Technologien zur Formierung durchlässiger Reinigungswände in Grundwasserleitern durch Injektion reaktiver Gase

F. I. Engelmann, H. Ehbrecht, C. Roscher und R. Giese

1 Einführung

Durch Direktinjektion reaktiver Gasgemische in Grundwasserleiter können permeable Reinigungswände als mehrstufige Durchflußreinigungsreaktoren, bestehend aus einer Gaswand und reaktiven, aeroben und anaeroben Abstrombereichen formiert werden. Infolge des speziellen Verhaltens der Gase bei der Injektion, den Transport-, Einspeicherungs- und Verteilungsprozessen in der porösen Feststoffmatrix, der Einlösungskinetik ins Grundwasser und ihrem Verbrauch für chemische und mikrobielle Stoffumwandlungs- und Abbauprozesse kommt der Technologieauswahl zur Formierung der In-situ-Durchflußreaktoren eine besondere Bedeutung zu.

Im Zusammenhang mit der durch das BMBF geförderten Entwicklung des Verfahrens BIOXWAND der Berliner Wasserbetriebe zur Formierung permeabler In-situ-Reinigungswände wurden unterschiedliche Technologien, wie Bohr- und Sondierungsverfahren zur Errichtung von Grundwasseraufschlüssen für Gasinjektionen und Probennahmemessstellen, auf ihre Verwendungsmöglichkeit in Feldtests untersucht und auf den Ergebnissen aufbauend neue Techniken entwickelt, die nach erfolgreichem Abschluß der Testversuche zur In-situ-Reinigung eines kontaminierten NH_4-Fe(II)-Grundwasserstromes in einer geeigneten, kostengünstigen BIOXWAND-Technologie zusammengefasst wurden. Die BIOXWAND-Technologie ist gerichtet auf eine detaillierte Vorerkundung der Aquiferheterogenität insbesondere in der Gaswand, einen gezielten teufenorientierten Eintrag von Gasgemischen in definierte Horizonte ohne präferentiellen vertikalen Gasaufstieg im unmittelbaren Umfeld der Eintragselemente, die Gaseintragssteuerung, die Überwachung gasförmiger O_2-Volumina im Aquifer und ein hochauflösendes Monitoring der Grundwasserbeschaffenheit, wobei darauf orientiert wurde, daß möglichst viele Aufgaben mit der gleichen Technik realisierbar sind.

Die BIOXWAND-Technologie besteht zunächst aus einer *Gaseintragssteuerungskomponente* zur volumenstromgesteuerten Gasinjektion mit einer Überwachung der Gas-Injektionsdrücke an den Gaslanzenköpfen. Das System ist wenig störanfällig und sichert die Kontrolle der Injektionsgas-Massenbilanz. Eine örtlich-zeitlich steuer- und bilanzierbare Gasdosierung ist als O_2-Direktgasinjektion wie auch über ein spezielles bedarfsorientiertes reaktives Mischgassystem möglich. Die Kontrolle des Gas-Injektionsdruckes reflektiert den vom Gasstrom abhängigen, effektiven Strömungswiderstand des Injektionsfilters und des angrenzenden Untergrundes. Durch die Aufnahme von P-Q-Leistungskurven erfolgt eine Kontrolle der Funktionstüchtigkeit und

Langzeitstabilität der Lanzen. Direct-Push-Technologie wird zur *Vorerkundungen der Untergrundheterogenität* für gas-/hydrogeologische Schematisierungen eingesetzt, wobei Bestimmungen der Sedimentlagerungsdichte, BAT®-Permeametermessungen und Dissipationstests für in-situ k_f-Wertermittlungen, Porenwasserdruckmessungen und GG-NN-Profilierungen in casings im Mittelpunkt stehen. Genutzt wird die Direct-Push-Technologie auch zur Installation von Elementen für den *Gaseintrag*, das *Gasmonitoring* und das *Monitoring zur Grundwasserbeschaffenheit* (Grundwasserprobennahme als Pumpproben oder Entnahme massenerhaltender Headspaceproben sowie Installation und Überwachung von in-situ Messsensoren, Entnahme von Feststofflinerproben auch teilweise in-situ gefrostet.

2 Gaseintragstechnologien

Bei Grundwassersanierungen durch In-situ-Strippen werden seit mehreren Jahrzehnten vorrangig relativ großkalibrige Gaslanzen eingesetzt, um den physikalischen Austrag leichtflüchtiger Schadstoffe bei Volumenströmen von mehreren Deka-Nm^3_{Luft}/h zu realisieren. Für die Formierung von In-Situ-Reinigungswänden sind jedoch nur kleinkalibrige Gasinjektionslanzen mit Volumenströmen von 0,1-1,0 Nm^3/h erforderlich, um die reaktiven Gase unter Vermeidung von Strippeffekten möglichst großräumig im Aquifer zu verteilen und zu speichern. Präferentielle vertikale Gasaufstiege entlang der Injektionselemente sind zu minimieren. Kleinkalibrige Lanzen können mit Bohr- oder Sondierungsverfahren errichtet werden.

2.1 Bohrungsinjektionslanzen

Trocken- und Spülbohrverfahren haben den Nachteil, daß Feststoffmaterial aus dem Untergrund ausgetragen wird. Um vertikale Gasaustritte zu verhindern, muß der Ringraum nach Installation der Lanzen wieder verschlossen werden. Während in Kluftgrundwasserleitern Packer in den Ringraum gesetzt werden können, muß er in Porengrundwasserleitern durch Dichtmaterialien verschlossen werden. Trotzdem kann es zu einem präferentiellen vertikalen Gasaufstieg und geringen Wirkradien kommen. Eine mögliche Ursache ist in bohrprozeßbedingten Auflockerungen im Bohrlochumfeld (1-2 m) zu sehen. Die heterogenen, natürlichen Lagerungsverhältnisse mit teilweise dicht gelagerten Aquifermaterialien können infolge von Kornumlagerungen soweit homogenisiert werden, daß nach Erreichen der Bohrungsendteufe im gesamten Profil eine Auflockerungszone mit lockeren bis mittleren Lagerungsdichten entsteht (Abb. 2.1). Auflockerungszonen lassen sich durch Spülbohrungen mit kleinkalibrigen Bohrwerkzeugen minimieren. Darüber hinaus ist es möglich, durch gezielte Verpressung pumpfähiger Dichtmassen vertikale Gasaufstiegsbarrieren in gewünschten Horizonten zu erzeugen. Aus den Verpreßrohrleitungen heraus können geohydraulische und geophysikalische Bohrlochtests durchgeführt werden. Über die frei wählbare Größe des Bohrlochdurchmessers lassen sich Lanzenbündel oder zusätzliche Überwachungselemente im Bohrloch installieren.

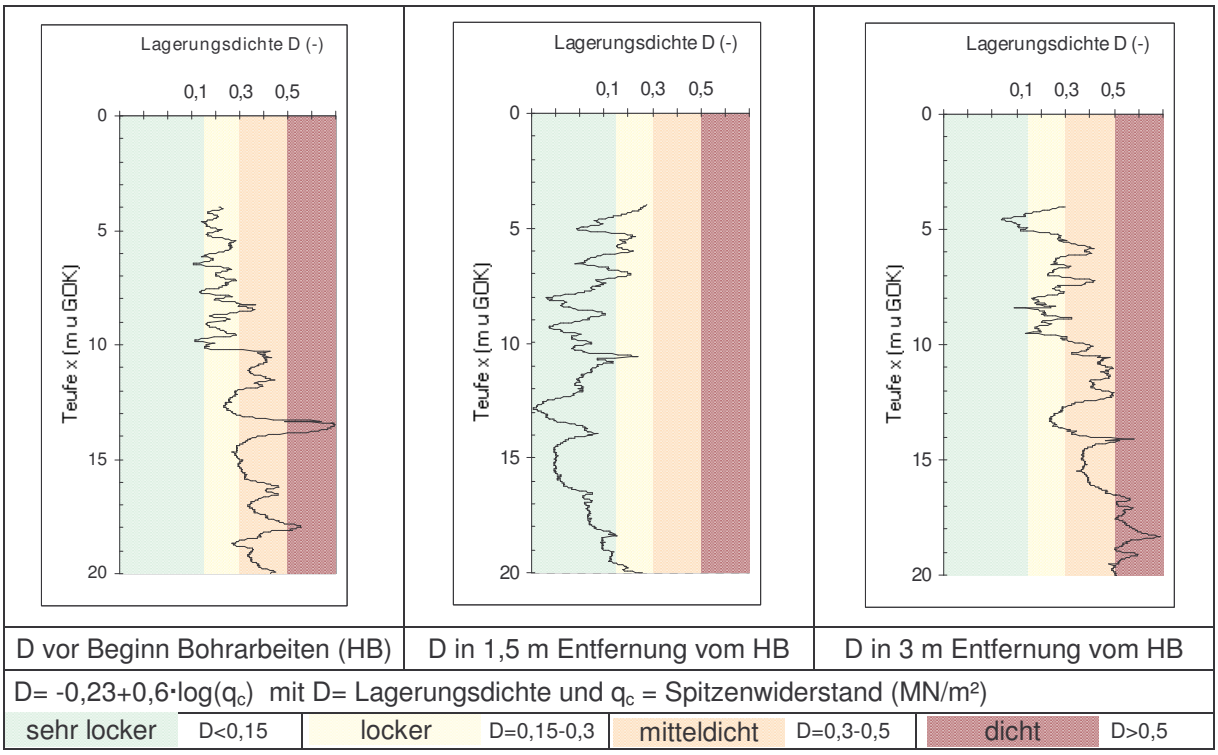


Abb. 2.1 Auflockerungszone bis in 1,5 m Entfernung vom Bohrpunkt

Für das Verfahren BIOXWAND wurden unter den geologischen Lagerungsverhältnissen des Berliner Urstromtales in Zusammenarbeit mit der Firma BLZ GEOtechnik GmbH Bohrungsinjektionslanzen (BIL) und entsprechende Einbautechnologien entwickelt (Abb. 2.2).

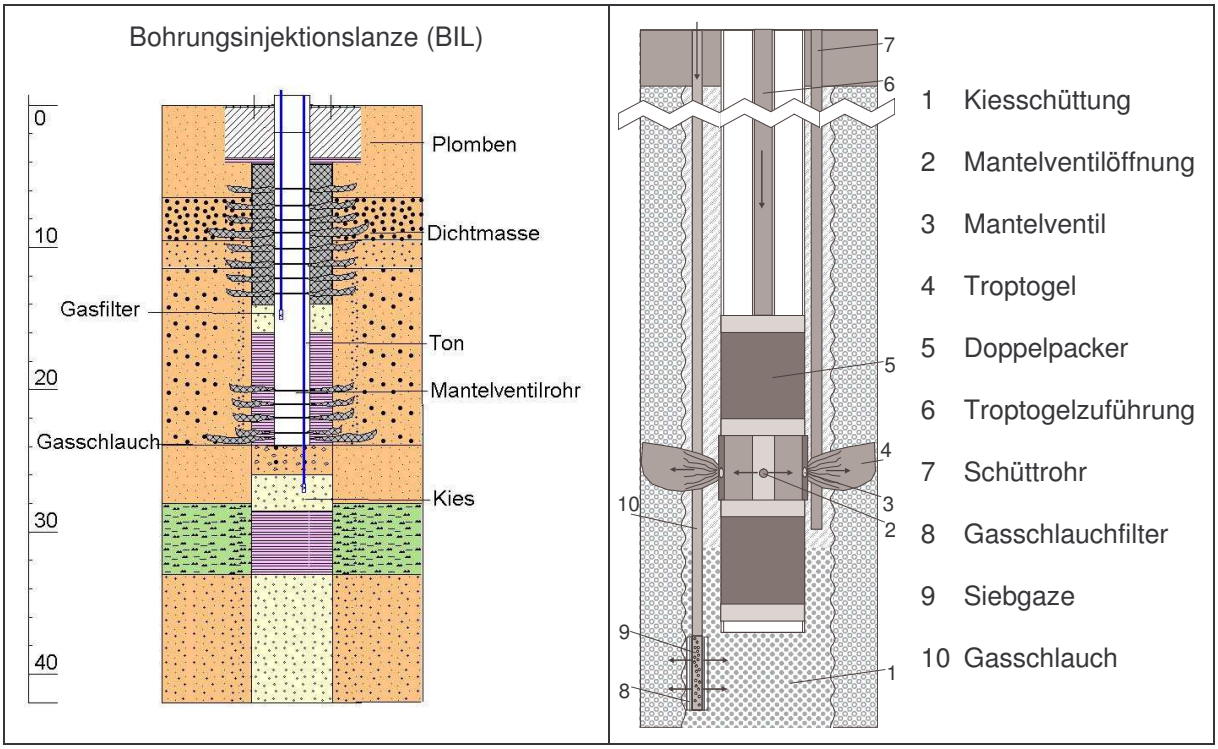


Abb. 2.2 Bohrungsinjektionslanzen (Schlauchlanzen mit Torkretierung)

Die BIL's werden in Lanzen mit Packerbegasung und Direktbegasung über kleinkalibrige Schläuche unterschieden. Für *Packerlanzen* wurden herkömmliche Messstellenmaterialien verwendet (Filterelement: PVC-U, DN 50, Schlitzweite 0,3 mm, Länge 0,1-0,3 m; Aufsatzrohre: PVC-U, DN 50, Länge 1,0 m). In die Aufsatzrohre waren zusätzlich Manschetteninjektionsrohre (PVC-U, DN 50, Länge jeweils 1,0 m) mit Ventilabständen von 0,5 m integriert. Neben der Verpressung von Dichtmassen (Troptogel, Bentonit) über einen Manschettenrohrpacker zur Lanzentorkretierung konnte nachfolgend mit einem adaptierten Grundwasserpacker die Begasung von den Filterhorizonten aus geführt werden. *Schlauchlanzen* stellen eine einfache und kostengünstige Alternative zu Packerlanzen dar. Zur Injektion kleiner Gasmengen sind druckfeste Polyamid- oder PE-Schläuche (Außendurchmesser: 4-6 mm, Innendurchmesser: 2-4 mm) geeignet. Sie wurden am unteren Ende auf einer Länge von 10 cm perforiert und mit Siebgaze ($\leq$ 63 µm) ummantelt (Abb. 2.2).

2.2 Sondierungsinjektionslanzen (SIL)

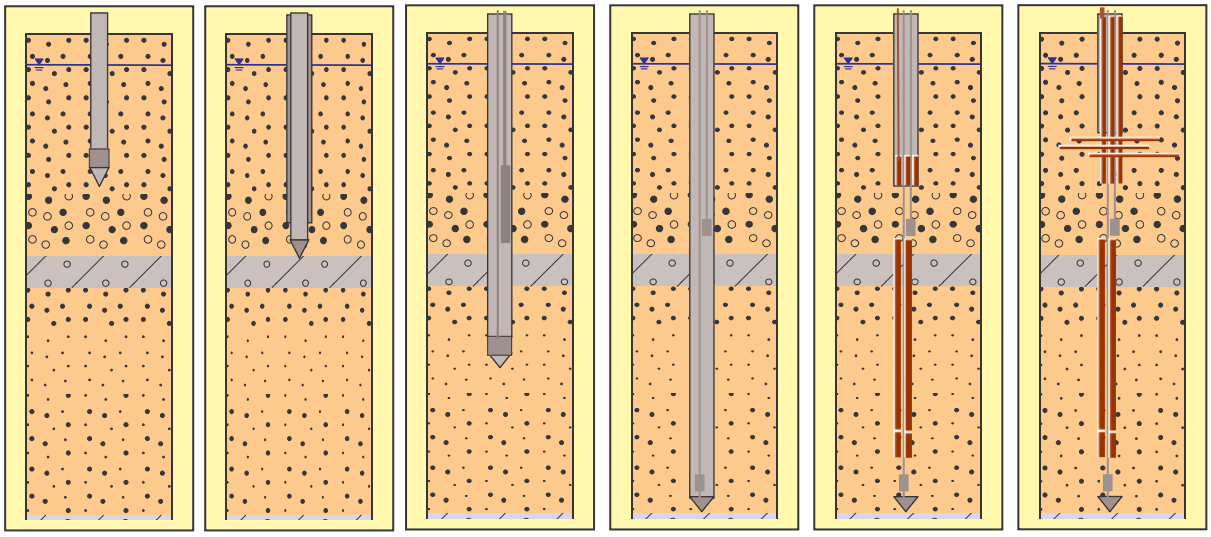
Sondierungen gehören zur Gruppe der DIREKT-PUSH-TECHNOLOGIE (DPT), welche Ramm- und Drucksondierungen umfasst. DPT wird seit Jahrzehnten für Baugrunduntersuchungen, vorrangig für Lockergesteine eingesetzt. Kombinationen geotechnischer Sonden mit hydraulischen, physikalisch-chemischen, geophysikalischen und bohrlochgeophysikalischen Meßverfahren führten in den letzten zwei Jahrzehnten durch umweltrelevante Fragestellungen zu DPT-Weiterentwicklungen. Spezielle Systeme zur Probennahme ermöglichen durch Anwendung verschiedener Sondenspitzen eine teufendifferenzierte Entnahme von Bodenluft-, Sickerwasser-, Grundwasser- und Feststoffproben auch teilweise in-situ gefrostet. Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Drucksondierungstechnologie (DST) werden basierend auf dem FUGRO-DST-System u.a. durch EHLE & NEUHAUS (1998), ENGELMANN & VOIGT (1998) und DIETRICH ET.AL. (2000) beschrieben. Eine DPT-Übersicht, basierend auf einer Bohranlage der Fa. GEOPROBE, gibt BRACKE (2001). Eingesetzt wird die Direkt-Push-Technologie auch zur Verpressung und Abdichtung von Sondierungslöchern sowie zur Injektion von Suspensionen und Gasen. Sowohl die statische Drucksondierungstechnologie als auch das dynamische Rammverfahren müssen zum Einsatz für größere Tiefen speziell angepasst werden.

2.2.1 Einbautechnologie für Sondierungsinjektionslanzen (SIL)

Für das Verfahren BIOXWAND wurden Drucksondierungsinjektionslanzen (DIL) und Rammsondierungsinjektionslanzen (RIL) entwickelt. Im Sondierprozeß wird zum Einbringen des Werkzeuges in den Untergrund das Aquifermaterial durch die Sondenspitze zur Seite gedrängt. Hierdurch findet im Gegensatz zu den Auflockerungsprozessen bei Bohrverfahren eine Selbstabdichtung des Sondiergestänges statt. Bei entsprechender Gestaltung des Sondenkopfes kann das Gestänge gleich als SIL Verwendung finden (temporäre Lanzen). Durch Verwendung verlorener Spitzen wer-

den stationäre Gasinjektionslanzen gestaltet, wobei auf eine ausreichende Torkretierung der Lanze mit der porösen Aquiferfeststoffmatrix zu achten ist. SIL's ermöglichen wie BIL's ebenfalls geohydraulische und geophysikalische Sondierlochtests sowie Probennahmen. Abb. 2.3 zeigt die DIL-Einbautechnologie BIOXWAND, welche große Einbauteufen, bei gleichzeitiger Erkundung des Untergrundes und hinreichender Abdichtung einer Mehrfachlanze gegen das anstehende Gebirge realisiert.

Bei Drucksondierungen wird die Sondenspitze mit konstanter Geschwindigkeit von 2 cm/s in den Boden gedrückt. Die max. Druckkraft von 200 kN (ca. 20 t) wird hydraulisch vom Sondierungsfahrzeug über das Stahlgestänge auf die Sonde übertragen. Rammsondierungen mit einer hydraulisch angetriebenen Raupenbohranlage realisierte die FA. DR. KOERNER GEOMONITORING GMBH. Die max. Druckkraft betrug nahezu 100 kN. Da sie nicht für Teufen > 10 m ausreichte, wurde ein hochfrequenter dynamischer Percussionshammer zugeschaltet.



a) b) c) d) e) f)

a) Aufnahme von Spitzendruck/Mantelreibung/Porenwasserdruck zur lithologischen Ansprache, Messung elektrische Leitfähigkeit, Gehalte organischer Stoffe zur Schadstoffkartierung, Ausbildung eines Führungskanals für die nachfolgende Errichtung der Gasinjektionslanze

b) In-situ-Bestimmung von k_f-Werten, Durchörten schlecht drückbarer Horizonte, Einsatz von Führungscasings oder Vorbohren mittels kleinkalibriger Vollschnecke zur Kanalbildung

c) Durchführung geophysikalischer Messungen im Casing und BAT-Probennahme

d) Setzen von Schlauchlanzen über eine verlorene Spitze

e) Ausbau der Sondierung (Schütten von Feinsand als Gaslanzenfilter bzw. Rückziehen des Sondiergestänges/-Casings zum Selbstabdichten der Lanze im Filterbereich; Verfüllung des Ringraumes durch Dichtmasse (Troptogel/Bentonit) bei gleichzeitigem Ziehen des Sondiergestänges/-Casings.

f) Verpressen von Dichtmasse zur Schaffung vertikaler Gasaufstiegsbarrieren bzw. zur Reduzierung der Durchlässigkeit und Erhöhung der Gasaufenthaltszeit, bzw. - -speicherung

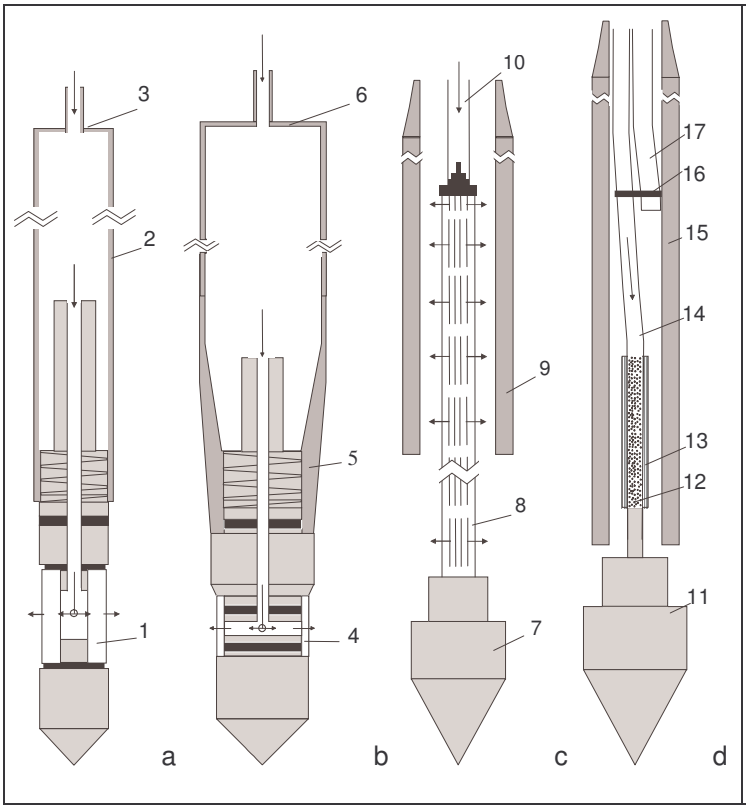
Abb. 2.3 DIL-Einbautechnologie BIOXWAND

Die Sondierungstiefe wird durch den sich an der Sondenspitze aufbauenden Spitzendruck und die Mantelreibung entlang des Sondiergestänges begrenzt. Um hohe Verpreßdrücke ausüben zu können, ist das dünnwandige Drucksondierungsmaterial speziell gehärtet und wenig biegsam. Rammsondierungsmaterial zeichnet sich durch eine geringere Härte aus und ist mit der notwendigen Elastizität für den dynamischen Sondierungsprozess wesentlich dickwandiger. Allerdings ist dadurch die Technikinstallation begrenzt.

Durch Drucksondierungstechnologie wurden Schlauchlanzen bis 50 m Tiefe gesetzt, wobei bis an die physikalische Leistungsgrenze getestet wurde. Infolge stark verfestigter Schichten im Aquifer wurden Teufen > 30 m oft nur unterstützend durch voreilende, kleinkalibrige Vollschneckenbohrungen und Führungscasings erreicht. Mit der Rammsondierungstechnologie konnten Schlauchlanzen bei Auslastung der Leistungsgrenze bis 27 m Tiefe errichtet werden.

2.2.2 DIL-Typen

Grundlegende Unterschiede können in der Konstruktion von Drucksondierungsinjektionslanzen (DIL) abgeleitet werden. Bei der DIL(BAT-MKII) und der DIL(BAT-EP) verbleiben das Sondiergestänge bzw. das Stützcasing mit der Filterspitze *temporär* zur Gasinjektion im Untergrund (Abb. 2.4).



1 BAT-MKII-Filter (D=30mm)
2 Druckgestänge (D=36_a/16_imm)
3 Gasinjektionsadapter
4 BAT-Enviroprobe-Filter (D=40mm)
5 Casing (D=56_a/38_imm)
6 Gasinjektionsadapter
7 verlorene Spitze (D=43mm)
8 PVC-Filter (D=17_amm)
9 Reibungsminderer/Druckstück
10 Druckfester Gasschlauch
11 Verlorene Spitze (D=43-56mm)
12 PE-Gasfilter (D=4/2mm)
13 Gazewicklung, 62 µm
14 PE-Gasschlauch (D=4/2mm)
15 Druckstück (D=43-56mm)
16 Befestigung Bentonitschlauch
17 Bentonitdruckschlauch

Abb. 2.4 temporäre (a: DIL(BAT-MKII), b: DIL(BAT-EP)) und stationäre (c-d: DIL(DV-GS)) Gasinjektionslanzentypen

Der Gaseintrag erfolgt über ca. 4 cm lange Drucksondierungsfilter, die üblicherweise zur Grundwasserprobennahme (BAT®- oder GeoN) genutzt werden. Die Andockmembran für das BAT®-Shuttle wird entfernt. Als Filtermaterial sind sowohl gesinterte Metallfilter als auch Sinterpolyethylen mit einer Porenweite von 20 µm geeignet. Die Lanzenkonstruktionen ermöglichen temporäre Injektionen, erfordern aber eine gute Abdichtung zwischen den Gestängestangen oder Casing. Die Gaszufuhr zum Filter kann ersatzweise auch über einen Gasschlauch erfolgen, der im Schutze des Gestänges / Casings an die Andockstelle für das BAT®-Shuttle geführt wird. Als *stationäre* Gaslanze eignet sich der Typ DIL(DV-GS) (DV - Dichtmassenverpressung; GS – Gasschlauch). Sie besteht aus einfachem, druckfesten Schlauchmaterial, 5-10 cm langen Filtern (Teilperforierung des Gasschlauches und Gazewicklung) sowie einer verlorenen Spitze. Der Einbau erfolgt über das Sondiergestänge / Casing, die nach Setzen der Lanze zurückgezogen werden.

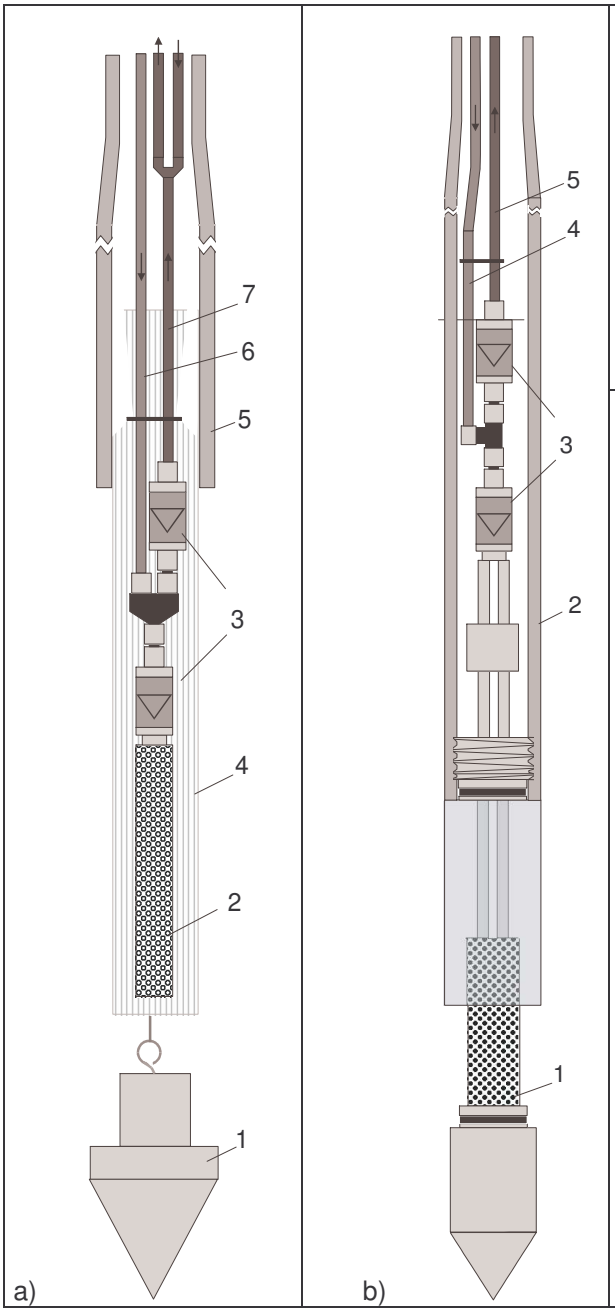
3 Gasmonitoringtechnologie

Sowohl im Technikummaßstab an homogenen Mehrphasensystemen (Feststoff-Wasser-Gas), als auch in BIL-, temporären DIL-Gaslanzen und BAT®-Meßstellen können lokale Gassättigungen mit kalibrierten, geophysikalischen Loggingverfahren (GG-NN) nachgewiesen werden. Weiterhin sind Qualitätskontrollen der Ausbaubedingungen von BIL-Lanzen zum Nachweis vertikaler Kurzschlussströmungen von Gas im Ringraum, sowie das Auffinden lokaler Gaskissen möglich. Zur Quantifizierung von O_2-Ausgasungsverlusten aus dem Aquifer können Bodenluftfilter in der Aerationszone installiert und mit aktiver Probenahmetechnik (Bodenluftprobenahmesystem mit on-line Sensorik für O_2, CO_2 und Deponiegase) diskontinuierlich beprobt werden.

4 Grundwasserüberwachungstechnologie

Das Monitoring zur Grundwasserbeschaffenheit in Gaswänden ist auch über Grundwasseraufschlüsse realisierbar, die mit DPT errichtet werden. Sie erzeugen wie bei Bohrverfahren keine vertikalen Gasschlote durch Auflockerungen im Meßstellenprofil. Zunächst können *Injektionslanzen* in das Grundwassermonitoring einbezogen werden. Die Grundwasserentnahme erfolgt mittels Schlauchpumpe und kleindimensionierten on-site Durchflußmeßzellen. Sie haben den Vorteil, daß bei den geringen Schlauchdurchmessern nur kleine Klarpumpmengen anfallen. Zur Gewinnung teufenintervallgemittelter Grundwasserproben eignen sich *1“ GWBR* mit längeren Filterstrecken, die ebenfalls mittels Drucksondierungstechnologie und einer verlorenen Spitze in Casings gesetzt werden. Sie haben keine Hinterfüllung (Kiesschüttung / Tonsperren) und können beispielsweise mit einer Schlauchpumpe oder direkt über das Vollrohr als Steigleitung beprobt werden. Zur An- und Abstromüberwachung von Gaswänden eignen sich auch herkömmliche stärker raumintegrierende *klassische Mehrfachfiltermeßstellen*, die im Bohrverfahren errichtet werden.

Miniatur-Doppelventil-Verdrängungspumpen (MDP) lassen sich mit Drucksondierungstechnologie und einer verlorenen Spitze im Aquifer installieren. Die Probennahme erfolgt im Anschluß an die Filterentwicklung und das Klarpumpen mit Druckluft (ggf. Inertgas), wobei nur geringe Wassermengen zu fördern sind. Bedarfsweise kann der MDP-Filter mit einer separaten Leitung zur Filterregenerierung und Steigerung der Förderleistung beim Klarpumpen gekoppelt werden. MDP-Messstellen lassen sich stationär und temporär errichten. Abb. 2.5 zeigt eine temporäre Ausführungsvariante als Kombination eines modifizierten BAT®-Enviroprobe-Filters mit einer MDP zur kontaminationsgeschützten Beprobung definierter Aquiferbereiche.



a) stationäre MDP-Meßstellen bestehend aus verlorener Spitze + Minidruckpumpe

1 verlorene Spitze
2 Drahtkorb-Filter
3 Kugelventile
4 Feinfiltergewebe
5 Reibungsminderer + Druckstück
6 Druckluftschlauch
7 Förderschlauch

b) temporäre modifizierte BAT-Enviroprobe Filter Meßstelle + Minidruckpumpe

1 modifizierter BAT-Enviroprobe Filter
2 Reibungsminderer + Druckstück mit Gewinde
3 Kugelventile
4 Druckluftschlauch
5 Förderschlauch

Abb. 2.5 stationäre und temporäre MDP-Messstellen

Komplexbeprobungen von Gelöstgasen (N_2, O_2, CO_2, N_2O) sind über *BAT®-Messstellen* möglich. Das BAT®-Filtercasing, temporär oder stationär errichtet, wird dabei mit Shuttle-Technik angefahren (Abb. 2.6). Zur Probennahme und Parameterbestimmung ist ein weiterentwickeltes massenerhaltendes-Verfahren (Blindwertminimierung O_2/N_2, Probendruckerfassung zum Analysezeitpunkt, vollständige Stoff- und Fluidphasenbilanzierung) anzuwenden. Möglich ist auch die Kombination einer BAT-MKII-Filterspitze mit einer Miniatur-Doppelventil-Verdrängungspumpe.

BAT®-Messstellen bieten desweiteren zur Bestimmung von Vorortparametern die Möglichkeit In-situ-Meßverfahren, wie beispielsweise *meßstellenintegrierte Durchflußmeßzellen* (MIDZ) (z.B. mit O_2-Elektroden) unter drucknahen Bedingungen einzusetzen (Abb. 2.7).

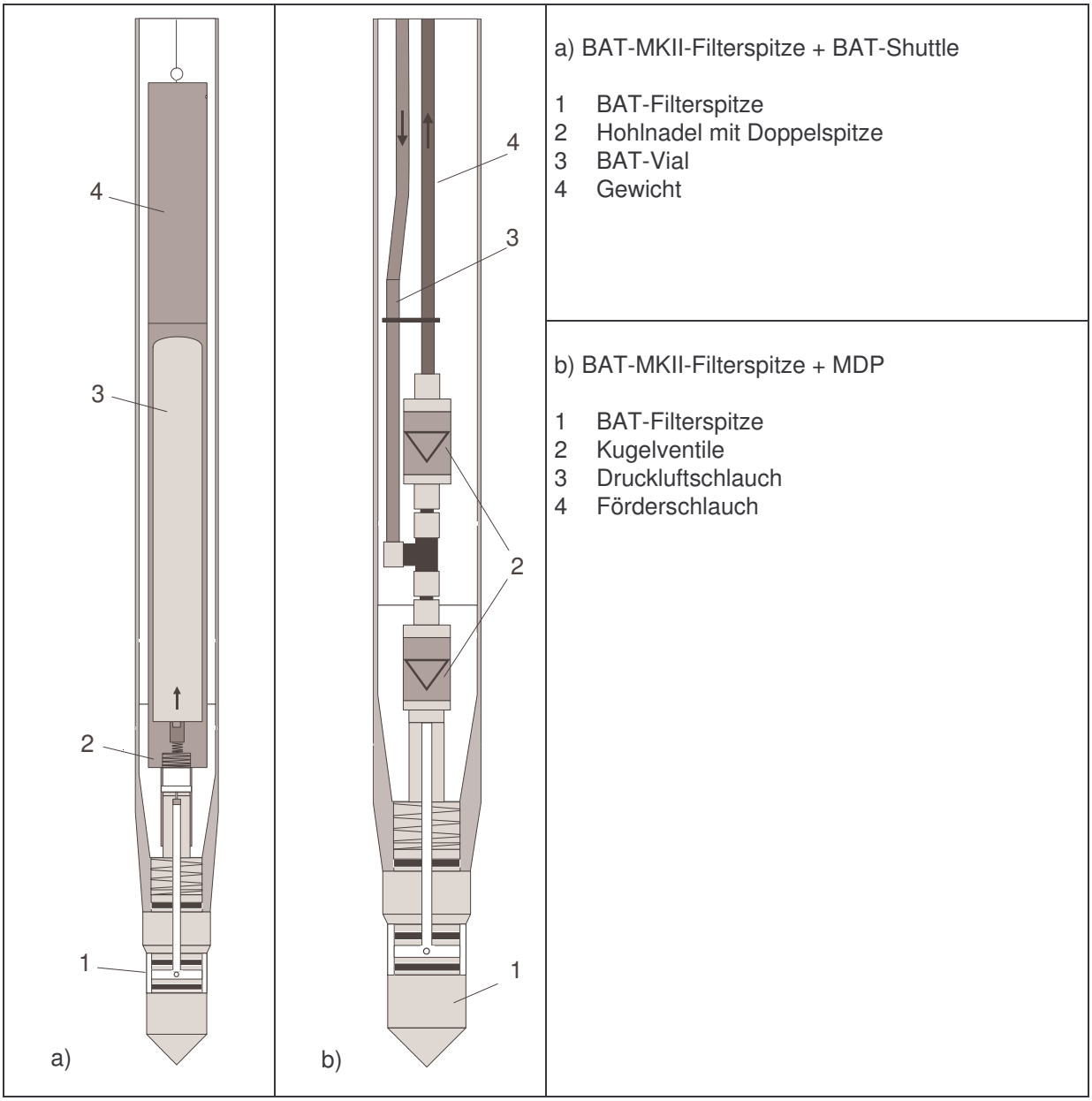


Abb. 2.6 stationäre / temporäre BAT®-Messstellen und MDP-Kombination

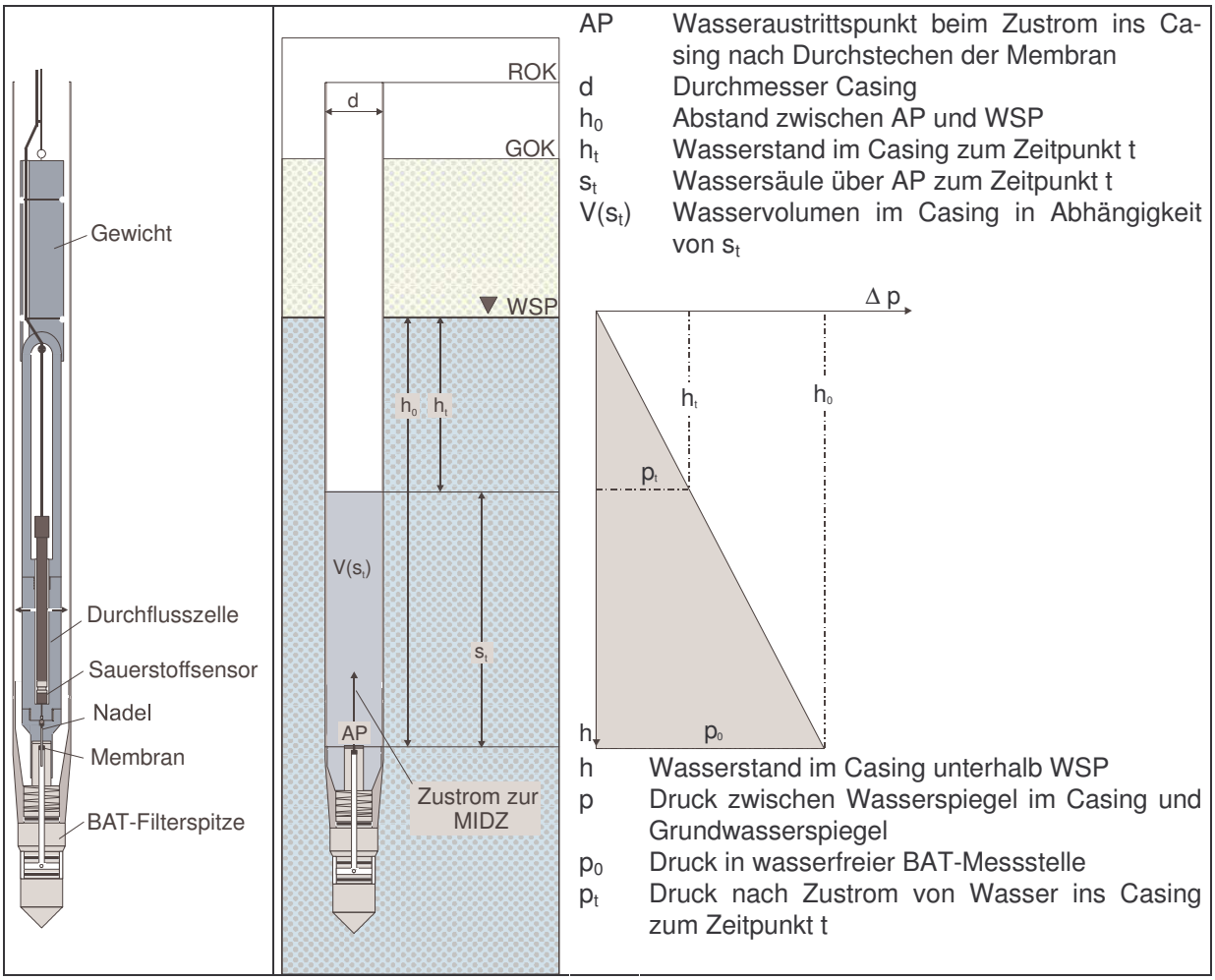


Abb. 2.7 BAT®-Messstelle mit MIDZ nach DOOGS (2003)

Danksagung

Das BMBF förderte den Berliner Wasserbetrieben mit ihren FuE-Partnern, FUGRO GmbH Berlin und GFI GmbH Dresden in der Zeit von 01.01.2001 bis 30.06.2003 das FuE-Vorhaben „Entwicklung und Erprobung einer Bio-Oxidations-Reinigungswand im Abstrom eines anoxischen Grundwasserleiters – BIOXWAND“, FKZ:02WT0091. Die Autoren danken für die hierdurch geschaffenen Möglichkeiten.

7 Literatur

BRACKE, R. (2001): Direct-Push-Technologien, Über den Einsatz von DP-Verfahren für umwelt- und geotechnische Fragestellungen. ECOS umwelttechnische und wissenschaftliche Publikationen. Der Einsatz von Direct-Push-Technologie im Rahmen flexibler und beschleunigter Altlastenerkundungen. Aachen

DIETRICH, H.G.; BUTZ, M.; FRITZ, L.; GOEBBELS, J.; NEUHAUS, M. (2000): Schadensfall Parchim. Drucksondierungen und Computertomographie – integrale Methoden zur Erkundung Mineralölkohlenwasserstoff-kontaminierter Lockersedimente. Z. angew. Geol., 46, 2, S. 84-90.

EHLE, N.; NEUHAUS, M. (1998): Standortuntersuchung mit Drucksondentechnik und Membrane Interface Probe. Ein Fallbeispiel. TerraTech 5. S. 36-39.

ENGELMANN, F.I.; VOIGT, H.J. (1998): Einfluß des Bohrverfahrens und des Meßstellenausbaus auf die Probengewinnung. In: Voigt, H.J.; Wippermann, T. [Hrsg]: Geochemie – Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 6: S. 107-135, Berlin Heidelberg (Springer).

Anschrift der Autoren

Dr. rer. nat. F.I. Engelmann, C. Roscher
FUGRO Consult GmbH Berlin
Wolfener Straße 36 V, 12681 Berlin
Tel.: (030) 93651304, Fax.: (030) 93651300

Dipl.-Ing. H. Ehbrecht
Berliner Wasserbetriebe
Postfach 021098, 10122 Berlin
Tel.: (030) 86445034, Fax.: (030) 864420535034

Dr.-Ing. R. Giese
GFI Grundwasserforschungsinstitut GmbH Dresden
Meraner Str. 10, 01217 Dresden
Tel.: (0351) 4050662, Fax.: (0351) 4050669