

92. Aktualisierung, Mai 2022

5943

Dipl.-Geol. Gert Rehner, Gruibingen und Dipl.-Geol. Dr. rer. nat. Eduard J. Alesi, Gruibingen

Gut umgerührt – 3-D-Biocirculation zur Sanierung heterogener Grundwasserleiter

- 1 Einleitung
- 2 Struktur und Fließverhältnisse in heterogenen Aquiferen
- 3 Beschreibung von Rebound-Effekten
- 4 Funktionsweise von Grundwasserzirkulationsbrunnen (IEG-GCW®)
- 5 Praxisbeispiele
 - 5.1 Praxisbeispiel 1: IEG-Biocirculation®
 - 5.2 Praxisbeispiel 2: IEG-Biocirculation® mit Reaktor am Standort
- 6 Kostenbetrachtung und Fazit
- 7 Literatur

Schlagwortübersicht

back diffusion	3
Dead-End-Poren	2
forward diffusion	3, 11
high permeable zone (HPZ)	3 ff., 8 f., 11
IEG-Biocirculation®	
low permeable zone (LPZ)	3 f., 7 ff., 11, 13, 16 f.
Multi Injection Well (MIW)	26 f., 32, 35
Multilevel Sampling Well (MLSW)	20, 26 f., 32, 34 ff., 38, 43, 49
Pump-and-Treat (P&T)	9, 11, 37, 39, 51, 54 f.
Radius of Influence (ROI)	26, 32, 34 ff., 38
rebound-effect	3 f., 11 f., 39

1 Einleitung

- 1 Der Klimawandel wirkt sich geografisch unterschiedlich aus. Während in einigen Regionen die Niederschlagsmengen zunehmen, werden andere Gegenden unter zunehmender Trockenheit leiden. Die bisherigen Wasserbewirtschaftungsmodelle müssen diesen geänderten Rahmenbedingungen angepasst werden. Dabei gewinnt der Schutz des unterirdischen Wassers eine immer höhere Bedeutung, da etwa die Hälfte des weltweit für den häuslichen Gebrauch entnommenen Wassers aus dem Grundwasser stammt, ebenso etwa 25 % des gesamten für landwirtschaftliche Zwecke verwendeten Wassers. Trotz ihrer enormen Bedeutung wird diese natürliche Ressource oft nur unzureichend verstanden, schlecht verwaltet und übernutzt [1]. Anthropogene Verschmutzungen des Grundwassers schädigen davon abhängige Ökosysteme und können dessen Eignung für die oben genannten Zwecke erheblich einschränken. Einmal verschmutzte Grundwasserleiter sind häufig für Jahrzehnte, wenn nicht Jahrhunderte dauerhaft belastet. Ursachen für Verunreinigungen sind vielfältig: flächig treten sie durch diffuse landwirtschaftliche Quellen auf (Nitrat, Pestizide, Agrochemikalien), vielfach finden sich punktuelle Einträge durch unzureichend abgedichtete Deponien, Havarien, ehemalige und aktuelle Industriestandorte mit dem gesamten Stoffspektrum der anorganischen und organischen Chemie. Weil Grundwasserkörper in Wasserbewirtschaftungsmodellen als langsam reagierende Pufferreservoirs Langzeitstabilität besitzen sollten, muss deren Reinheit oberste Priorität eingeräumt werden. Dazu dienen neben vorbeugendem Grundwasserschutz vor allem Maßnahmen zur Rehabilitierung der vielerorts bereits durch Verunreinigungen verlorengegangenen Funktionsfähigkeit. Es gilt dabei, aus der Vergangenheit stammende Unzulänglichkeiten bei der Einschätzung des Transports und dem Verhalten von Chemikalien im Untergrund zu erkennen und künftig zu vermeiden. Dazu sollen die nachfolgenden Ausführungen dienen. Sie beschränken und konzentrieren sich aufgrund der Komplexität der Thematik auf die Sanierung lokal begrenzter Grundwasserbelastungen mit typischen Industriechemikalien: Ausgangsprodukte für die Chlorchemie, Lösemittel, Treibstoffe etc.

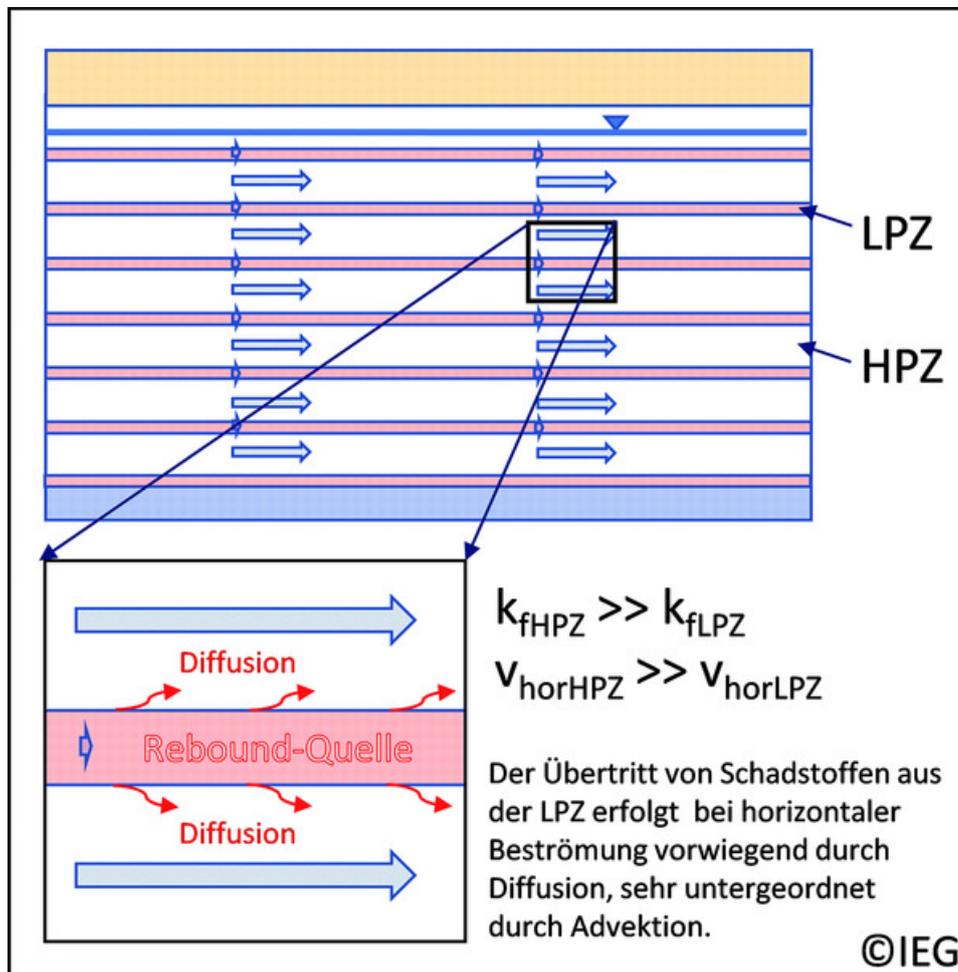
2 Struktur und Fließverhältnisse in heterogenen Aquiferen

- 2 Porengrundwasserleiter wurden in der Regel aus Sedimenten von Oberflächengewässern gebildet und stellen die Hauptmasse der genutzten Aquifere dar. Sie weisen im Normalfall einen heterogenen Aufbau auf, weil Oberflächengewässer durch eine hohe hydraulische Dynamik gekennzeichnet sind. Im Laufe der Jahrtausende variierten sowohl Wasserstände als auch die Verläufe von Flüssen, das Sedimentationsgeschehen wurde von Trockenzeiten und Flutereignissen bestimmt. Es bildeten sich daher Wechsellagerungen verschiedener Korngrößen und -formen aus, vielfach finden sich als Stillwassersedimente Einschaltungen humoser Horizonte oder feinkörniger Linsenstrukturen. Die horizontale hydraulische Durchlässigkeit von Porengrundwasserleitern ist in der Regel um ein Vielfaches größer als in vertikaler Richtung. Daher erfolgt das Strömen von Grundwasser zu einem Vorfluter oder Entnahmebrunnen vorzugsweise in horizontalen Bahnen auf präferenziellen Fließwegen. Für die Gewinnung von Trink- oder Brauchwasser besitzt letzterer Aspekt wenig Bedeutung, hier zählen allein die Wassermenge und -qualität. Anders jedoch im Falle von Schadstoffen, die in den Untergrund gelangen. Sie fixieren sich diffusiv vorzugsweise in feinkörnigen Bereichen, da dort eine hohe Anzahl von Adsorptionsplätzen zur Verfügung steht. Kontaminanten akkumulieren sich in sogenannten Dead-End-Poren und gering durchströmten Porenengstellen. Sie werden durch einen nur sehr langsamen advektiven Austauschprozess über ausgedehnte Zeiträume wieder freigesetzt. Daher bedarf es für effektiv arbeitende Sanierungsmaßnahmen in solchen heterogenen Grundwasserleitern spezieller hydraulischer Werkzeuge, die eine gleichmäßige, in alle Richtungen wirkende Bestromung des porösen Raumes bewirken, um Strömungsstagnationen an Porenengstellen zu überwinden und präferenzielle Fließwege zu umgehen. Populär ausgedrückt: Beim heterogenen Aquifer muss das reinigende Fluid (Grundwasser, ggf. mit Zusatzstoffen) gerichtet durch „dick und dünn“ gehen, damit sich Erfolge in vertretbaren Zeiträumen einstellen.

3 Beschreibung von Rebound-Effekten

- 3 Die vorstehend beschriebene Wechsellagerung von Sedimentschichten kann zu zyklischen Abfolgen von wenigen Millimetern bis vielen Metern Mächtigkeit führen. So lassen sich in Grundwasserleitern mehr oder weniger horizontal gelagerte Schichten mit höherer Durchlässigkeit (HPZ, „high permeable zones“) von denen mit geringer unterscheiden (LPZ, „low permeable zones“). International üblich erfolgt eine Grenzziehung zwischen beiden Zonen anhand der hydraulischen Leitfähigkeit (k_f -Wert) bei etwa $1 \cdot 10^{-6}$ bis $1 \cdot 10^{-7}$ m/s [2]. Eingedrungene Schadstoffe breiten sich advektiv und gravitativ in den HPZ aus und diffundieren im Schadenszentrum und in der sich entwickelnden Schadstofffahne in die LPZ ein („forward diffusion“). Verringert sich die Schadstoffbelastung in den HPZ infolge des Abtransports unter ein bestimmtes Niveau, so kehrt sich der Gradient der Diffusion um und ein „back diffusion“-Prozess beginnt: Schadstoffmoleküle treten dann aus den LPZ in das Porenwasser der HPZ über (Abb. 1). Der folglich dort stattfindende Wiederanstieg der Konzentrationen wird als Rebound-Effekt bezeichnet.

- 4 **Abb. 1: Schematische Darstellung von Rebound-Effekten in einem heterogen aufgebauten Grundwasserleiter (Strömung horizontal von links nach rechts, die Länge der Pfeile symbolisiert die relative horizontale Fließgeschwindigkeit v_{hor}); Schadstoffe treten aus den feinerkörnigen, langsam durchflossenen Bereichen (LPZ) in die hydraulisch besser leitenden, wesentlich schneller durchströmten Schichten (HPZ) über (aus [14]).**



- 5 In den HPZ stellt sich so eine Mischkonzentration ein, die nach einiger Zeit zwar nur noch einige Prozent der ursprünglichen Belastung beträgt, aber noch weit über den anzustrebenden Grenzwerten liegt. Deren weitere Reduzierung ist häufig nur mit jahrzehntelangen, kostenintensiven Abpumpmaßnahmen zu realisieren. Über die Modalitäten für die Beendigung solcher „langlaufenden“ Sanierungen wird in den letzten Jahren zunehmend diskutiert. Dass das konventionelle P&T (Pump-and-Treat) als dominierendes „Arbeitspferd“ in der Grundwassersanierung hier nicht zielführend arbeitet, ist jedoch seit langem bekannt.
- 6 Bereits vor über 30 Jahren legten verschiedene Autoren und auch die US-amerikanische EPA (US-Environmental Protection Agency) in ihren Statuspapieren dar, welche Konzentrationsentwicklungen in Sanierungsbrunnen zu erwarten sind [3-6]. Sie evaluierten den Einsatz von P&T in unterschiedlichen Aquiferstrukturen und kamen zum Schluss, dass es gelänge, Schadstoffe in großen Mengen aus dem Untergrund zu extrahieren und deren weitere Ausbreitung zu minimieren. Es

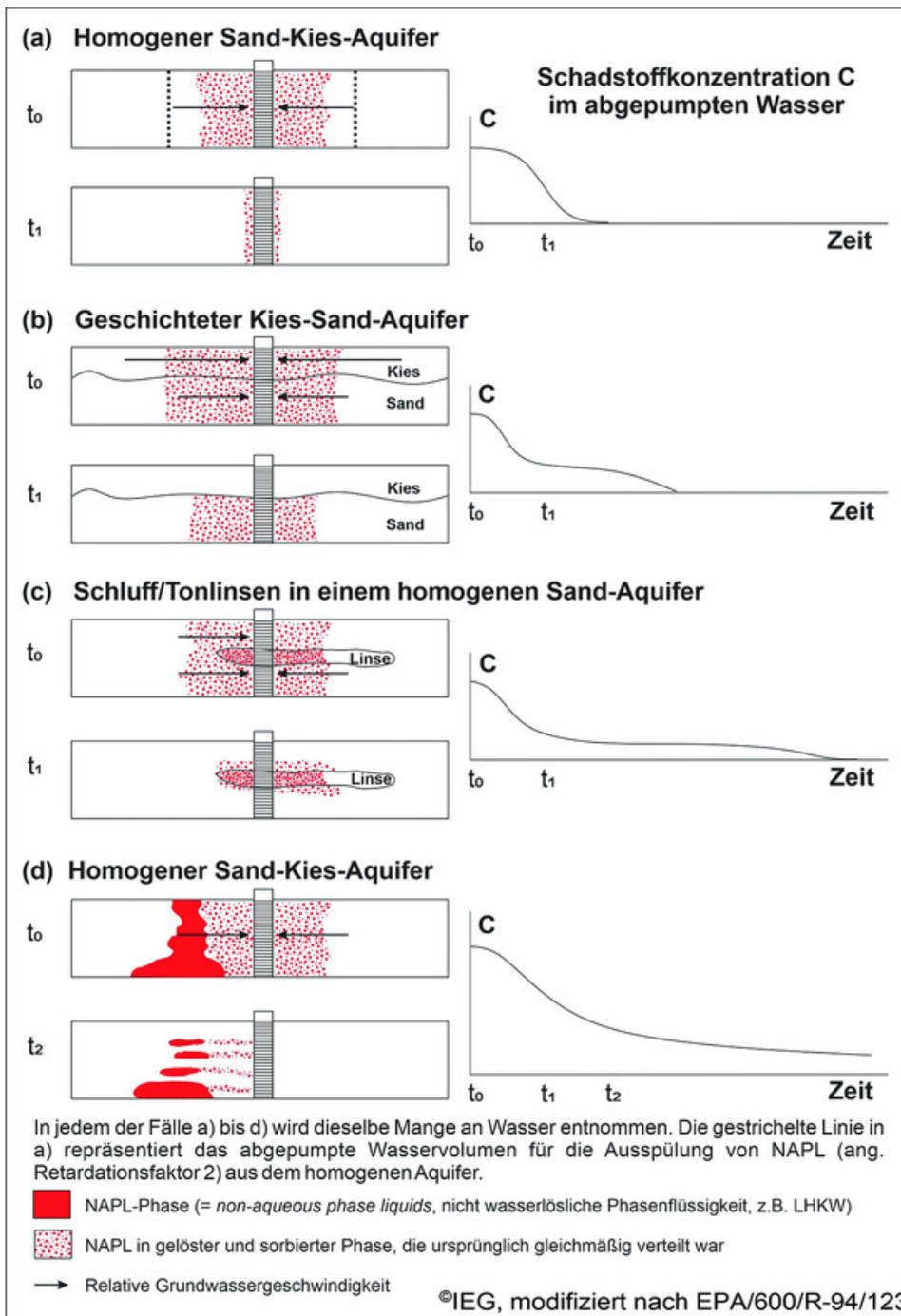
sei jedoch nur in Einzelfällen dazu geeignet, behördliche Grenzwerte zu erreichen und wenn, dann nur in sehr langen Zeiträumen. Dies hinge u. a. mit sich präferenziell ausbildenden Fließwegen im Aquifer und der Immobilisierung von Schadstoffen in hydraulisch gering durchlässigen Schichten zusammen [5]. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Entwicklung einiger Konzentrationsverläufe für differenziert aufgebaute Grundwasserleiter.

- 7 Die advective Massenabfuhr aus gut durchlässigen, homogen aufgebauten Schichten bewirkt nach kürzerer Zeit eine deutliche Abnahme und Eliminierung der Schadstoffgehalte im geförderten Wasser (Abb. 2a), bei zweigeschichteten Aquiferen verhindert jedoch der langsamere diffusive Schadstoffnachschub aus der unterlagernden LPZ eine weitere starke Reduzierung (Abb. 2b). In den Aquifer eingelagerte Feinkornlinsen, die eine starke Schadstoffanreicherung erfahren haben, führen zu einer Stagnation von geringen Konzentrationen über einen langen Zeitraum (Abb. 2c). Die Anwesenheit von Residualphase im Porenraum disqualifiziert P&T zur Erreichung von Sanierungszielen, da bis dahin mit einem jahrzehntelangen Anlagenbetrieb zu rechnen ist (Abb. 2d).
- 8 Große Unterschiede in den hydraulischen Leitfähigkeiten von LPZ und HPZ sowie höhere Volumenanteile von LPZ verlängern den Sanierungszeitraum beträchtlich. Dies gilt in vielen Fällen sogar nach einer Quellensanierung (Entfernung der Herdzone), da durch die seit dem Schadensereignis abgeströmten Kontaminanten eine intensive Imprägnierung feinkörniger Aquiferbereiche im Grundwasserabstrombereich durch transverse Diffusion erfolgt. Mit versiegenderem Nachschub aus dem Herd treten diese Schichten dann als langgestreckte, persistente Sekundärquellen in Erscheinung [7].
- 9 Tatti et al. (2018) [8] untersuchten den Zusammenhang des Massenausstrags aus den LPZ mit der Grundwassergeschwindigkeit in den umgebenden HPZ. Sie konnten zeigen, dass durch die Beschleunigung der letzteren ein großer Diffusionsgradient zwischen beiden Zonen erreicht werden kann, der den Schadstoffaustrag auf eine bestimmte Größe hin optimiert. Jede weitere Erhöhung der Strömungsintensität bleibt jedoch folgenlos, da die Fracht durch die geringe Geschwindigkeit der Nachdiffusion aus dem Inneren der LPZ zur Oberfläche limitiert wird. Nur wenn Schadstoffe noch überwiegend die Grenzflächen von LPZ belegen, sind kürzere Sanierungszeiträume durch P&T in heterogenen Aquiferen realisierbar, dies ist bei sehr jungen Schadensereignissen der Fall. Bei älteren Kontaminationen konnten Schadstoffe wesentlich tiefer in die Poren der LPZ eindringen. Dort ist ein Nachlassen der Rückdiffusion nur in sehr langen Zeiträumen beobachtbar.

10

Abb. 2: Hypothetische Beispiele für die Konzentrationsentwicklung im abgepumpten Wasser (verändert nach [6], aus [14]). t_0 markiert den Beginn des Pumpbetriebs, t_1 wird nach Entnahme der normierten Wasserentnahme erreicht, t_2 bedeutet eine Verdopplung von t_1 .

5000 Sanierungsverfahren / 5900 Dekontamination von Grund- und Sickerwasser / 5943 Gut umgerührt – 3-D-Biocirculation zur Sanierung heterogener Grundwasserleiter / 3 Beschreibung von Rebound-Effekten /



4 Funktionsweise von Grundwasserzirkulationsbrunnen (IEG-GCW®)

- 11 Zur Verminderung von Rebound-Effekten wurden in den letzten Jahren abseits von P&T eine Reihe verschiedener alternativer Methoden entwickelt und eingesetzt. Neben thermischen und elektrokinetischen Verfahren und dem Fracking mittels Hochdruckinjektionen, die partielle Wegsamkeiten in gering durchlässigen Schichten schafft, sind es überwiegend Injektionstechniken, mit denen verschiedene, speziell komponierte Chemikalien oder Partikel in den Grundwasserleiter eingebracht werden. Das Standardsetting besteht aus einem eng gerasterten Feld von kleinkalibrigen Bohrungen zur tiefengestaffelten (Druck-)Injektion. Dabei herrscht die Erwartung, dass sich diese „Chemikalien-Wolken“ im Untergrund mehr oder weniger gleichmäßig verteilen lassen, um z. B. die äußeren Oberflächen der schadstoffbelasteten LPZ zu belegen und aus dem Inneren herausdiffundierende Schadstoffe umzuwandeln/ abzubauen. Die Reagenzien sollen aufgrund des Diffusionsgefälles auch ins Innere dieser Schichten einwandern („forward diffusion“) und in deren Porenräumen Minderungsprozesse in Gang setzen. Da der Diffusionsgradient zwischen HPZ und LPZ infolge von Verfrachtung/ Verbrauch der Reagenzien wieder abnimmt, sind in vielen Fällen mehrere zeitlich auseinanderliegende Injektionszyklen erforderlich, um die anvisierte Schadstoffeliminierung zu erreichen. Daher stößt das Verfahren bei größeren Arealen, komplexer Schichtfolge und zunehmender Tiefenlage der Kontamination rasch an technische und ökonomische Grenzen.
- 12 Wesentlich wirkungsvoller lassen sich Rebound-Effekte durch Brunnen zur vertikalen Grundwasserzirkulation (groundwater circulation well, GCW) minimieren. Die ersten derartigen Brunnen wurden von der IEG Industrie Engineering GmbH Ende der 1980er-Jahre unter der Bezeichnung UVB (Unterdruck-Verdampfer-Brunnen) für die Entfernung von flüchtigen Schadstoffen aus dem Grundwasser zum Einsatz gebracht. Die bis heute weiter entwickelten Systemmodifikationen kommen als IEG-GCW® auf den Markt, nur diese sind Gegenstand der nachfolgenden Beschreibungen. Kreislaufströmungen im Grundwasser entstehen, wenn zwischen zwei oder mehreren senkrecht in einer Achse angeordneten und gegeneinander im Ringraum der Bohrung abgedichteten und somit hydraulisch getrennten Filterstrecken starke hydraulische Gradienten ($I = 0,5-1,0$) durch im Brunnen oder oberirdisch angeordnete Pumpen erzeugt werden. Die Anzahl der Filterabschnitte hängt von der Schadstoffverteilung

und Struktur des Grundwasserleiters ab, wobei die Drehrichtungen der Zirkulationsströmungen variabel gestaltbar sind.

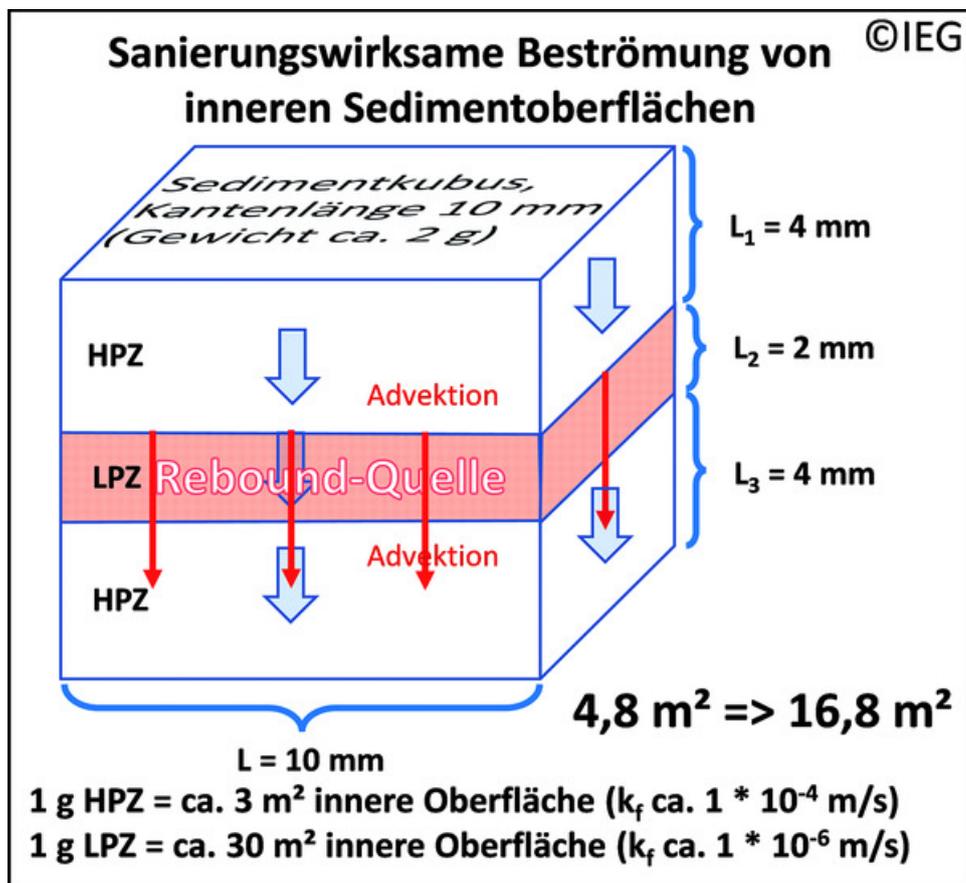
- 13 Da LPZ in der Regel horizontal gelagert sind, werden diese im Gegensatz zum konventionellen Pumpbetrieb im Brunneneinflussbereich nicht mehr längs, sondern orthogonal zu ihrer Erstreckung durchflossen, im Porengerüst angereicherte Schadstoffe lassen sich dadurch advektiv adressieren (Abb. 3). Und weil mittels Advektion wesentlich höhere Mengen an Wasserinhaltsstoffen bewegt werden können, führt der Einsatz von IEG-GCW® zu einem wesentlich schnelleren Abtransport von Schadstoffen und überwindet die Limitierung von Sanierungen durch langsame Diffusionsgeschwindigkeiten mit geringen Massenfrachten.

- 14 **Abb. 3: Schematische Darstellung der Strömungsverhältnisse im Umfeld eines zweifach verfilterten IEG-GCW® [aus 14]: Das Grundwasser wird an der Basis des Brunnens eingesaugt und gelangt über die obere Filterstrecke wieder zurück in den Aquifer. Dabei entsteht eine Zwangszirkulation um den Brunnen. Die in der Regel stark kontaminierten LZP werden dabei vertikal durchströmt, Schadstoffe lassen sich so auf kurzen Wegen mobilisieren und abtransportieren ($k_{f\text{vert}}$ = vertikaler k_f -Wert, d = Mächtigkeit des Aquifers).**

entspricht einem Abpumpbrunnen – ein Vielfaches der Zeit benötigt wurde, um denselben Massenausstrag wie mit einem IEG-GCW® zu erzielen. Als Fazit resultierte die Erkenntnis, dass jeder Brunnenausbau und -betrieb in der Praxis gut auf den zu behandelnden Untergrund und die Schadstoffverteilung abgestimmt werden muss.

- 16 Die Strömungsführung mittels IEG-GCW® erschließt zudem sehr effektiv die inneren Oberflächen von LPZ (Abb. 4). Letztere wird im Wesentlichen vom Korngrößenspektrum und der Kornform bestimmt und ist hauptverantwortlich für die Retention von Schadstoffen. Mit abnehmender hydraulischer Durchlässigkeit vergrößert sich die innere Oberfläche von Sedimenten, auch die Porenkanäle verengen sich entsprechend [10]. Eine vertikale Zwangsdurchströmung dieser Strukturen mittels IEG-GCW® vervielfacht die verfügbare Reaktionsfläche für biotische und abiotische Schadstoffminderungsprozesse und beschleunigt so die Sanierung erheblich.

- 17 **Abb. 4: Rechenbeispiel für die Auswirkung der vertikalen Bestromung einer LPZ. Diese soll in einem kubischen Volumenelement mit einer Kantenlänge von 10 mm eingelagert sein. Im dargestellten Würfel führt ein starker vertikaler Gradient rechnerisch zu einer Erhöhung der sanierungswirksam beströmten Sedimentoberfläche von 4,8 m² auf 16,8 m² (Vergrößerung um 350 %). Eine zuvor existierende, sehr langsame horizontale Durchströmung der LPZ ist für den Massentransfer vernachlässigbar (verändert nach [14]).**



- 18 Die für eine Sanierungsmaßnahme erforderliche Anordnung und Anzahl von IEG-GCW® lassen sich numerisch berechnen, Abbildung 5 zeigt die relevanten geometrischen Größen der Grundwasserzirkulation [11]. Eine durch einen Zirkulationsbrunnen im Aquifer erzeugte Kreislaufströmung besitzt genähert die Form eines Rotationsellipsoids. Es sind vereinfachend (Grundwasserfluss von links nach rechts):
- B_B : Breite des Einzugsbereichs an der Aquifersohle
 - B_T : Breite des Einzugsbereichs an der Oberfläche des Aquifers
 - H : Mächtigkeit des Aquifers
 - S : grundwasseroberstromige und -abstromige Staupunkte des Zirkulationskörpers
- 19 Die Geometrie des Abstromfensters ist zu der des Zustromfensters umgekehrt spiegelsymmetrisch. Unbelastetes Grundwasser fließt nur im Rahmen des natürlichen Grundwasserzustroms in den zu behandelnden kontaminierten Bodenbereich, im Gegensatz zu einem Abpumpbrunnen, der radial von allen Seiten frisches Wasser zur Durchspülung

der Kontamination heranzieht. IEG-GCW® werden üblicherweise so dimensioniert, dass die Menge des natürlich zuströmenden Wassers nur etwa 10 % des insgesamt um den Brunnen zirkulierenden Wassers ausmacht. Innerhalb des Rotationsellipsoids absolviert das dem Brunnen zuströmende Wasser dann mehrere Umläufe, bevor es dessen Einflussbereich wieder verlässt. So wird eine hohe Verweildauer in der Rotation sichergestellt und der Abstrom von nur teilbehandeltem Wasser minimiert. Im Kreislaufbereich befindliche Schadstoffe werden aus feinkörnigeren Sedimentstrukturen herausgelöst, sie kommen kontinuierlich mit Nährstoffen in Kontakt und unterliegen auf dem Weg zum zentralen Brunnen einem bioreaktiven Transport.

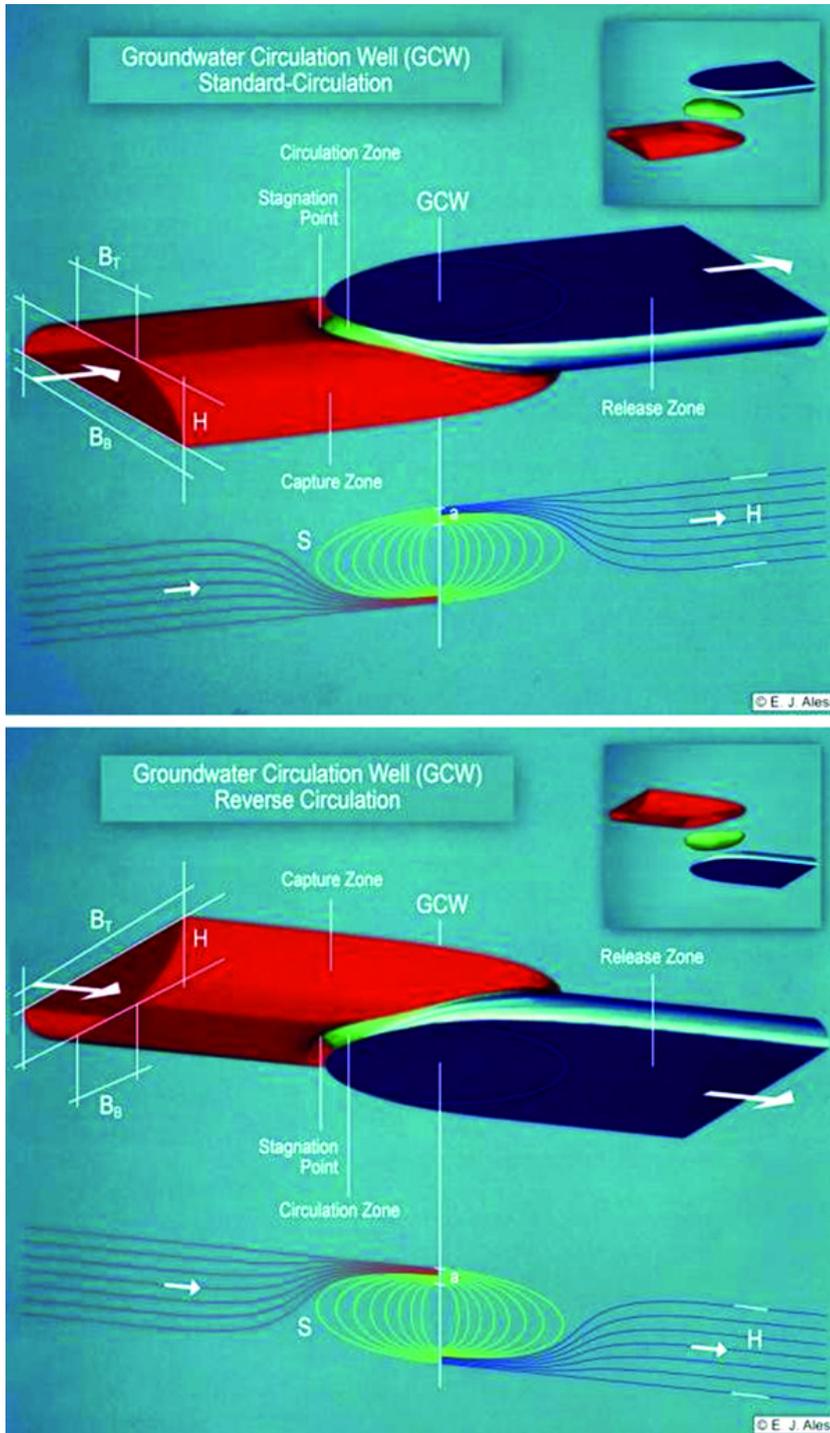
- 20 In Abhängigkeit von den Untergrundverhältnissen und dem Schadensbild wurde in den letzten Jahrzehnten das Einsatzspektrum der GCW-Technologie wesentlich erweitert: Felder von Zirkulationsbrunnen mit unterschiedlichen Filteranordnungen, die miteinander interagieren, Modifizierung der Kreislaufhydraulik mit peripheren Satellitenbrunnen, Kombinationen mit Teilstromentnahmen, oszillierende Betriebsweisen, Applikation verschiedenster Chemikalien zur oxidischen oder reduktiven biologischen Behandlung (IEG-Biocirculation®), Koppelung mit thermischen Verfahren etc. Das um den Brunnen umlaufende Wasser kann vor der Reinfiltration je nach Zielvorgaben auch über eine oberirdische chemisch-physikalische Reinigungseinheit oder einen Bioreaktor geführt werden [12, 13]. Durch speziell konstruierte Filter- und Steigrohranordnungen mit dazwischenliegenden Abdichtungen lassen sich mittlerweile bis zu 6 einzelne Filterabschnitte in einer Achse anordnen, früher verwendete, zu Störungen neigende mechanische Packersysteme zur hydraulischen Separierung der Filterstrecken können entfallen. Damit ist es möglich, auch 2 oder 3 Grundwasserleiterhorizonte simultan mit einem einzigen, qualifiziert ausgebauten Brunnen getrennt zu behandeln. Anzumerken wäre, dass das Monitoring von Zirkulationsbrunnen zuverlässig nur mit Multilevelmessstellen (Multilevel Sampling Well) zu bewerkstelligen ist. In durchgehend verfilterte Messstellen entwickeln sich aufgrund der sich im Sanierungsfeld einstellenden Gradienten Vertikalströmungen, die sowohl das gemessene hydraulische Potential als auch die Schadstoffkonzentrationen extrem verfälschen.
- 21 Weil die Speicherung von Wärme und Kälte im Untergrund unter dem Gesichtspunkt der Reduzierung von Treibhausgasemissionen zunehmend an Bedeutung gewinnt, wurden in den letzten Jahren verschiedene Anstrengungen unternommen, die in der Umgebung eines IEG-GCW® speicherbare Energie zu untersuchen und wirtschaftlich zu nutzen. Das Kreislaufvolumen um den Brunnen lässt sich thermisch in eine

wärmere und kältere Zone schichten und ist durch geringe Verluste und niedrige Betriebskosten gekennzeichnet. Aus den bislang nur wenigen praktischen Anwendungen lassen sich allerdings noch keine belastbaren allgemeingültigen Aussagen über die chemisch-physikalisch-mikrobiellen Prozesse im Aquifer ableiten, die für eine verlässliche Dimensionierung und damit breite Anwendung notwendig wären. Hier sind weitere Forschungsarbeiten gefragt.

22

Abb. 5: Geometrie der Hydraulik eines IEG-GCW®; oben: Standardzirkulation mit Eintritt des Wassers in die untere Filterstrecke („Rechtslauf“), unten: inverser Betrieb mit Eintritt des Wassers über die obere Filterstrecke („Linkslauf“).

5000 Sanierungsverfahren / 5900 Dekontamination von Grund- und Sickerwasser / 5943 Gut umgerührt – 3-D-Biocirculation zur Sanierung heterogener Grundwasserleiter / 4 Funktionsweise von Grundwasserzirkulationsbrunnen (IEG-GCW®) /



92. Aktualisierung, Mai 2022

5 Praxisbeispiele

92. Aktualisierung, Mai 2022

5.1

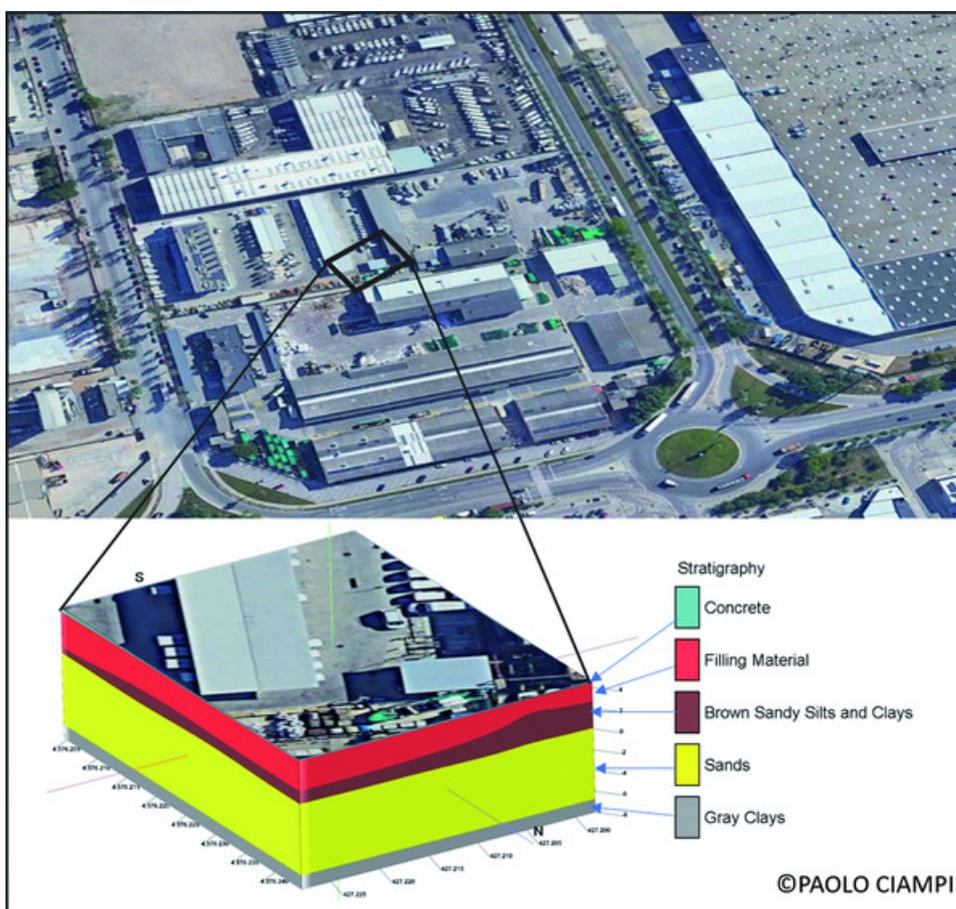
Praxisbeispiel 1: IEG-Biocirculation®

- 23 Für ein mit LHKW (leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe) belastetes Gelände in Barcelona/Katalonien sollte ein mikrobiologisches in-situ-Grundwassersanierungsverfahren entwickelt und getestet werden. Gemeinsam mit einem spanischen Partner wurden hierzu Projektmittel eingeworben (*MicroBiome*, Kennzeichen 4109801RHS, Förderung im Rahmen von ZIM – Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand, Träger AiF Projekt GmbH). Die Grundidee war, den Aquifer in seiner Gänze als biologischen Reaktor zur reduktiven Dehalogenierung der LHKW zu nutzen. Hierzu war eine möglichst gleichmäßige sowohl horizontale als auch vertikale Verteilung von Nährstoffen zur Verstärkung des anaeroben Milieuzustands und zur Anregung der autochthonen Mikroflora notwendig. Zur Realisierung wurde ein Kombinationsverfahren entwickelt (IEG-Biocirculation®), bei dem bereits aus grundsätzlichen Funktionsunterschieden zu herkömmlichen Technologien heraus eine bessere Leistung zu erwarten war. Eines der Projektziele war es, neben Untersuchungen zur Veränderung des Mikrobioms im Grundwasser auch neuartige Ansätze zur Modellierung des Aquifer-Porengerüsts zu verfolgen. Wissenschaftlich wurde das Vorhaben durch das Centre Tecnològic de Catalunya/Manresa (eurecat ctm) in Barcelona und das Institut für Digitale Materialforschung (IDM) der Hochschule Karlsruhe betreut. Die Universität Rom („Sapienza“) visualisierte nachgelagert die strukturgeologischen Daten. Ein Feldtest zur Evaluierung der Labor- und Modellierungsdaten nebst Isotopenuntersuchungen fand vom Februar bis Dezember 2017 statt. Es ging anschließend mit kleinerer Unterbrechungen und reduziertem Umfang in eine reguläre Sanierungsmaßnahme über, die bis April 2021 weitergeführt wurde. Zum Jahresende 2021 bescheinigte die Agència Catalana de l'Aigua (ACA) die erfolgreiche Sanierung des Grundwasserschadens.
- 24 Das Untersuchungsgelände befindet sich in der „Zona Franca“, einem Industriegebiet nahe dem Hafen von Barcelona (Abb. 6). Der Untergrund besteht aus einer Wechsellagerung von Sanden unterschiedlicher Korngrößen mit horizontalen k_f -Werten (k_{fhor}) von $1,9 \cdot 10^{-4}$ – $1,4 \cdot 10^{-5}$ m/s. Das Verhältnis des horizontalen zum vertikalen k_f -

Wert (k_{fhor}/k_{fver}) ist ≥ 10 und die Mächtigkeit des Aquifers beträgt ca. 7 m. Im Grundwasser fanden sich bis zu 140 mg/l LKWW (Summe), die Hauptkomponenten waren TCE (Trichlorethen), cDCE (1.2-cis-Dichlorethen) und VC (Vinylchlorid).

25

Abb. 6: Lage des Geländes mit generalisierter Darstellung der Untergrundstruktur (Stratigraphie von oben nach unten: Beton/Pflaster, Auffüllung, sandiger Schluff mit Tonanteilen, Sande, Tone), verändert nach [15], aus [14].



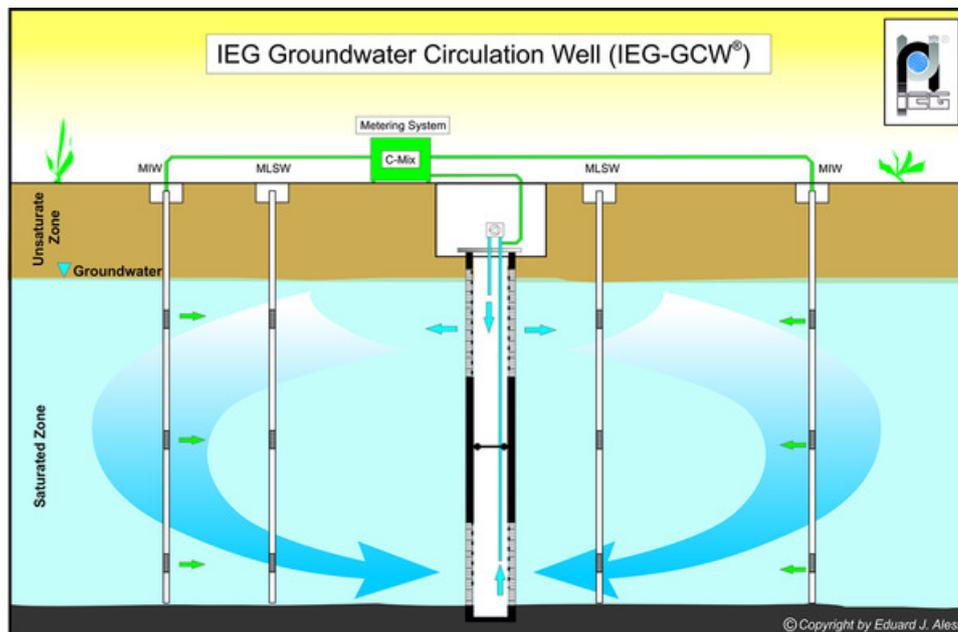
26

Wenn bei bisherigen GCW-Sanierungsprojekten Reagenzien standardmäßig in den zentralen Brunnen eingegeben wurden, so stellte sich bereits brunnennah ein stark reaktiver Transport ein, d. h. die Nährstoffe unterlagen schon nach kurzer Distanz einer erhöhten chemisch-physikalischen Transformation bzw. einer biologischen Verstoffwechslung. Sie erreichen so oftmals gar nicht alle relevanten Bereiche innerhalb des ROI (Radius of Influence). Daher sollte im Rahmen des Projekts versuchsweise über mehrere stationäre periphere MIW (Multi Injection

Wells) zusätzlich Nährstoff eingegeben werden, um im Zusammenspiel mit einer räumlich unterschiedlich intensiven Grundwasserzirkulation (IEG-Biocirculation®) eine besser steuerbare und so effektivere horizontale und vertikale Verteilung zu bewirken. Das Sanierungsverfahren bestand somit aus einer Kombination eines zweifach verfilterten IEG-GCW® mit vier IEG-MIW, ergänzt durch zwei MLSW (Multilevel Sampling Wells) zur horizontaltreuen Beprobung (Abb. 7). Die MIW waren mit drei Infiltrationshorizonten in verschiedenen Tiefen ausgestattet. Damit ließ sich eine auf den Sanierungsverlauf adaptierbare Dosierung sicherstellen.

27

Abb. 7: Prinzipschema des getesteten Sanierungsverfahrens mit zentralem IEG-GCW® und peripheren MLSW und MIW zur Überwachung und Nährstoffzugabe (aus [14]).



28

Alle relevanten Stoffumwandlungs- und Stoffaustauschvorgänge in einem Aquifer spielen sich letztlich auf der Porenskalenebene im Mikrometerbereich ab. Daher sind die Kenntnis der Beschaffenheit der Sedimentpartikel, deren Oberflächeneigenschaften und ihr räumliches Gefüge die Schlüssel zur realitätsnahen Beschreibung des Fluidtransports, von Energieflüssen und Stoffveränderungen im Untergrund. Klassische Programme zur numerischen Modellierung von hydraulischen Prozessen wie MODFLOW oder FEFLOW erlauben keine spezifischen Aussagen über Strömungen in Porenräumen und -kanälen und den sich darin abspielenden Prozessen (Biofilmbildung, Ausfällungen etc.). Ein weiteres Thema im Rahmen des ZIM-Projekts war daher ergänzend die Simulation von

Fließprozessen im Untergrund. Es sollten solche makroskaligen Programme für die praktische Anwendung durch systematische, fluiddynamische 3-D-Porenraum-Simulationen auf der Mikroebene erweitert werden. Dem IDM wurden hochauflösende Fotografien und Proben von Sedimentabschnitten aus einer Liner-Bohrung am geplanten Standort des GCW zur Verfügung gestellt, um daraus Korngrößen und -formen, Oberflächenbeschaffenheit und Lagerungsverhältnisse der Partikel im Aquifer abzuleiten. Daraus resultierte in einem ersten Schritt eine Bibliothek virtueller Sedimentkörner, anhand dieser erfolgte in einem zweiten Schritt die Schaffung virtueller Ablagerungen (Sedimentzwillinge), die nach definierten Algorithmen beliebig strukturiert werden können (räumliche Orientierung, Lagerungsdichte etc., Abb. 8). Digitale Zwillinge von Materialien sind virtuelle Modelle, mit denen sich innere Prozesse und Interaktionen mit der Umgebung darstellen lassen. Sie liefern Einblicke, die häufig in der Realität so nicht oder nur mit großem Aufwand zu erlangen sind. Während digitale Zwillinge für Produkte, Produktionsanlagen, Prozesse, Dienstleistungen etc. in den letzten Jahren schon breiten Einzug in die Praxis gefunden haben, wurde mit der Schaffung digitaler Sedimente für die Modellierung von Grundwasserströmungen Neuland betreten.

29

Abb. 8: Sandkorn- bzw. Sedimentmodelle auf Basis digitaler Sandkornstrukturen (mit freundlicher Genehmigung: TinniT GmbH, Karlsruhe, aus [14])



30

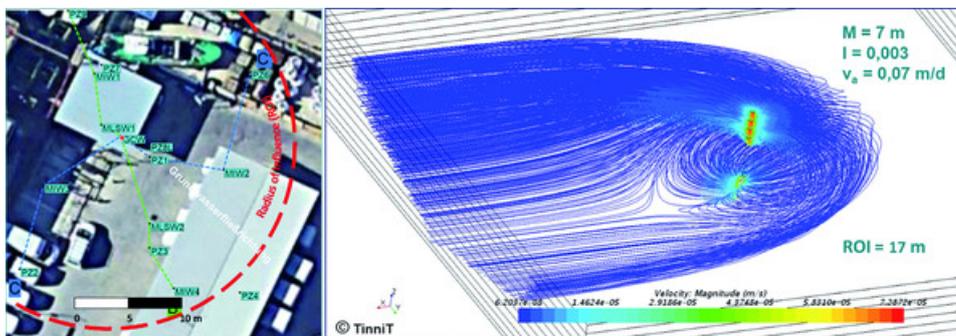
Da sich durch die Digitalisierung der Sedimentpartikel deren Geometrie bzw. Mikrostruktur nun genau definieren ließ, konnte auf der μm -

Skala das dynamische Verhalten von Fluiden dreidimensional untersucht werden, wobei Strömungsrichtungen und -stärken variiert wurden. Anhand der bereits erwähnten Liner-Bohrkerne wurden die so aufgelösten Sandstrukturen einzelnen Profilregionen zugeordnet, um eine Modellierung über eine erweiterte Skalendimension zu ermöglichen. Über differenzierte Zwischenschritte erfolgte dann die Implementierung der Ergebnisse in eine Modellierungssoftware für numerische Strömungsmechanik (engl. Computational Fluid Dynamics, CFD). Das dazu verwendete Programm TinFlow (Entwickler: TinniT GmbH, Karlsruhe) beherrscht verschiedenste Simulationen in porösen Regionen auf der Makroskala.

- 31 Als Basis für die Modellierung der Fließverhältnisse um den IEG-GCW® diente dessen Bohrkern, er ließ sich in 11 Sedimentschichten mit unterschiedlichen Strukturen/Korngrößen kategorisieren. Deren hydraulische Eigenschaften wurden dann unter Einsatz des Strömungslösers Pace3D bestimmt. Die anschließende Makro-Simulation mittels TinFlow ergab einen im Feld zu erwartenden Staupunktabstand des GCW von ca. 17 m (Abb. 9).

32

Abb. 9: Lage des GCW mit den umgebenden MLSW und MIW, ROI und Grundwasserfließrichtung (links) und Visualisierung der Strömungsverhältnisse um den Brunnen (rechts), aus [14].



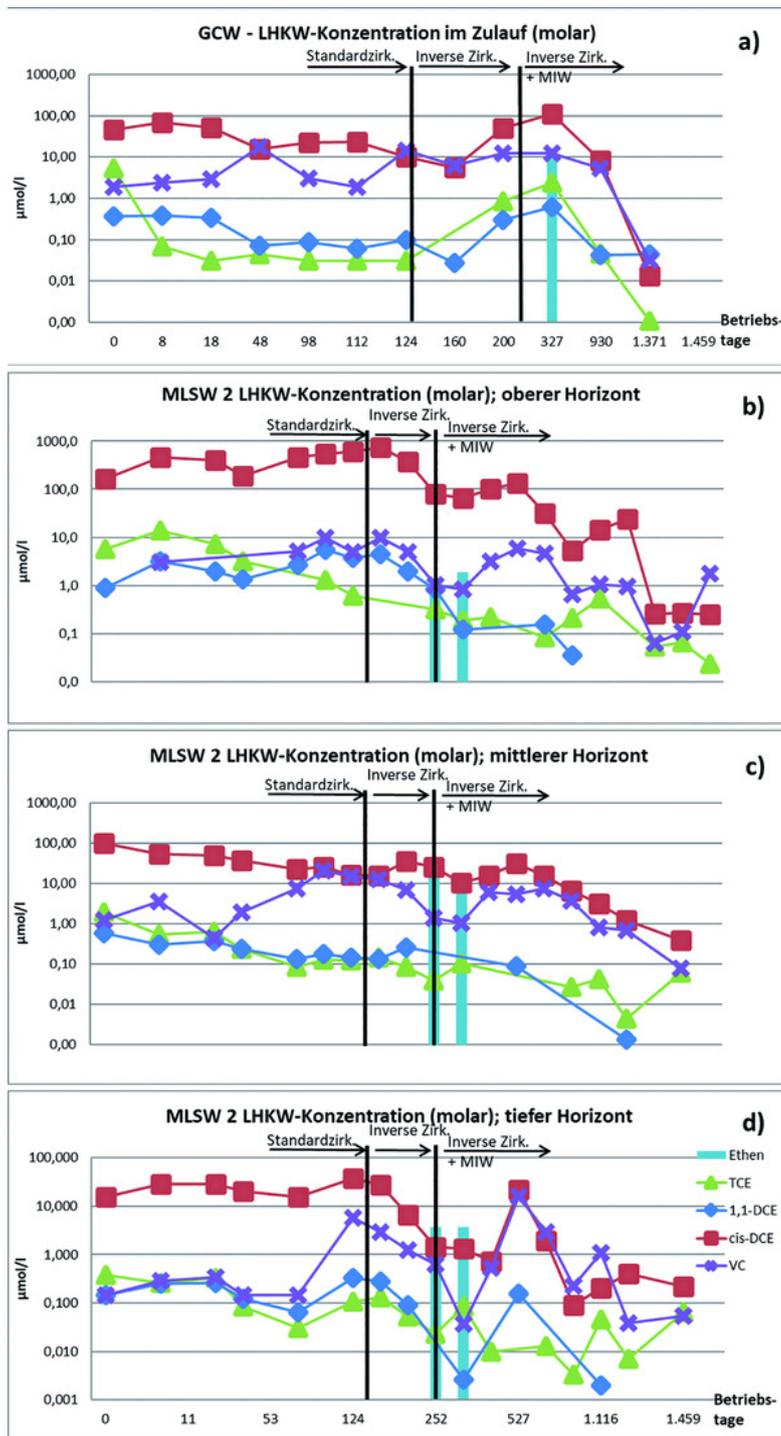
- 33 Bei Inbetriebnahme im Standardmodus (Extraktion über unteren Filter, Infiltration über oberen Filter) ließ sich in dessen Zulauf eine LHKW-Gesamtkonzentration von 54 $\mu\text{mol/l}$ messen (cDCE-Anteil 85 %). Bis zum 140. Betriebstag wurden etwa 400 l Nährstofflösung (IEG-C-Mix, eine Formulierung aus Alkoholen, Zuckern und Proteinen) in die Zirkulationsströmung um den Brunnen eingespeist. Die summarische Schadstoffbelastung sank auf ca. 25 $\mu\text{mol/l}$ ab. Wegen der zwischenzeitlich um etwa den Faktor 10 gestiegenen Gehalte der Abbaukomponente VC, die toxikologisch als sehr kritisch zu bewerten ist, erfolgte dann ab Tag 140 eine Richtungsumkehr der Zirkulation („reverse flow“), um

noch möglicherweise im Strömungsschatten von schlechter durchlässigen Sedimentpartien befindliche Schadstoffe ebenfalls zu mobilisieren bzw. verstärkt mit Nährstoffen in Kontakt zu bringen. Danach war mit einer Verzögerung von etwa 60 Tagen ein Wiederanstieg der LHKW zu verzeichnen, der in einer Maximalbelastung von 129 $\mu\text{mol/l}$ nach 330 Betriebstagen gipfelte. Anschließend ließ sich ein sehr markanter Konzentrationsabfall beobachten (Abb. 10).

34

Abb. 10: Konzentrationsentwicklungen im Zulauf zum GCW (a) und tiefendifferenziert innerhalb des ROI in MLSW 2 (b, c und d; Filtertiefen 3,9–4,9 m, 6,2–7,2 m, 9,3–10,3 m)

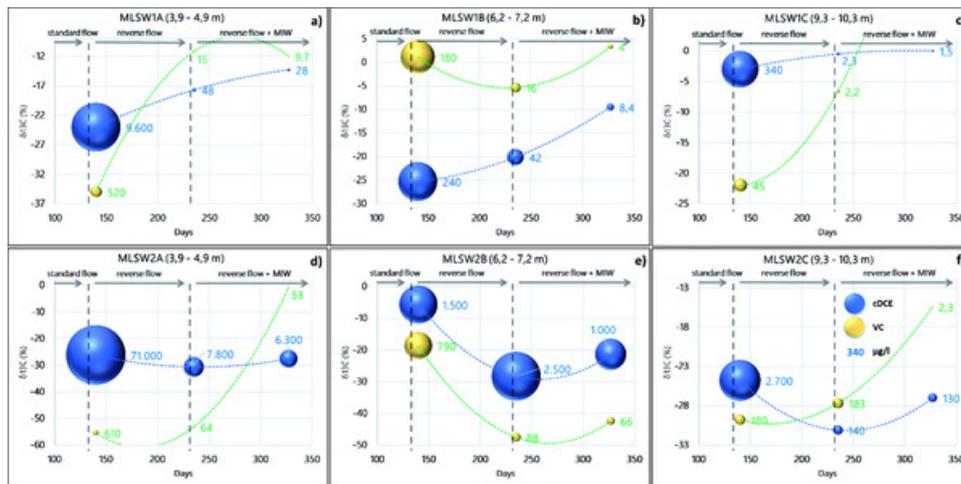
5000 Sanierungsverfahren / 5900 Dekontamination von Grund- und Sickerwasser / 5943 Gut umgerührt – 3-D-Biocirculation zur Sanierung heterogener Grundwasserleiter / 5 Praxisbeispiele / 5.1 Praxisbeispiel 1: IEG-Biocirculation® /



35 Ab dem 250. Tag wurden Nährstoffe auch in die MIW 1, 2, 3 und 4 zugegeben. Die Infiltrationsmenge summierte sich bis zum 1.523. Betriebstag auf insgesamt 10.800 l. Innerhalb des ROI war besonders die Entwicklung in den Horizonten der ca. 8 m im Grundwasserabstrom vom

- IEG-GCW® gelegenen MLSW 2 von Interesse. Dort zeigte sich in allen 3 Horizonten eine starke Verringerung der LHKW-Gehalte bei gleichzeitiger Verschiebung des Spektrums zu VC. Vereinzelt belegten Analysen einen vollständigen Abbaupfad zu nicht chlorierten Komponenten wie Ethen. Für die Bewertung des Verfahrens war es von Bedeutung, auch im weiteren Grundwasserabstrom eine Belastungsreduzierung zu erzielen. Diese konnte anhand der Entwicklung in Messstelle Pz 4 beobachtet werden, die sich außerhalb des ROI in ca. 19 m Entfernung vom IEG-GCW® befindet. Dort nahm die ursprüngliche Belastung von 1.323 µmol/l auf schließlich 1,43 µmol/l ab.
- 36 Weil nicht-destruktive Prozesse wie Verdünnung, Verflüchtigung oder Sorption ebenfalls zu einer Schadstoffkonzentrationsminderung beitragen, wurden im Rahmen des Forschungsprojekts an verschiedenen Stellen innerhalb des ROI zusätzlich die Kohlenstoffisotopenverhältnisse ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ als $\delta^{13}\text{C}$ -Notation) untersucht. Ab einem Anreicherungsfaktor von mehr als 2 ‰ kann von einem eindeutigen Nachweis für den biologischen Abbau ausgegangen werden. Die Abnahme der LHKW-Belastung in den Proben aus MLSW1 und MLSW2 war mit $\delta^{13}\text{C}$ -Anreicherungsfaktoren der Komponenten cDCE und VC von teils über 10 ‰ gekoppelt, ein zweifelsfreier Nachweis mikrobiologischer Minderungsprozesse (Abb. 11).
- 37 Im weiteren zeitlichen Ablauf der Sanierung ergaben sich aus administrativen Gründen einige Unterbrechungen sowohl des GCW-Betriebs, der Nährstoffzugabe als auch des Verfahrensmonitorings. Dennoch konnte das Projekt erfolgreich beendet werden. Die Ergebnisse belegen, dass sich mittels IEG-Biocirculation® eine weniger invasive, preisgünstigere, schnellere und nachhaltigere Sanierung von biologisch abbaubaren Schadstoffbelastungen im Vergleich zu P&T durchführen lässt.
- 38 **Abb. 11: Anreicherung von schweren ^{13}C -Isotopen innerhalb des ROI; sehr deutlich in der Messstelle MLSW 1 (a bis c) und etwas zeitverzögert in MLSW 2 (d bis f). Die Größe der Kugeln entspricht der jeweiligen Konzentrationshöhe.**

5000 Sanierungsverfahren / 5900 Dekontamination von Grund- und Sickerwasser / 5943 Gut umgerührt – 3-D-Biocirculation zur Sanierung heterogener Grundwasserleiter / 5 Praxisbeispiele / 5.1 Praxisbeispiel 1: IEG-Biocirculation® /

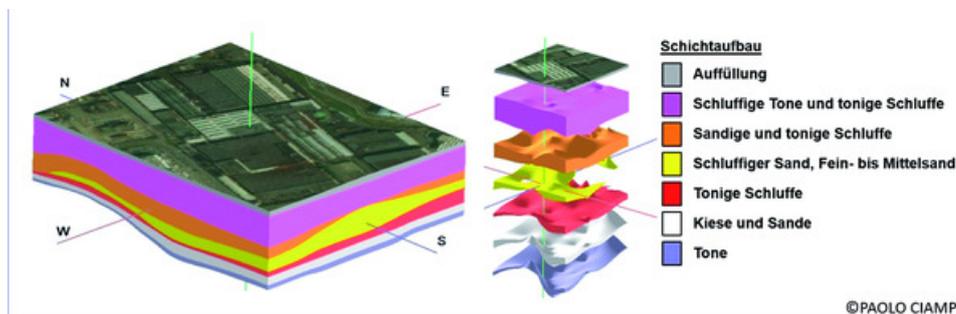


92. Aktualisierung, Mai 2022

5.2 Praxisbeispiel 2: IEG-Biocirculation® mit Reaktor am Standort

- 39 Auf dem Gelände einer Maschinenfabrik in Oberitalien liegt eine bis in ca. 26 m Tiefe reichende Verunreinigung mit LHKW vor. Der Grundwasserleiter weist Belastungen von bis zu 100 mg/l, hohe Fe-Gehalte und differenzierte hydraulische Durchlässigkeiten (k_f) zwischen $1 \cdot 10^{-4}$ bis $5 \cdot 10^{-8}$ m/s auf. Deren Sanierung mittels P&T über 9 Jahre hinweg zeigte zwar Erfolge, war jedoch sehr energieaufwändig und störungsanfällig (Entnahme von ca. 55 m³/h aus 30–50 Brunnen) und wenig effektiv, da in Brunnengalerienähe partiell immer noch bis zu 100 mg/l LHKW messbar waren. Sie resultierten aus einer feinerkörnigen Aquifer-Zwischenschicht, die offensichtlich LHKW in Residualsättigung enthielt und als Rebound-Quelle zu einer nachhaltigen Grundwasserbelastung beitrug. Zur Neugestaltung und Optimierung wurde das IEG-GCW®-Verfahren ausgewählt, das für die Schadenssituation am erfolgversprechendsten erschien. Ziel der Maßnahme sollte es sein, die residualen Schadstoffsenken hydraulisch zu erschließen und sie einer verstärkten reduktiven Dechlorierung zugänglich zu machen (IEG-Biocirculation®). Ferner war die Durchführung darauf optimiert, eine Sanierung ohne Beeinträchtigung des Produktionsbetriebs durchzuführen (staatliches italienisches Förderprogramm MISO „Messa in sicurezza operativa“).
- 40 Im Vorfeld des geplanten GCW-Piloteinsatzes (GCW 1) und des nachfolgenden Upgrades mit zwei weiteren Brunnen wurden bis 2017 insgesamt 87 Bohrungen unter Entnahme von horizontalen Bodenproben niedergebracht. Die 3-D-Darstellung illustriert den komplexen Untergundaufbau. Er besteht aus einer Wechsellagerung von schluffigen Tonen und Sanden unterschiedlicher Mächtigkeiten (Abb. 12). Oberhalb der Aquiferbasis finden sich sandige Kiese. Mittels Programmunterstützung (RockWorks 17) ließen sich die Untergrundstrukturen, Hydrochemie und die Schadstoffverteilungen in einem georeferenzierten 3-D-Format visualisieren und später deren zeitliche Entwicklung beobachten.
- 41 **Abb. 12: Blockbild des Untergrunds (links), 3-D-Auflösung der einzelnen Schichtkomplexe (rechts; verändert nach [16]).**

5000 Sanierungsverfahren / 5900 Dekontamination von Grund- und Sickerwasser / 5943 Gut umgerührt – 3-D-Biocirculation zur Sanierung heterogener Grundwasserleiter / 5 Praxisbeispiele / 5.2 Praxisbeispiel 2: IEG-Biocirculation® mit Reaktor am Standort /

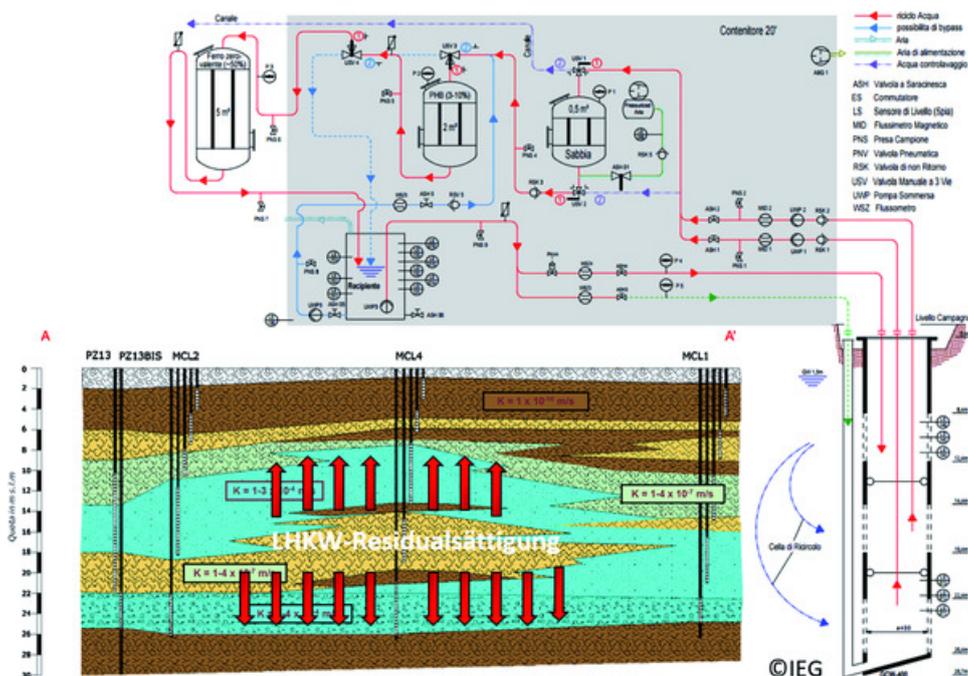


- 42 Aus den Vorarbeiten wurden folgende Sanierungsschritte abgeleitet:
- Durchführung eines Pilotversuches mit umfangreichen Begleitmessungen (Laboranalytik, Grundwasserhydraulik, molekularbiologische Untersuchungen – qPCR, CARD-FISH, NGS)
 - Errichtung zusätzlicher Messstellen
 - bei nachgewiesenem Erfolg des Pilot-Betriebs Installation weiterer IEG-GCW®
- 43 In einem ersten Schritt erfolgte dann die Installation eines IEG-GCW®-Systems mit 3 Filterstrecken bis zu einer Tiefe von 26 m. Dieses erlaubt die Steuerung zweier Zirkulationskreisläufe mit unterschiedlichen Wassermengen und Reichweiten. Eine kleinere innere Zirkulation ermöglicht die Durchströmung der hochkontaminierten feinerkörnigen Zwischenlage (Durchsatz ca. 0,35–0,5 m³/h), eine größere überlagernde umfasst auch die besser durchlässigen Aquiferbereiche (Durchsatz ca. 2,0–2,5 m³/h). Die sanierungsrelevante radiale Reichweite der Zirkulation betrug mindestens 40 m. Zur Beobachtung der Prozesse wurden im Einflussbereich des IEG-GCW® zusätzlich zu den bereits existierenden Mehrfachpeilbrunnen 2 MLSW mit je 5 tiefenorientierten Probenahmehorizonten installiert.
- 44 Die oberirdische Behandlungslinie bestand aus 3 Elementen (Abb. 13):
1. vorgeschalteter Sandfilter; er dient zur Entfernung von Ausfällungen und Schwebstoffen.
 2. PHB (Poly-Hydroxy-Butyrat)-Reaktor; als Stützsubstrat fungiert Sand. Der Reaktor gibt flüchtige Fettsäuren und Wasserstoff in das durchströmende Wasser ab.
 3. nachgelagerter ZVI (nullwertiges Fe)-Reaktor, dem PHB beigemischt ist; in ihm werden die LHKW zu etwa 50 % eliminiert.
- 45 PHB ist ein sich anaerob biologisch langsam abbauendes Polymer, das zu flüchtigen Fettsäuren (Buttersäure, Essigsäure) und molekularem

Wasserstoff zerfällt. Es besitzt zur Anregung von reduktiven Dechlorierungsprozessen im Gegensatz zu anderen Elektronendonatoren einen genau definierten Abbaupfad. Wird ZVI mit PHB gemischt, so erhöht sich durch die Herabsetzung des pH die Reaktionsfähigkeit des ZVI und somit seine Langzeitwirkung. Das durch die oberirdische Behandlungseinheit strömende Wasser transportiert die Abbauprodukte des PHB (bis 500 mg/l), Wasserstoff und reduzierte Eisenverbindungen in den Porenraum der Sedimente zurück.

46

Abb. 13: Verfahrensanordnung zur Behandlung des kontaminierten Wassers vor Reinfiltration in den Aquifer mit Detaildarstellung der geologischen Strukturen im Umfeld des Pilot-GCW.

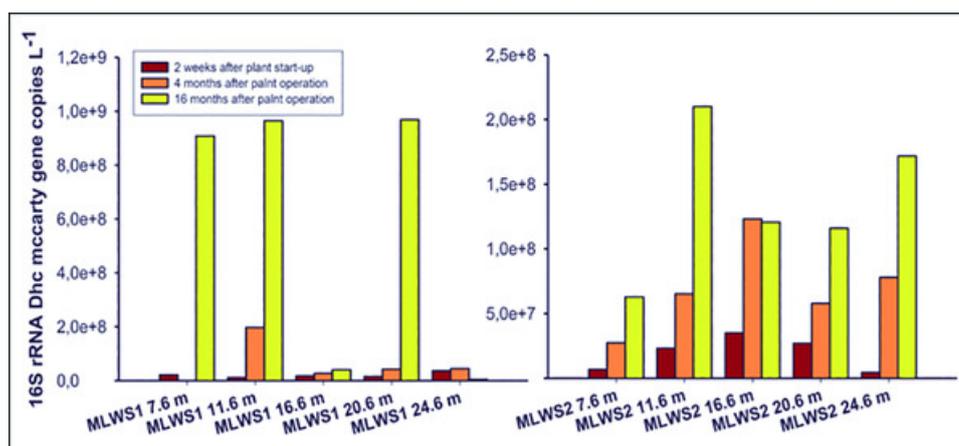


47

Während der Passage durch die oberirdische Reaktorkette fand eine ca. 50 %-ige Eliminierung der LHKW statt. Die infiltrierten Abbauprodukte stimulierten reduktive Dechlorierungsprozesse in der Zirkulation und führten zu einer beständigen Entwicklung von Ethen. Dessen zweifelsfreie biologische Genese ließ sich durch mikrobiologische Untersuchungen über das dominante Auftreten der spezifischen Dehalococcoides-Gene *tceA*, *vcrA* und *bvcA* verifizieren. Dabei waren im Tiefenprofil unterschiedliche Genkopienzahlen zu beobachten, sie spiegeln die Heterogenität der Untergrundstruktur und der Schadstoffverteilung wider (Abb. 14).

48

Abb. 14: Entwicklung der Genkopien-Zahlen von Dehalococcoides in MLWS 1 (links) und MLWS 2 (rechts); nach 16 Monaten Anlagenbetrieb zeigten sich deutliche Unterschiede in den einzelnen Tiefenabschnitten



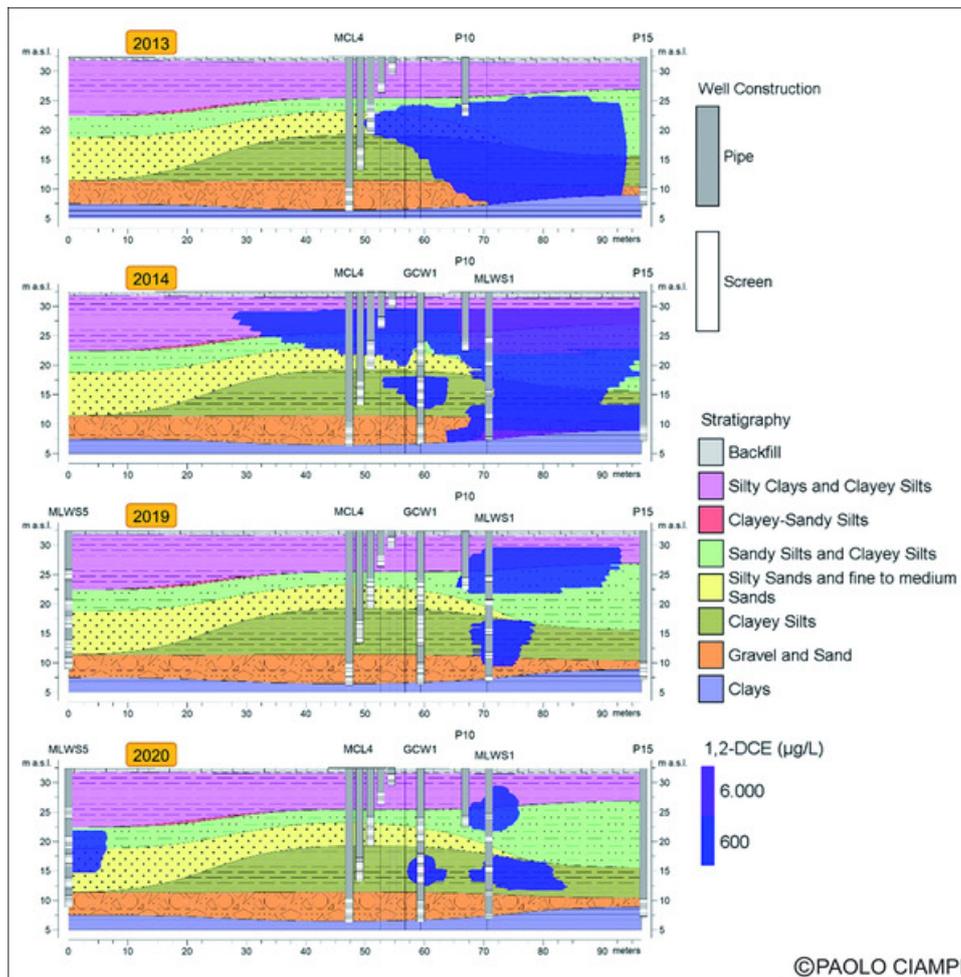
49

Im Sommer 2019 wurden wegen des von der lokalen Umweltbehörde in Modena in Zusammenarbeit mit dem regionalen Umweltamt als erfolgreich bewerteten Pilotversuchs zwei weitere GCW im Umfeld des Pilot-GCW errichtet. Seither war sowohl ein starker Rückgang des cDCE als auch von VC zu beobachten (Abb. 15). Die in 2020 in MLSW5 am linken Profilrand zu erkennende Belastung ist im Zusammenhang mit der Reduzierung der teils noch in Betrieb befindlichen Abpumpmaßnahme zu sehen. Deren Einflussbereich interagiert mit der Ausbildung der Grundwasserzirkulation um die Brunnen. Weil nach den Erkenntnissen aus dem Pilotversuch das kontaminierte Grundwasser aus dem Einflussbereich der IEG-GCW® jedoch mit abbaufördernden Substanzen angereichert wird und die LHKW auf der weiteren Untergrundpassage einem reaktiven Transport unterliegen, war die teilweise Abschaltung der Entnahmebrunnen vertretbar.

50

Abb. 15: Entwicklung der Grundwasserbelastung am Beispiel des cDCE im Umfeld des Pilot-GCW im zeitlichen Ablauf; 2013: vor Beginn des Versuchs, 2014: wenige Monate nach Inbetriebnahme, 2019: nach Installation von weiteren zwei GCW im Umfeld, 2020: aktuelle Restbelastung (verändert nach [17]).

5000 Sanierungsverfahren / 5900 Dekontamination von Grund- und Sickerwasser / 5943 Gut umgerührt – 3-D-Biocirculation zur Sanierung heterogener Grundwasserleiter / 5 Praxisbeispiele / 5.2 Praxisbeispiel 2: IEG-Biocirculation® mit Reaktor am Standort /



51 Anhand der durchgeführten Messungen ließ sich die Sanierungswirksamkeit des GCW-Systems auch in bislang hydraulisch kaum zugänglichen Schadstoffsenken nachweisen. Der im vorliegenden Fall direkt mögliche Vergleich mit einer langjährig betriebenen Abpumpmaßnahme bestätigte die prinzipielle Ungeeignetheit von P&T auf Standorten mit derartigen heterogenen Untergrundbedingungen.

5000 Sanierungsverfahren / 5900 Dekontamination von Grund- und Sickerwasser / 5943 Gut umgerührt – 3-D-Biocirculation zur Sanierung heterogener Grundwasserleiter / 6 Kostenbetrachtung und Fazit /

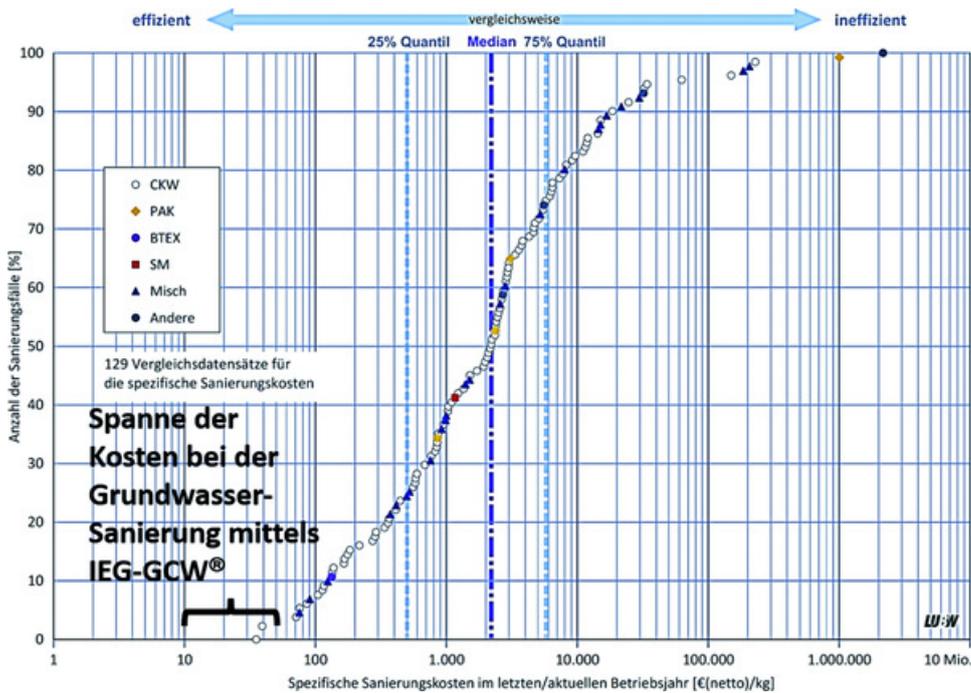
92. Aktualisierung, Mai 2022

6 Kostenbetrachtung und Fazit

52 Nach all den beschriebenen Eigenheiten und Vorteilen der Grundwasserzirkulation stellt sich die Frage nach den spezifischen Sanierungskosten im Vergleich zu anderen Verfahren. Belastbare Daten finden sich in [18], dort werden anhand von 129 Datensätzen die Kosten pro kg Schadstoff dargestellt, die im Rahmen von Abpumpmaßnahmen aus dem Grundwasser entfernt wurden. Bei 50 % der Grundwassersanierungen liegen die Kosten zwischen 500 und 5.800 €/kg (25 %- bzw. 75 %-Quantil). Der Median der Verteilung liegt bei rund 2.200 €/kg (Abb. 16). Weitere Auswertungen von [18] zeigen auf, dass der Anteil der Energiekosten an der dargestellten Gesamtkostenentwicklung im Median etwa 10 % beträgt. Es handelt sich um Nettosummen (Stand 2020).

53

Abb. 16: Verteilung der spezifischen Sanierungskosten im letzten/aktuellen Betriebsjahr in €/kg der ausgewerteten Sanierungsfälle (verändert nach [18])



54 Anhand von zahlreichen im In- und Ausland bislang abgewickelten Projekten mit der IEG-GCW®-Technologie lässt sich eine Kostenspanne zwischen 10 und 50 €/kg Schadstoff angeben (LHKW, leichtflüchtige Aromaten). Es handelte sich dabei sowohl um Standorte, bei denen

das zirkulierende Wasser chemisch-physikalisch gereinigt (Strippung, Aktivkohle etc.) aber auch mikrobiologisch (IEG-Biocirculation®) bearbeitet wurde. Die im Vergleich zu P&T erheblich geringeren Kosten liegen zum einen darin begründet, dass schadstoffspeichernde feinkörnige Sedimentstrukturen hydraulisch effizienter adressiert werden können (siehe Abb. 3 und 5) und zum anderen entstehen in Kombination mit speziell designten Chemikalien/Partikeln Synergieeffekte, die eine Sanierung beschleunigen und so entsprechend verbilligen.

- 55 P&T tritt aufgrund der Erfahrungen der letzten Jahrzehnte als Allheilmittel der Grundwassersanierung langsam in den Hintergrund, während in-situ-Technologien auf biologischer und physikalisch-chemischer Basis zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die üblichen Injektionstechniken zur Einbringung von Chemikalien/Partikeln kommen bei ausgedehnten Schadensflächen und zunehmender Kontaminationstiefe allerdings rasch an ihre Grenzen, dann werden in solchen Fällen nach wie vor Arrangements von konventionellen Entnahme- und Infiltrationsbrunnen eingesetzt. Bei deren Betrieb entstehen jedoch vorwiegend horizontale Wasserbewegungen im Aquifer und sind prinzipiell nicht in der Lage, die typischen, mehr oder weniger horizontal gelagerten, als Schadstoffsinken wirkenden Sedimentlagen in heterogenen Grundwasserleitern hydraulisch adäquat zu adressieren (siehe Abb. 1). Warum trotz der Kenntnislage solche Brunnen bis heute breite Anwendung finden, erschließt sich daher nicht ohne Weiteres. Möglicherweise spielt wie so oft auch in anderen Bereichen ein sogenannter „confirmation bias“ (Bestätigungsfehler) eine große Rolle: Es wird an einem in vielen Lehrbüchern und Leitfäden als Standard beschriebenen Brunnenausbau festgehalten und zur Beurteilung seiner Sanierungswirksamkeit dienen vorzugsweise nur die Fälle, die einen zufriedenstellenden Verlauf zeigten. Die Unzulänglichkeit des klassischen Brunnenbetriebs bei zahlreichen anderen Projekten („langlaufende Maßnahmen“) wird entweder mehr oder weniger ausgeblendet oder häufig auf andere Ursachen geschoben (fehlerhafte Brunnenauslegung, falsche Platzierung, unzureichender Reagenzieneinsatz etc.). Und so gerät aus dem Fokus, dass beim Einsatz konventioneller Brunnen zur Sanierung heterogener Grundwasserleiter ein grundlegendes strömungsdynamisches Problem auftritt und zu lösen ist.
- 56 Warum diese Fragestellung bislang in Ausbildung und Lehre wenig belichtet wurde, mag vielleicht daran liegen, dass die Wurzeln der klassischen Grundwasserhydraulik letztlich auf die Trink- und Brauchwassergewinnung zurückgehen. Und dort gelten andere Prioritäten, es sind nachhaltig Wasserqualitäten und -mengen zu gewährleisten. Die Ermittlung hydraulischer und sedimentologischer

Parameter, Brunnenkonstruktionen und deren Einflussbereiche spielen eine tragende Rolle. Angewendet auf Grundwassersanierungen lässt sich die hydraulische Erfassung einer abströmenden Fahne oder einer Quellzone über Brunnenplatzierungen und entnommene Wassermengen ingenieurtechnisch zutreffend berechnen und festlegen. Und damit haben Behörden und Sachverständige den einschlägigen wasser- und umweltrechtlichen Anforderungen Rechnung getragen und lassen es in der Regel dabei bewenden. Eine Grundwassersanierungsmaßnahme ist jedoch weit mehr: nicht nur Wasserhaltung, sondern auch effektive Adressierung von in den einzelnen Sedimentstrukturen fixierten oder gelösten Schadstoffen. Um dies zu erreichen, bedarf es neben Wissenschaften wie Mikro- und Makrohydraulik in porösen Räumen oder Fluidodynamik auch chemischer, biologischer und verfahrenstechnischer Kenntnisse. Nur in interdisziplinärem Wechselspiel können solche Fragestellungen daher bearbeitet werden. Sanierungsdienstleister, die sich im Wettbewerb behaupten müssen, sind da oftmals schon weiter als die Ausbildungsstätten, die zudem häufig dazu neigen, nur die reine Fachdisziplin zu vermitteln anstatt auch in den Nachbarwissenschaften nach Anregungen oder Lösungsmöglichkeiten zu suchen. Hier wäre also noch viel zu tun.

- 57 Mit der IEG-GCW®-Technologie liegt auf jeden Fall eine über viele Jahre hinweg praxiserprobte und wissenschaftlich umfassend evaluierte Anwendung zur Sanierung komplexer Grundwasserleiter vor, die adaptiv auf verschiedenste Herausforderungen reagieren kann. Über ihre beschriebenen Vorteile hinaus wirkt sie vor allem ressourcenschonend, da sie energiearm arbeitet und kein Grundwasser entnimmt. Dies ist ein wichtiger zukunftsweisender Aspekt für die Bewältigung klimatischer Herausforderungen. Dennoch existiert auch hier noch Optimierungs- und Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Dimensionierung und Arbeitsweise der in-situ-Systeme. So gibt es keine einfach handhabbaren Werkzeuge zur Berechnung der Auswirkung des Saugpotentials in den Filterstrecken auf die hydraulische Reichweite und welchen Einfluss das Saugpotential z. B. auf Schadstoffaggregationen besitzt, die in Porenengstellen gefangen sind. Weitere offene Fragen sind z. B.: Welche Konsequenzen haben oszillierende oder pulsierende Kreislaufströmungen für die Mobilisierung chemisch unterschiedlicher Schadstoffe? Wie lassen sich elektromikrobiologische Verfahrensanordnungen und Prozesse in die Systemtechnik integrieren? Und last, but not least birgt die IEG-GCW®-Technologie ungeahnte Chancen im Bereich der Wärmespeicherung und -gewinnung im Untergrund (ATES: Aquifer thermal energy storage), auch in Kombination mit thermisch unterstützter Grundwasserzirkulation zur Schadstoffmobilisierung bzw. zum -abbau. All dies ist Stoff genug

5000 Sanierungsverfahren / 5900 Dekontamination von Grund- und Sickerwasser / 5943 Gut umgerührt – 3-D-Biocirculation zur Sanierung heterogener Grundwasserleiter / 6 Kostenbetrachtung und Fazit /

für eine Vielzahl von künftigen wissenschaftlichen Forschungsarbeiten zu einer effizienten, energiesparenden und umweltverträglichen Sanierungstechnologie.

92. Aktualisierung, Mai 2022

7 Literatur

- [1] UNESCO World Water Assessment Programme WWAP (2022): Weltwasserbericht der Vereinten Nationen 2022 – GRUNDWASSER Unsichtbares sichtbar machen. https://www.unesco.de/sites/default/files/2022-03/Weltwasserbericht_2022_Deutsche_Kurzfassung.PDF
- [2] Brooks M. C.; Yarney E., Huang J. (2021): Strategies for managing risk due to back diffusion. In: *Groundwater Monitoring and Remediation* 41(1): 76–98. doi: 10.1111/gwmr.12423
- [3] Mackay D. M., Cherry J. A. (1989): Groundwater contamination: Pump-and-treat remediation. In: *Environ. Sci. Technol.* 23, No. 6, 630–636.
- [4] Keely J. F. (1989): Performance evaluations of Pump-and-treat remediations. EPA Ground Water Issue, EPA/540/4-89/005.
- [5] Doty C. B., Travis C. C. (1991): The effectiveness of groundwater pumping as a restoration technology. Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-11866.
- [6] Cohen R. M., Vincent A. H., Mercer J. W. (1994): Methods for monitoring Pump-and-treat systems. EPA Ground Water Issue, EPA/600/R-94/123.
- [7] AFCEE (Air Force Center for Environmental Excellence) (2007): AFCEE Source Zone Initiative, prepared by Sale, T. C., Illangasekare, T. H., Zimbron, J., Rodriguez, D., Wilking, B., Marinelli, F. for the AFCEE, Brooks City-Base, San Antonio, TX, USA.
- [8] Tatti F., Petrangeli Papini, M., Sappa, G., Raboni, M., Arjmand, F., Viotti, P. (2018): Contaminant back-diffusion from low-permeability layers as affected by groundwater velocity: A laboratory investigation by box model and image analysis. In: *Science of the Total Environment* 622–623, 164–171. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.347
- [9] Tatti F., Petrangeli Papini, M., Torretta, V., Mancini, G., Bonia, M. R., Viotti, P. (2019): Experimental and numerical evaluation of Groundwater Circulation Wells as a remediation technology for persistent, low permeability contaminant source zones. In: *Journal of Contaminant Hydrology* 222, 89–100. doi: 10.1016/j.jconhyd.2019.03.001
- [10] Ren X. W., Santamarina J. C. (2018): The hydraulic conductivity of sediments: A pore size perspective. In: *Engineering Geology* 233, 48–54. doi: 10.1016/j.enggeo.2017.11.022
- [11] Stamm J. (1997): Numerische Berechnung dreidimensionaler Strömungsvorgänge um Grundwasser-Zirkulations-Brunnen zur In situ

- Grundwassersanierung. In: Fortschritt Berichte VDI, Reihe 15: Umwelttechnik Nr. 169, ISBN 3 18 316915 0.
- [12] Rehner G., Alesi E. J. (2016): Grundwasser-Zirkulations-Brunnen (IEG-GCW®): Verteilung von Reagenzien im Untergrund. In: altlasten spektrum 3/2016, 92–98. doi: 10.37307/j.1864–8371.2016.03.04
- [13] Matturro B., Pierro L., Frascadore E., Petrangeli Papini, M., Rossetti, S. (2018): Microbial community changes in a chlorinated solvents polluted aquifer over the field scale treatment with poly-3-hydroxybutyrate as amendment. In: Front. Microbiol. 9:1664. doi: 10.3389/fmicb.2018.01664
- [14] Rehner G., Alesi E. J. (2022): Vermeidung von Rebound-Effekten und Konsequenzen für hydraulische Sanierungen – Fallbeispiel mit IEG-Biocirculation. In: altlasten spektrum 2/2022, 33–40. doi: 10.37307/j.1864–8371.2022.02.03
- [15] Ciampi P., Esposito E., Bartsch E., Alesi E. J., Rehner G., Petrangeli Papini M. (2022): Remediation of chlorinated aliphatic hydrocarbons (CAHs) contaminated site coupling groundwater recirculation well (IEG-GCW®) with a peripheral injection of soluble nutrient supplement (IEG-C-MIX) via multilevel-injection wells (IEG-MIW). Zur Veröffentlichung eingereicht bei Heliyon.
- [16] Ciampi P., Esposito C., Petrangeli Papini, M. (2019): Hydrogeochemical Model Supporting the Remediation Strategy of a Highly Contaminated Industrial Site. In: Water 2019, 11, 1371. doi: 10.3390/w11071371
- [17] Ciampi P., Esposito C., Bartsch E., Alesi E. J., Petrangeli Papini, M. (2021): 3D dynamic model empowering the knowledge of the decontamination mechanisms and controlling the complex remediation strategy of a contaminated industrial site. In: Science of the Total Environment 793: 148649. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148649
- [18] Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg LUBW (2020): Handlungshilfe Altlasten und Grundwasserschadensfälle 44 – Ermittlung fachtechnischer Grundlagen zur Vorbereitung der Verhältnismäßigkeitsprüfung von langlaufenden Pump-and-Treat-Maßnahmen – Fortschreibung 2020, Karlsruhe. ISBN 978–3–88251–405–6