

Die erfolgreich abgeschlossenen hydraulischen Maßnahmen führten zu einer nachhaltigen dauerhaften und akzeptablen Minderung der Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser, ohne allerdings die vorgegebenen Sanierungszielwerte vollständig zu erreichen. Da mit diesen Maßnahmen nur ca. 14 % der aus dem Grundwasser entfernten Gesamtschadstoffmenge von 38 t extrahiert wurde, lässt sich der hydraulische Sanierungserfolg offenbar u. a. auch auf das hier relativ geringe Schadstoffpotenzial zurückführen.

Sowohl die bisherigen Erfahrungen mit früheren Kostenprognosen als auch die Tatsache, dass mit fortschreitender Zeit im Wesentlichen nur noch die komplexen Schadensfälle mit komplizierten Sanierungsbedingungen verbleiben, lassen eine Erstellung von belastbaren Zeit- und Kostenrahmen zur abschließenden Regelung der VA-Altlastenproblematik in Berlin kurzfristig nicht erwarten.