

2.2 Sanierungsuntersuchung und Sanierungskonzept

Im folgenden Arbeitsschritt der SU wurden 3 Sanierungszonen (SZ) und die Sanierungsziele abgeleitet und abgestimmt. Nach den üblichen Folgeschritten zur Vorauswahl grundsätzlich geeigneter Sanierungsvarianten, der Erarbeitung standortspezifischer Sanierungsszenarien, deren fachlicher Bewertung der Kosten-Nutzen-Betrachtung etc. entstanden der Sanierungsvorschlag und das Sanierungskonzept mit unterschiedlichen Technologien in den 3 SZ. Die folgende Abbildung gibt einen Gesamtüberblick zu Ergebnis und Ablauf bisher.

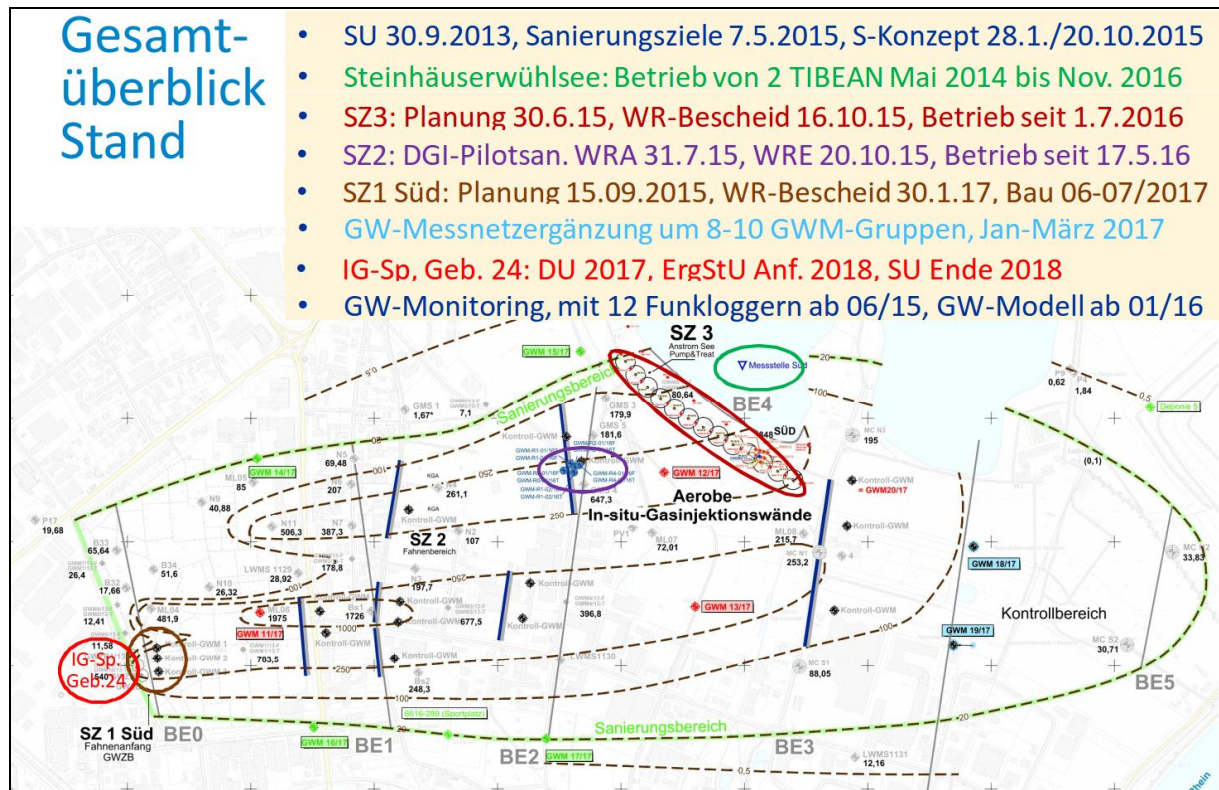


Abb. 2: Gesamtüberblick zur in der SU entwickelten integralen Sanierungslösung mit den 3 Sanierungszonen, Bilanzebenen und zum bisherigen Ablauf.

Die in Abb. 2 lagemäßig dargestellten Sanierungselemente in den SZ sind im Einzelnen:

- SZ3 Seeanstrom: Pump & Treat: Sicherungsmaßnahme seit Juli 2016 im Regelbetrieb
- SZ2 Fahrenbereich: Sauerstoff-Direktgasinjektion zum aeroben mikrobiellen VC-Abbau in situ; Pilotsanierung 2016-2017 erfolgreich abgeschlossen; aktuell läuft die Entwurfs- und Genehmigungsplanung
- SZ1-Süd: 3 Grundwasserzirkulationsbrunnen: Kappung des Südfahnenzustroms seit Oktober 2017 im Regelbetrieb

Im Zuge der Planung wurden übrigens für alle 3 SZ Naturschutz- und Artenschutzbeiträge erstellt, für SZ3 ebenso eine Baugrunduntersuchung mit Beweissicherung.

2.3 Grundwassermodellierung und optimierte Sanierungslösung

Ein essentieller Bestandteil der Sanierungsstrategie war die Anwendung des entwickelten instationären 3D-FE-Grundwasserströmungs- und Transportmodells in mehreren Modellschritten, um zu einer räumlich und zeitlich optimierten, aufeinander abgestimmten Sanierungslösung mit innovativen und klassischen Elementen in den 3 abgeleiteten Sanierungszonen (SZ) bei strengen Sanierungszielwerten zu kommen.

Mit strengen (vorläufigen) Sanierungszielwerten von 20 µg/l LCKW/Vinylchlorid für das Grundwasser im gesamten Fahnenkomplex sowie 0,5 µg/l VC im See wurden die behördlichen Maßstäbe für die geplante Sanierung in 3 Sanierungszonen (SZ) definiert, nachdem das Grundwasserströmungs- und Transportmodell auch zu Verhältnis-mäßigkeitsuntersuchungen für verschiedene Sanierungszielwerte eingesetzt wurde.

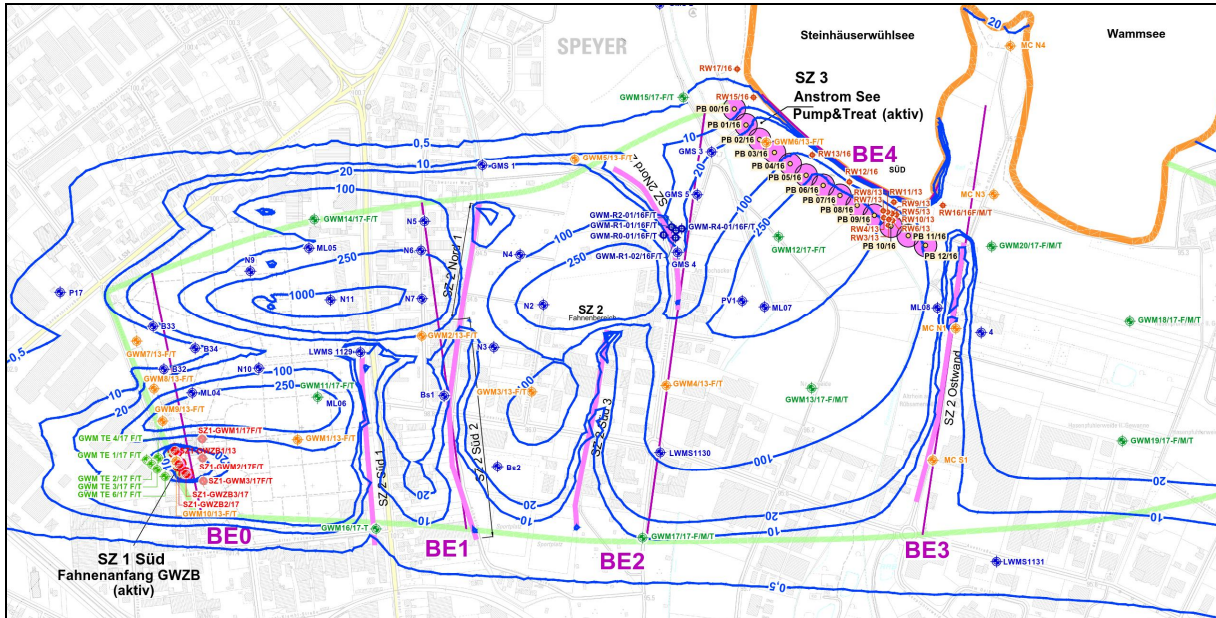


Abb. 3: Prognoserechnungen zur Optimierung der Sanierungselemente, Beispiel für zeitliche Entwicklung der LCKW-Verteilung im Sanierungsverlauf.

Des Weiteren wird das Modell zu Optimierungsberechnungen in den einzelnen Sanierungs-zonen angewendet, wie in der folgenden Abb. für die Brunnenoptimierung in SZ3 gezeigt.

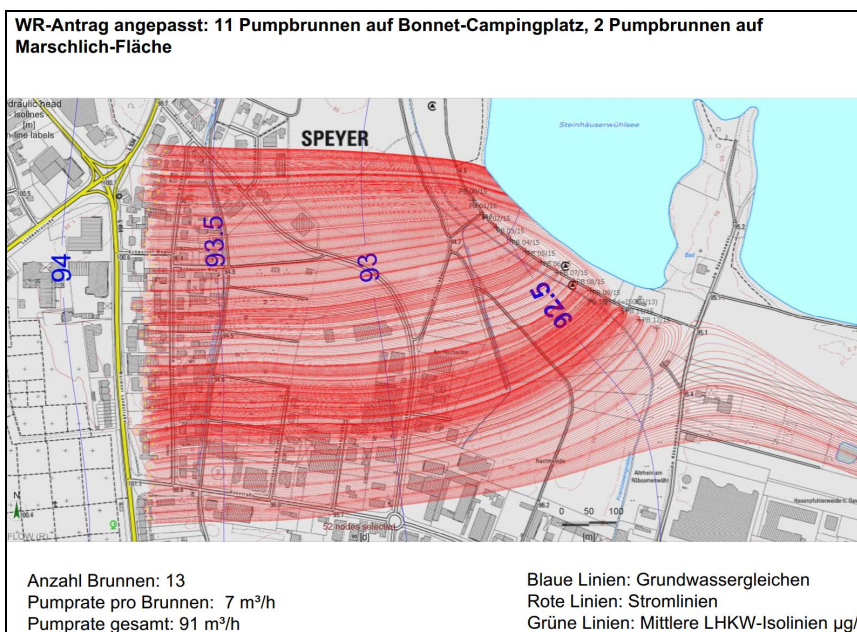


Abb. 4: Pump&Treat-Optimierung mit dem Grundwassermodell.

Im weiteren Verlauf soll das Modell auch sanierungsbegleitend eingesetzt werden.

3 Elemente der optimierten integralen Sanierungslösung

Im Folgenden werden die einzelnen Elemente der integralen Sanierungslösung vorgestellt.

3.1 Seesanieung mit adaptierter TIBEAN-Technologie

Zur temporären aktiven VC-Reduzierung im See (bis die GW-Sanierung im Anstrom griff) erfolgte der Einsatz einer speziell entwickelten adaptierten Technologie für Tiefenwasserbelüftungsanlagen (TIBEAN) mittels hypolimnischer Zirkulation mit folgenden Eigenschaften.

- 2 schwimmende tiefenflexible TIBEAN – je 14 m Länge
- Möglichkeit zur Vollzirkulation, Epilimnionbelüftung
- Umwälzleistung: bis max. je 1.200 m³/h Wasservolumen
- Luftvolumenstrom: 100-500 m³/h
- Integrierter Aktivkohle- und Biofilter
- Online-Vertikalmessprofil (O₂, Temp.), DFÜ

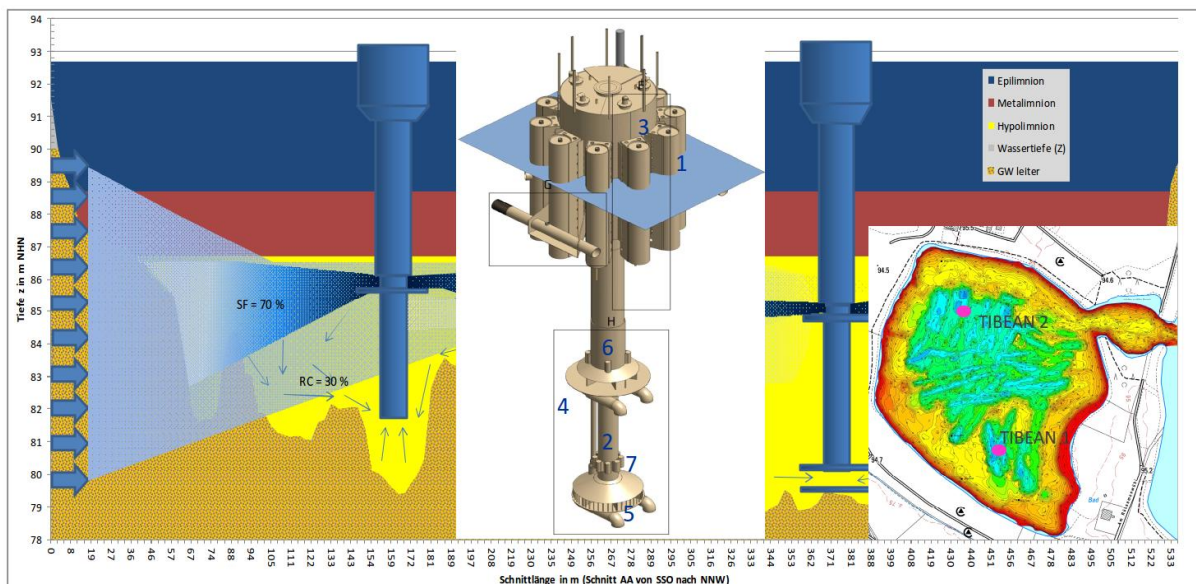


Abb. 5: Prinzip der TIBEAN-Technologie, Seebodenkartierung, Foto.

Mit den beiden von 2014-2016 betriebenen TIBEAN-Anlagen konnten die VC-Gehalte im Steinhäuserwühlsee maßgeblich reduziert werden. Zwischenzeitlich wurden beide Anlagen rückgebaut und inklusive der Betonanker entfernt.

3.2 Pump&Treat-Sicherung der Seeanstromzone (SZ3)

Die folgende Abb. zeigt die Sanierungsinfrastruktur in der SZ3 (Seeanstromzone).

Nach Einholung der wasserrechtlichen Genehmigung auf der Basis der Entwurfs- und Genehmigungsplanung lief die Ausschreibung von Bau und bis zu 8-jährigem Betrieb der Grundwassersanierung mittels Pump&Treat innerhalb von 6 Wochen bis zur Vergabe.

Nach der im Detail nicht ganz einfachen Einholung der Baugenehmigung und der Kampf-mittelfreimessung wurden in guter Zusammenarbeit unserer Bau- und Bohrüberwachung mit der engagierten Sanierungsfachfirma in 3 Monaten Bauzeit gebaut:

- 13 Pumpbrunnen bis 20 m Tiefe
- 21 mit Loggern ausgerüstete Kontroll- und Reichweitenmessstellen
- Leitungen, Kontrollschächte und Straßenbau auf ca. 400 m Länge sowie

- eine teilredundant ausgerüstete Grundwasserreinigungsanlage zur Förderung von 40-110 m³/h Grundwasser, mit Kiesfiltration, zweistufiger Strippung und zuverlässiger Abreinigung auf <0,5 µg/l VC mittels katalytischer Nachverbrennung und 2 Aktivkohle-Polizeifiltern
- in einer 22x12x7 m großen Leichtbauhalle (s. Fotos – im Bau)



Abb. 6: Lageplan der Pump&Treat-Infrastruktur in SZ3



Abb. 7: SZ3, Fotos vom Bau der Halle mit der Grundwasserreinigungsanlage.

Das auf VC ausgerichtete, modelloptimierte Pump & Treat mit 13 Pumpbrunnen auf ca. 400 m Anstrombreite bei ca. 90 m³/h Pumprate funktioniert reibungslos, so dass der See nach ca. 4 Monaten VC-frei war.

Seit Juni 2016 wurden mit der Pump&Treat-Anlage bereits ca. 450 kg Vinylchlorid aus dem Grundwasser entfernt.

3.3 In-situ-Direktgasinjektion zum aeroben VC-Abbau im Fahnenbereich (SZ2)

In der SZ2 (Fahnenbereich) begann im Frühjahr 2016 die Pilotsanierung mit dem innovativen in-situ-Sanierungsverfahren Direktgasinjektion zum aeroben mikrobiellen VC-Abbau mit umfangreichem Prozessmonitoringsystem in einem 50-m-Testfeld bis ca. 20 m Tiefe.

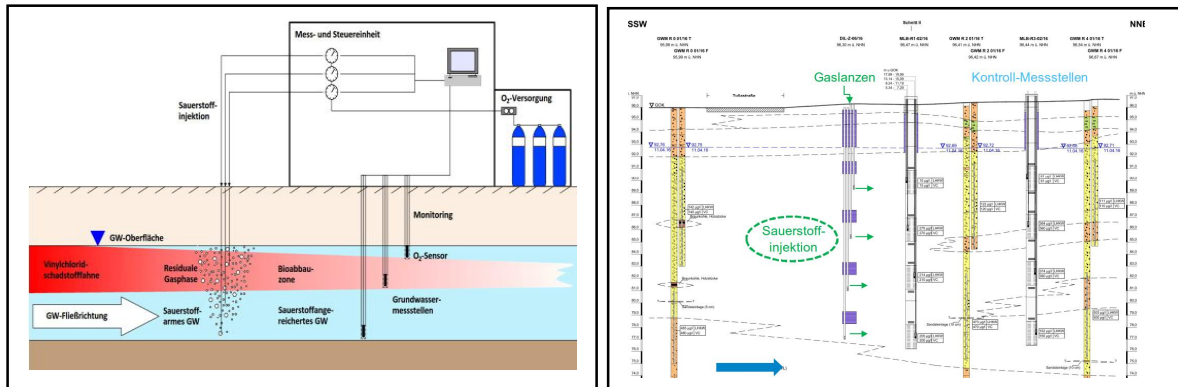


Abb. 8: Prinzipschema der DGI-Sanierung und Profilschnitt des Testfeldes

Das Sanierungsprinzip lässt sich wie folgt beschreiben:

- O₂-Gasinjektionsgalerie quer zur GW-Fließrichtung zum Aufbau durchgängiger Aerobabbauzonen
- Einbringen von Reinsauerstoff in das Grundwasser mit speziellen Druckinjektionslanzen in verschiedenen Tiefen
- zur nachhaltigen Sauerstoffeinlösung mit Schaffung einer vollflächigen Biooxidationszone zum mikrobiellen VC-Abbau

Als Vorteile und technologische Fakten sind zu nennen:

- Sauerstoff als natürliches Gas wird verwendet
- Geringer Wirkstoff- und Energieaufwand
- Hohe Prozess-Stabilität durch O₂-Einspeicherung
- Hohes Maß an Prozessautomatisierung mit MSR/DFÜ
- Wenig Anlagenplatzbedarf, geringer Wartungsaufwand
- Biologische Anlaufzeit von ca. 6 Monaten, bis sich die VC-abbauenden Mikroben in-situ etabliert haben.

Nach WR-Bescheid gemäß Planung erfolgte der Bau der Sanierungsinfrastruktur, u.a. mit:

- 11 Direktgasdruckinjektionslanzen mit je 4 Gasinjektionshorizonten
- 10 Multilevelbrunnen mit 4-fach-Scheibenpackersystem zur ungestörten Probenahme
- 6 Messrohre für TDR-Gassättigung, mit 3 in-situ-Redoxsensorketten, 5 GWM-Gruppen
- Container mit MSR- und DFÜ-Technik, mit 2 Sauerstoff-Versorgungsbündeln

Außer bei den 5 „klassisch“ gebohrten Doppel-GWM wurde die 4-mal so schnelle Sonic-Drill-Bohrtechnik eingesetzt. Neben einer voll gelinerten Bohrung zur kf-Wertbestimmung im Leipziger Labor wurde das Thermoflow-Verfahren zur durchgehenden vertikalen in-situ-Bestimmung von Durchflüssen und kf-Werten mit sehr guten Ergebnissen eingesetzt.

Nach dem Pilotsanierungsbeginn im Mai 2016 konnten mit dem umfangreichen physikalischen, chemischen und biologischen Begleitmonitoring die in Gang kommenden Oxidationsprozesse nachgewiesen werden. Zu beachten war die Phase der Festbett-oxidation wegen pyritischer Anteile in den Rheinschottern, bevor der VC-Abbau einsetzte.

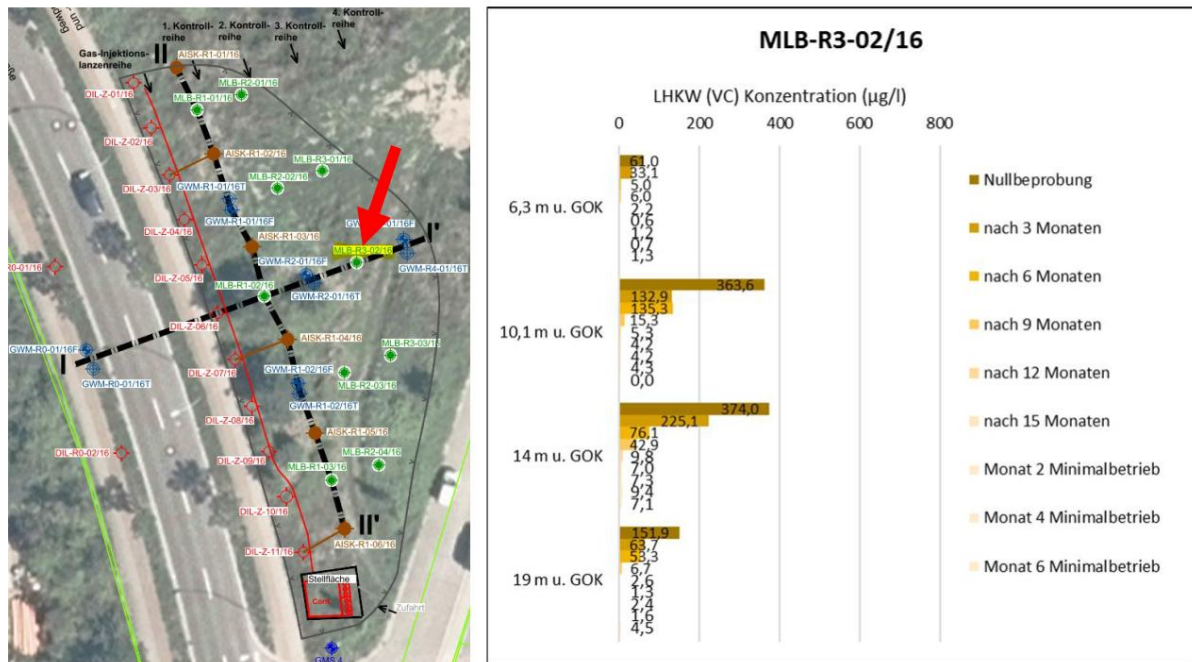


Abb. 9: Lageplan des in-situ-Testfeldes mit der 50 m breiten Gasinjektionswand, beispielhafter Verlauf für VC-Abbau während der Pilotsanierung in einer Kontrollmessstelle.

Neben dem Nachweis zum Erreichen des Sanierungszielwert im Grundwasser $< 20 \mu\text{g/l}$ VC waren weitere abgeleitete Versuchsziele für die Pilotsanierung zu klären:

- Wieviel Sauerstoff wird zur Aufoxidation der Bodenmatrix in-situ benötigt?
- Wie hoch ist der Radius der Wirksamkeit je Gaslanze?
- Mit welcher Reaktionsgeschwindigkeit wird das VC abgebaut?
- Gibt es geochemische Begleitprozesse (Ausfällungsprozesse), die bei der in-situ-Sanierung zu berücksichtigen sind?
- Dimensionierung, Ablauf und Kosten der Full-Scale-Sanierung?

Alle Versuchsfragen konnten positiv beantwortet werden.

- Die 50 m lange Biooxwand benötigte $21,6 \text{ m}^3$ Sauerstoff pro Tag.
- VC-Sanierungsziel $20 \mu\text{g/l}$ wurde/wird sicher unterschritten.
- Pilotsanierung läuft weiter zur ständigen Überprüfung des Sanierungserfolgs.
- Sanierungstechnologie sowie die Auswahl und zeitliche Abfolge der Überwachungsmethoden haben sich bewährt.

Die ökologische und flexible aerobe in-situ-Sanierungstechnologie ist nachweislich für die räumliche VC-Sanierung in Speyer geeignet, weil der biologische Abbaueffekt in-situ wirksam ist.

Sie erfordert keine aufwändige Grundwasserförderung und nur relativ wenige Oberflächen-Bauwerke.

Derzeit läuft nun die Entwurfs- und Genehmigungsplanung für 6 DGI-Wände mit insgesamt ca. 1200 m Länge und bis ca. 25 m Tiefe im gesamten Fahnenbereich.

Nach modelltechnischer Berechnung ist ein differenzierter Betrieb der DGI-Wände über ca. 6-15 Jahre geplant.

3.4 Grundwasserzirkulationsbrunnen im Fahneninputbereich (SZ1)

In der SZ1-Süd (Fahneninput) werden seit Sept. 2017 drei Grundwasserzirkulationsbrunnen (GWZB) im TurboStripverfahren zum Kappen des südlichen LCKW-Zustroms genutzt.

Der Bau der Sanierungsinfrastruktur erfolgte nach der Planung und dem WR-Bescheid im Sommer 2017. Ein bereits 2013 im Sanierungstest verwendeter GWZB ist einbezogen.

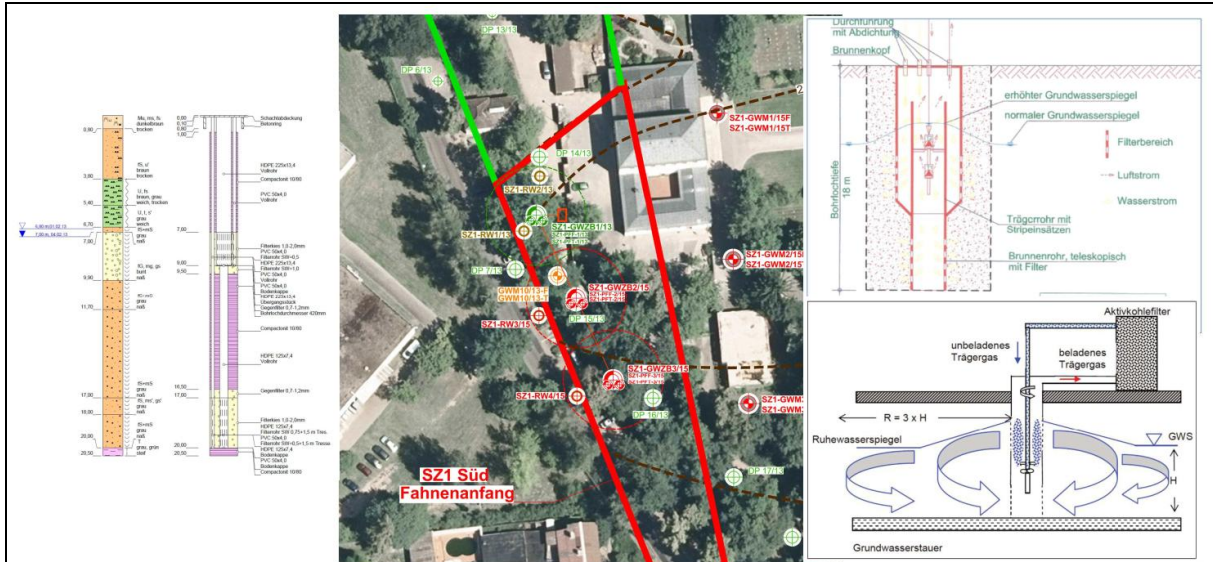


Abb.10: GWZB-Prinzip, 3 GWZB und 11 Monitoringmessstellen in SZ1.

3.5 Untersuchungen zur in-situ-Sanierung einer lokalen LCKW-Quelle (ERH)

Für eine auf Grund der Monitoringergebnisse in SZ1-Süd identifizierte ältere LCKW-Quellzone unter einem genutzten Bestandsgebäude im Industriegebiet führten wir nach der Detailuntersuchung 2017 im Frühjahr 2018 umfangreiche sanierungsvorbereitende Untersuchungen durch, u.a.:

- Neubau von 7 GWM und 2 KMS, mit Liner-Gewinnung für
- ISBR- und ISCO-Laborversuche zur in-situ-Sanierung
- 3 Immissionspumpversuche über 105 h, 4 Kurzpumpversuche
- 8 Auffüllversuche, 4 Abpumptests
- 6 Bodenluftabsaugversuche bis 140 h, mit Online-GC
- Mehrere Beprobungskampagnen für Bodenluft und Grundwasser
- Schnelle Nacherkundung mit 4 Direct-Push-Sondierungen

Im Rahmen der Sanierungsuntersuchung ergab sich unter Vorgabe des Erhalts des Gebäudes als effizienteste nachhaltige rasche Sanierungsvariante das in-situ-thermische Verfahren Electrical Resistance Heating (ERH).

ERH-Verfahrensprinzip ist die kontrollierte Aufheizung des Bodens auf ca. 70-100 °C mit Elektroden (z.T. als Schrägbohrungen) im Abstand von ca. 5 m, hier bis ca. 14 m Tiefe, mit begleitender Dampfabsaugung und on-site-Abreinigung, bei einer Sanierungsdauer von ca. 6 Monaten. Bei 33.600 m³ Einwirkvolumen sind ca. 100 Elektroden bis 14 m Tiefe im Abstand von 5 m erforderlich, die eine Anschlussleistung von ca. 2700 kW benötigen.

Dafür wird aktuell das Sanierungskonzept erstellt.

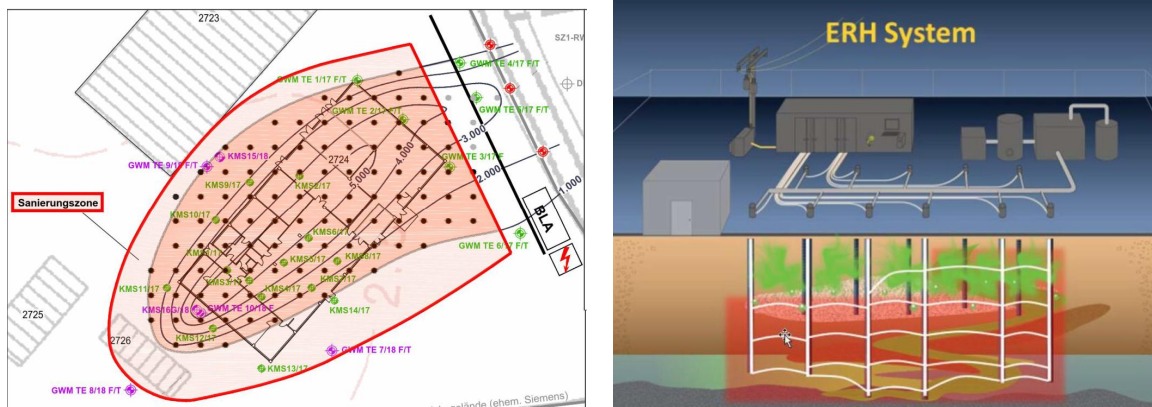


Abb. 11: Lageskizze und Prinzipschema für die ERH-Sanierung.

3.6 Begleitendes prozessbezogenes Grundwassermonitoring

Begleitend wird ein umfassendes, auch NA-bezogenes Grundwassermonitoring realisiert, u.a. mit Einsatz von 12 Mobilfunkdatenloggern mit webbasierter Online-Datenhaltung sowie Datenbank- und GIS-Unterstützung.

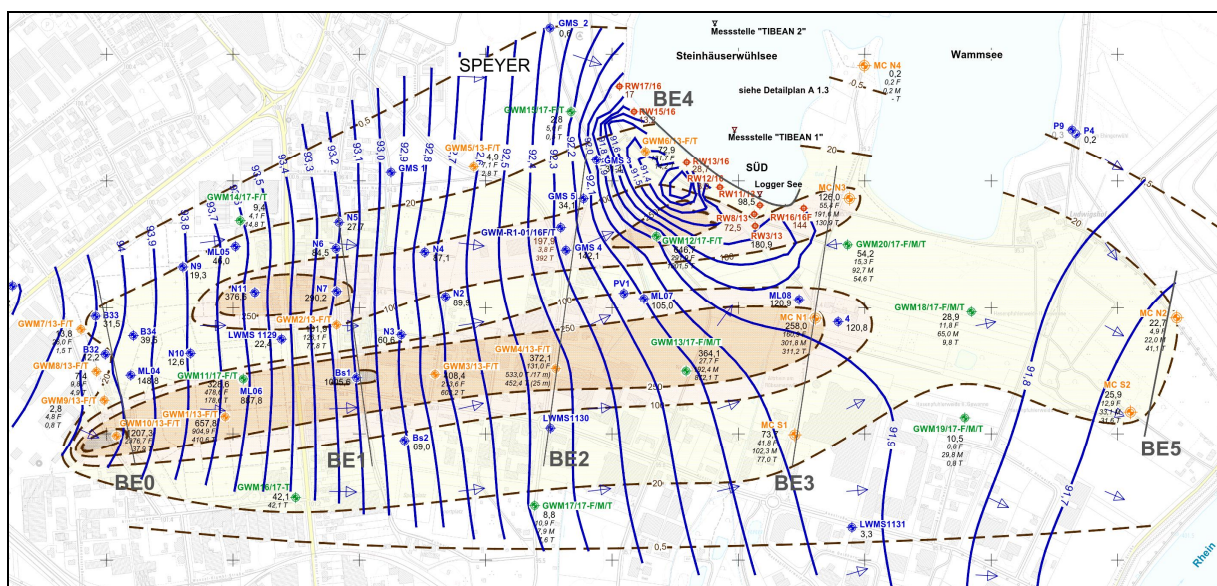


Abb. 12: Integrierter Monitoringplan mit Hydroisohypsen und LCKW-Isokonzn, Herbst 2017.

4 Ausblick

Wenn alle Sanierungselemente inkl. Kontroll- und Überwachungselementen in den 3 Sanierungszone installiert und ab ca. 2020 im interagierenden Sanierungsbetrieb sind, kann dieses anspruchsvolle Sanierungsvorhaben mit seinen klassischen und innovativen Bestandteilen unter modelltechnischer Begleitung und Optimierung erfolgreich bewältigt werden.

Entsprechend der räumlichen und zeitlichen Abfolge der verschiedenen Sanierungszone wird das Gesamtanierungsvorhaben als Treatment Train behandelt.

Hervorzuheben ist die hervorragende Zusammenarbeit zwischen den Umweltbehörden, dem Sanierungspflichtigen und den Sanierungsbeteiligten einschließlich der guten Öffentlichkeitsarbeit.

Anschriften der Autoren

Dipl.-Geol. Thomas Reichardt
Siemens AG
Real Estate
RE DT PM CP
Otto-Hahn-Ring 6
81739 München, Deutschland
Tel.: +49 89 722-709989
Fax: +49 89 636-81975
reichardt.thomas@siemens.com

Dr. Karsten Menschner
CDM Smith Consult GmbH
Weißensefser Str. 65H
04229 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 33389500
Fax: +49 (0)341 33389392
karsten.menschner@cdmsmith.com