

Bilderverzeichnis

Bild 1.1:	Brunnen als Lebensmittelpunkt – Beispiel aus dem Ovamboland in Nord-namibia (Foto: Treskatis).....	2
Bild 1.2:	Zeitliche Entwicklung der aktuell am Deutschen Patentamt registrierten Patenterteilungen für die Themenbereiche Brunnenbetrieb, Brunnenalterung, Brunnenreinigung, Brunnenregenerierung und Brunnensanierung seit 1951 (Recherche im Februar 2012 unter www.depatis.dpma.de).	5
Bild 1.3:	Ursachen der Brunnenalterung bei Wasserversorgungsbrunnen. Nach einer Umfrage des DVGW 1998. Aus Niehues (1999).....	9
Bild 1.4:	Häufigkeit der Alterungstypen an Brunnen der Wasserversorgungswirtschaft in Deutschland. Nach einer Umfrage des DVGW 1998. Aus Niehues (1999).	10
Bild 1.5:	Mineralogische Zusammensetzung von Inkrustationen aus Brunnen. ...	10
Bild 1.6:	Bau- und Funktionsteile eines Bohrbrunnens, die von Alterungserscheinungen betroffen sein können.	11
Bild 1.7:	Angaben von Versorgungsunternehmen zur Notwendigkeit von Regenerierungen. Nach Zahlen von Orlikowski et al. (2010).	16
Bild 1.9:	Verockerte Laufräder einer Brunnenpumpe nach ca. sechs Monaten Betriebszeit in einem Brunnen mit starker Verockerungsneigung (Foto: Gaag, AU-Consult, Augsburg).....	17
Bild 1.8:	Vorkommen von Alterungserscheinungen in Funktion des Brunnenalters. Nach Zahlen von Orlikowski et al. (2010).	17
Bild 1.10:	Manganinkrustierung in einem Brunnen kurz nach der Inbetriebnahme (Foto: Fa. Ochs, Nürnberg).....	18
Bild 1.11:	Häufige Alterungserscheinungen und Methoden der Brunnenzustandserfassung. Nach Zahlen von Orlikowski et al. (2010).	18
Bild 2.1:	Schematische Darstellung eines (a) von Hand gegrabenen und (b) eines ausgebauten Schachtbrunnens (Bild: BGR).	28
Bild 2.2:	Herstellungsprinzip eines Schachtbrunnens mit Betonringen als Verbau.	29
Bild 2.3:	Beispiel eines Schachtbrunnens ohne Verbau (Foto: Treskatis).....	30
Bild 2.4:	Blick in einen mit Betonringen ausgebauten Schachtbrunnen mit Pumpensitz (Foto: Treskatis).	30
Bild 2.5:	Grundtypen des Vertikalfilterbrunnens (Bild: BGR).....	31
Bild 2.6:	Elemente eines Vertikalfilterbrunnens (VFB): 1 = Filterrohr, 2 = Filterkiespackung im Ringraum; 3 = Widerstandsfilter im Filterkies, 4 = Gegenfilter, 5 = Ringraumdichtung, 6 = Verfüllung mit Bohrgut, 7 = Brunnenabschlussbauwerk, 8 = Brunnenkopf, 9 = Produktleitung zum Wasserwerk, 10 = Belüftungsrohr, 11 = Grundwasserspiegel des Hangendstockwerks (nicht genutzt), 12 = Grundwasserspiegel des genutzten Grundwasserleiters, 13 = Elektrische Unterverteilung für Pumpe, 14 = Zementierung des Brunnenkopfrohrs, 15 = Hangendaquifer, 16 = Grundwasserstauer, 17 = genutzter Grundwasserleiter (Lieghendaquifer), 18 = Bodendeckschichten, 19 = Schachtabdeckung (Einstiegs- und Montageöffnung im Abschlussbauwerk), 20 = Anschüttung aus Bodenmaterial, 21 = Steigleitung mit	

	Pumpe, 22 = Vollrohrtour; 23 = Sumpfrohr, 24 = Bohrlochwand, 25 = Bohrdurchmesser, 26 = Brunnenrohrdurchmesser, 27 = Pumpenkabel (Leistungs- und Steuerkabel), 28 = Rückflussverhinderer, 29 = Wassermengenzähler, 30 = Schutzkappe des Widerstandsfilters (Bild: BGR).	32
Bild 2.7:	Schematische Darstellung eines Horizontalfilterbrunnens (HFB), (a) „nasser Schacht“, (b) „trockener Schacht“ (Bild: BGR).	33
Bild 2.8:	Schematische Darstellung eines verlaufsgesteuert hergestellten Horizontalbrunnens (VHB) mit (oben) und ohne (unten) Pumpenschacht (Bild: BGR).	34
Bild 2.9:	Schematische Darstellung eines Absenkungstrichters um einen Brunnen (rot) in der Aufsicht: (a) radialsymmetrisch, ohne natürliches Grundwassergefälle, (b) mit natürlichem Grundwassergefälle.	35
Bild 2.10:	Schnitt durch einen Absenkungstrichter eines Vertikalfilterbrunnens im ungespannten Grundwasserleiter mit Reduktion der Anströmfläche näher zum Filter (Bild: BGR).	36
Bild 2.11:	(a) Reynolds-Zahl und (b) Grundwasserfließgeschwindigkeit als Funktion der Entfernung vom Brunnen bei radialsymmetrischer Anströmung (Abkürzungen und Formelzeichen siehe Gleichung [2.3]).	40
Bild 2.12:	Druckverluste am Vertikalfilterbrunnen. Der Gesamtdruckverlust s_w setzt sich aus verschiedenen Einzeldruckverlusten an den Grenzflächen im Brunnen zusammen (Abkürzungen: s_a = grundwasserleiterbedingte Absenkung; s_a' = Absenkung durch Eintrittsverluste an der Bohrlochwand; s_{k2} = Druckverlust in der äußeren Kiesschüttung; s_{k2}' = Druckverlust zwischen der inneren und äußeren Kiesschüttung; s_{k1} = Druckverlust in der inneren Kiesschüttung; s_{k1}' = Druckverlust am Übergang Filterkies zum Filterrohr; s_w = Gesamtabenkung; r_i = Innenradius Brunnenrohr; r_a = Bohrradius; r_{krit} = kritischer Radius mit Übergang zur turbulenten Strömung; d_1 = Mächtigkeit innere Kiesschüttung; d_2 = Mächtigkeit äußere Kiesschüttung; L_F = Länge Filterstrecke) (Bild: BGR).	43
Bild 2.13:	Prozentualer Anteil des Grundwasserleiters (Δh_{AM}), der Skin-Schicht bzw. der Bohrlochwand (Δh_{Skin}), des Filterkieses (Δh_{FK}) und des Filterrohres (Δh_{FR}) am Gesamtdruckverlust am Brunnen für verschiedene Ausbaudurchmesser (Klauder & Treskatis 2011).	44
Bild 2.14:	Druckverluste bei der Durchströmung einer Verengung, z. B. eines Filterschlitzes: (0) Zustrom mit Geschwindigkeit V_0 , (1) Kontraktion (vena contracta) an Verengung, (3) Expansion und Turbulenz am Ausgang, (4) Abstrom mit Geschwindigkeit V_4	44
Bild 2.15:	Zuflussverteilung (rot) über den Filter eines (a) bis zur Sohle des Grundwasserleiters und eines (b) nur teilweise verfilterten Brunnens (neu gezeichnet nach Nahrgang 1954).	45
Bild 2.16:	Aus einem numerischen Strömungsmodell abgeleitete Reynolds-Zahlen im Nahfeld eines Brunnens mit 30 m Filterlänge und einer Förderrate von 100 m ³ /h im gespannten Grundwasserleiter (verändert nach Houben & Hauschild 2011).	46
Bild 2.17:	Vertikale Verteilung der berechneten Zuflüsse über die Filterstrecke eines bis zur Sohle des Grundwasserleiters verfilterten Brunnens im gespannten	

	Grundwasserleiter. Numerische Modellierung mithilfe des Programms PM-WIN (verändert nach Houben 2006).	47
Bild 2.18:	Horizontales Strömungsfeld (Ausschnitt) um einen Brunnen im gespannten Grundwasserleiter. Natürliches Grundwassergefälle von rechts nach links. Numerische Modellierung mithilfe des Programms PMWIN (Houben & Hauschild 2011).	48
Bild 2.19:	Verhältnis des Brunnenzustroms über die dem Zustrom zu- und abgewandte Seite in der Horizontalen als Funktion des natürlichen Gefälles des Grundwassers (verändert nach Houben & Hauschild 2011)..	49
Bild 2.20:	Einseitige Beläge aus Eisenoxiden in einem Wickeldrahtfilter. Die Hauptanströmung des Brunnens erfolgt von der Bildoberkante (Foto: blm Storkow).	49
Bild 2.21:	Absenkungstrichter im (a) gespannten und (b) ungespannten Grundwasserleiter (Bieske et al. 1998).	50
Bild 2.22:	Schema einer Wasserandrangkurve im (a) gespannten und (b) ungespannten Grundwasserleiter.	52
Bild 2.23:	Ermittlung der hydraulisch günstigsten Brunnenbetriebsleistung Q_{opt} aus dem Schnittpunkt der Funktionen des Wasserandrangs (Q_a) und Fassungsvermögens (Q_f) bei ungespannten Verhältnissen.	52
Bild 2.24:	Numerische Modellierung der vertikalen Strömung im nicht vollständig abgedichteten Ringraum eines Brunnens. Fließwege in Rot (Rubbert & Treskatis 2008b).	55
Bild 2.25:	Korrosion an der Steigleitung durch Missachtung der elektrochemischen Spannungsreihe bei Schrauben und Rohrstücken (Foto: Treskatis).. . . .	71
Bild 2.26:	Beispiel einer Ganglinienschar für die Wasserstände in Förderbrunnen und mehreren benachbarten Grundwassermessstellen.	73
Bild 2.27:	Beispiel einer Ganglinie der Absenkungsentwicklung in einem Brunnen im gespannten Grundwasserleiter und der wöchentlichen Fördermenge. Ab Ende 2000 ist trotz rückläufiger Fördermenge eine Zunahme der Absenkungsbeträge zu erkennen.	74
Bild 2.28:	Beispiel einer Anordnung einer brunnennahen Grundwassermessstelle zur Bestimmung des Eintrittswiderstandes zwischen Grundwasserleiter und Brunnen (Foto: Treskatis).	75
Bild 2.29:	Ganglinie eines mehrstufigen Pumpversuches mit Auftragung der Förderleistung, des Wasserspiegelgangs und Ableitung des Leistungsdiagramms (Wasserandrangkurve). Nach DVGW W 111.. . . .	76
Bild 2.30:	Entwicklung der Wasserandrangkurven eines Brunnens im Laufe des Betriebes (ohne Regenerierung).	78
Bild 2.31:	Ganglinie der zeitlichen Entwicklung der spezifischen Ergiebigkeit eines Brunnens mit Angabe der durchgeführten Regeneriermaßnahmen.	82
Bild 2.32:	Regenerierintervalle von 419 Brunnen der Berliner Wasserbetriebe (Mehrfachnennungen möglich). Nach Daten von Menz (2016).	84
Bild 2.33:	Abnahme der Durchlässigkeit mit abnehmender Porosität (berechnet nach Gl. [2.22]).. . . .	86
Bild 3.1:	Schemabild der Reaktionen der chemischen Korrosion.	90
Bild 3.2:	Schemabild der Reaktionen der mikrobiellen Korrosion.	92
Bild 3.3:	Schemabild der vertikalen Redoxzonierung in Grundwasserleitern und ihre Indikatorspezies (verändert nach Appelo & Postma 1996). Filterstrecken, die	

	mehrere Zonen überlappen, können zur Bildung unterschiedlicher Inkrustationsstypen führen.	97
Bild 3.4:	Vertikale Verteilung der Konzentration von Redoxindikator-Spezies im Grundwasser des Bourtanger Moores nahe Haren (Ems). Nach Daten von Houben (2000).	98
Bild 3.5:	Redoxzonierung in einem Grundwasserleiter und ihre Beeinflussung durch einen Brunnen.	99
Bild 3.6:	Eisen- und Mangankonzentrationen in einer Brunnenreihe in Mitteldeutschland. Abstand der Brunnen voneinander jeweils ca. 50 m.	101
Bild 3.7:	Zeitliche Variation der Eisenkonzentrationen in einem Brunnen in Norddeutschland.	102
Bild 3.8:	Vereinfachte Darstellung der Alterung (Umkristallisation) von Eisenoxidphasen.	106
Bild 3.9:	Umkristallisation von Eisenoxiden und ihre Auswirkungen.	107
Bild 3.10:	Auflösung von Verockerungen verschiedener Alterungsstufen in Schwefelsäure. Die Zahlen in Klammern bezeichnen die spezifischen Mineraloberflächen.	108
Bild 3.11:	Beim Überbohren eines Brunnens geborgene, verhärtete Verockerung und darin eingeschlossener Filterkies (Foto: Treskatis).	108
Bild 3.12:	Struktureller Aufbau von Verockerungen im mikroskopischen Maßstab.	110
Bild 3.13:	Rastelektronenmikroskopische Aufnahmen von Eisenbakterien: Zopfartige verdrehte Bänder sind Stiele von <i>Gallionella</i> . Röhrchen sind Scheiden von <i>Leptothrix</i> (Bild: Banfield & Zhang 2001 mit freundlicher Genehmigung).	112
Bild 3.14:	Eisenbakterien im Mikroskop: (a) Stielbildner (<i>Gallionella</i>), (b) Scheidenbildner (<i>Leptothrix</i>), (c) Hofbildner, (d) Clusterförmige (Fotos: Thronicker & Szewzyk, TU Berlin).	114
Bild 3.15:	Phasen der Entwicklung eines Biofilms auf einem Mineralkorn (grau): (1) Besiedlung, (2) Bildung von Stielen, Scheiden und Schleimkapseln, (3) Bildung der EPS (grau-rosa), Wachstum, (4) Entwicklung eines Sauerstoffgradienten, oberflächenferne Bereiche werden durch anoxische Bakterien (blau) besiedelt, (5) Aufbau einer neuen Schicht.	115
Bild 3.16:	Elektronenmikroskopische Aufnahme (SEM) eines stark mit Eisenoxidpartikeln verkrusteten nitratreduzierenden Bakteriums (Beta-proteobacterium, ähnlich <i>Acidovorax</i> sp. Stamm G8B1) (Foto: Andreas Kappler, Zentrum für angewandte Geowissenschaften, Universität Tübingen, aufgenommen am California Institute of Technology, Pasadena, USA).	118
Bild 3.17:	Mischungsprozesse zwischen oxidiertem und reduziertem Grundwasser beim An- und Ausschalten von Brunnen. 1 = Ausgangszustand, 2 = Betrieb, 3 = Wiederanstieg nach Abschalten (verändert nach van Beek 2010).	119
Bild 3.18:	Potenziallinien (rot) und Fließwege (blau) im Nahfeld eines Brunnens (a) kurz nach dem Anschalten, (b) im stationären Betrieb.	120
Bild 3.19:	Abhängigkeit der Löslichkeit von anorganischem Kohlenstoff ($= \Sigma \text{HCO}_3^-$, CO_3^{2-} , CO_2) in Wasser in Kontakt mit der Atmosphäre als Funktion der Temperatur. (Partialdruck $p\text{CO}_2 = 10^{-3.5}$). Berechnet mit der Modellsoftware PHREEQC.	122

Bild 3.20:	Mit Kalkablagerungen überzogene Brunnenpumpe. Der Brunnen selber war nur wenig versintert. (Foto: Andreas Wicklein, pigadi GmbH, Berlin).	123
Bild 3.21:	Versinterung aus einem Brunnen bei Königslutter (Durchmesser 6 Zoll). Länge des Maßstabsbalkens: 5 cm. Die rötliche Färbung der Inkrustation ist auf Spuren von Eisenoxiden zurückzuführen (< 1 Gew.-%) (Foto: Andrea Weitze, BGR).. . . .	123
Bild 3.22:	Vertikale Verteilung des pH-Wertes und der Aluminium-Konzentrationen im Grundwasser des Bourtanger Mores bei Haren (Ems). Nach Daten von Houben (2000).	125
Bild 3.23:	Entstehung von Aluminiumhydroxid-Inkrustationen unter versauerten Böden.	125
Bild 3.24:	Aluminium-Beläge an der Unterwassermotorpumpe und in der Steigleitung eines Brunnens in Nethen, Norddeutschland (Sander et al. 2016).. . . .	126
Bild 3.25:	Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Eisensulfid-Framboids aus einer Inkrustation in einem Brunnen im Norden Baden-Württembergs. Bei den großen Kristallen im Hintergrund handelt es sich um Kalzit. . .	127
Bild 3.26:	Abnahme der relativen Durchlässigkeit in einer mit Sand gefüllten Säule als Funktion der Biomasseproduktion (nach Daten von Xia et al. 2014). . .	129
Bild 3.27:	Verschleimung einer Brunnenpumpe. Mit freundlicher Genehmigung. .	130
Bild 3.29:	Vertikale Verteilung der bei einer abschnittswisen chemischen Regenerierung entfernten Eisenoxidmasse in einem Brunnen am Niederrhein (verändert nach Houben 2006).	132
Bild 3.28:	Einseitige Verockerung in einem Brunnen (Foto: Aquaplus, Kronach). .	132
Bild 3.30:	Überbaggerter Entwässerungsbrunnen des Braunkohlentagebaues Wackersdorf (Bayern) mit vollständig verockertem Ringraum. Man beachte den Filterkuchen an der ehemaligen Bohrlochwand und Ausbrüche des verockerten Filterkieses durch „Löcher“ im Filterkuchen (Fotos: Etschel 2004).. . . .	133
Bild 3.31:	Überbaggerter Entwässerungsbrunnen des Braunkohlentagebaues Inden, Rheinland (Foto: Treskatis, mit freundlicher Genehmigung RWE Power AG).	133
Bild 3.32:	Vertikale Verteilung der Eisenoxidgehalte (als FeOOH) in Bohrkernen aus dem Ringraum eines aufgegebenen Brunnens aus Wildeshausen (verändert nach Houben 2006)..	134
Bild 3.33:	Räumliche Verteilung der Eisenox-Idinkrustationen in Brunnen (verändert nach Houben 2006)..	135
Bild 3.35:	Auswirkungen einer gut durchlässigen Schicht (a) in der reduzierenden, (b) in der oxidierenden Zone. Vor dem Anschalten ist das Standwasser durch Austausch mit der Atmosphäre in den meisten Brunnen oxidierend. Nach dem Anschalten mischt sich oberflächennahes, oxidierendes und tieferes, reduzierendes Wasser im Brunnen. Der Anteil wird durch die Durchlässigkeit der jeweiligen Zonen gesteuert.	136
Bild 3.34:	Schematische Darstellung der Verteilung der Verockerung in der Vertikalen an einem Brunnen in Norddeutschland als Funktion des Zuflusses Q zum Filter (Houben & Weihe 2011).	136
Bild 3.36:	Maximaler Eisengehalt im Bohrkernmaterial eines Brunnens zwischen 20 und 50 m Tiefe (verfilterter Bereich) als Funktion der Entfernung von der	

	Brunnenachse. Bohrung B3 wurde nicht aufgenommen, da diese Bohrung nicht die Endteufe erreichte. Verändert nach Houben & Weihe (2010)..	137
Bild 3.37:	Massenbilanzierung einer tiefengestaffelten chemischen Regenerierung an einem überwiegend Uferfiltrat fördernden Brunnen am Niederrhein. . .	137
Bild 3.38:	Zustromverhältnisse und räumliche Verteilung der Eisen- und Manganoxid-Inkrustationen an einem überwiegend Uferfiltrat fördernden Brunnen am Niederrhein.	138
Bild 3.39:	Zeitliche Entwicklung der Verockerung in einem Brunnen.	139
Bild 4.1:	Bandbreiten der Durchmesser von im Grundwasser transportierten Stoffen im Vergleich zur Porengröße von Sanden (nach verschiedenen Autoren). Die blauen Linien bezeichnen die Grenzen der oben vermerkten Korngrößenklassen.	143
Bild 4.2:	Kräfte, die durch fließendes Wasser auf Mineralkörner einwirken (v = Fließgeschwindigkeit, z = Höhe, F_d = Schleppkraft, F_l = Hebekraft, F_g = Schwerkraft, F_r = resultierende Kraft, F_R = Widerstandskraft).	145
Bild 4.3:	Mobilisierung von Partikeln aus Lockergesteinen als Funktion der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers (umgezeichnet nach Muckenthaler 1989).	145
Bild 4.4:	Interaktionen von suspendierten Partikeln (blau) mit einem porösen Medium. (μ = Viskosität Wasser, ρ = Dichte Wasser, T = Temperatur, d_p , d_m = Durchmesser Partikel bzw. Medium, ζ_p , ζ_m = (zeta)-Potenzial (Oberflächenladung) Partikel bzw. Medium).	147
Bild 4.5:	Filtrationsprozesse im porösen Medium (verändert und neu gezeichnet nach McDowell-Boyer et al. 1986).	147
Bild 4.6:	Einfluss der räumlichen Anordnung und Sortierung von Kugeln auf die Porosität n . D = Durchmesser Körner des porösen Mediums, d = Durchmesser Partikel.	149
Bild 4.7:	Relative Durchlässigkeit eines porösen Filters als Funktion des Korngrößenverhältnisses zwischen den mobilen Partikeln und der Matrix (neu gezeichnet und verändert nach Saucier 1974).	150
Bild 4.8:	Partikelkonzentrationen im abgepumpten Grundwasser von Brunnen 202 (Brunnenfeld Helmond, Niederlande) bei drei verschiedenen Förderraten (minütliche Messung, logarithmische Skalierung der Y-Achse). Die Ausschläge (*) sind auf das jeweils fünfmalige An- und Ausschalten der Pumpe zurückzuführen (de Zwart et al. 2006).	152
Bild 4.9:	Box-Whisker-Plots der Partikelanzahl ($> 2 \mu m$) im abgepumpten Grundwasser in von Partikelverstopfung betroffenen (links) und nicht betroffenen (rechts) Brunnen aus den Niederlanden (verändert nach van Beek et al. 2006).	153
Bild 4.10:	(a) gering durchlässiger Filterkuchen (schwarz) an der Bohrlochwand und (b) Ansammlung von aus dem Grundwasserleiter stammendem Feinmaterial hinter dem Filterkuchen (sekundäre äußere Kolmation).	154
Bild 4.11:	Überbaggerter Entwässerungsbrunnen des Braunkohlentagebaues Wackersdorf (Bayern) mit verockerter Kiesschüttung und Resten der Bohrspülung (Skin-Schicht) an der Bohrlochwand (Etschel 2004).	154
Bild 4.12:	Skin-Schichten aus überbaggerten Entwässerungsbrunnen (GWL = Grundwasserleiter, S_k = Skin-Schicht, F_k = Filterkies). (a) Geschlossene Skin-Schicht auf Bohrlochwand (Photo: Houben), (b) diffuse Skin-Schicht um	

	Bohrlochwand (Photo: Houben), (c) Skin-Schicht außerhalb der Bohrlochwand (Photo: Henkel). Mit freundlicher Genehmigung der RWE Power AG.	155
Bild 4.13:	Ergebnisse computertomographischer Untersuchungen einer Skin-Schicht aus einem überbagerten Entwässerungsbrunnen: (a) Porositätsverteilung entlang der Bohrlochwand, (b) hydraulisch wirksame Fließwege (blau) in der Skin-Schicht (verändert nach Houben et al. 2016).....	155
Bild 4.14:	Mikroskopische Dünnschliffaufnahmen einer Bohrlochwand mit Skin-Schicht (GWL = Grundwasserleiter, S_k = Skin-Schicht, F_k = Filterkies). (a) Vergrößerung 5-fach, polarisiertes Licht, (b) Vergrößerung 5-fach Probe, nicht polarisiertes Licht. Probe aus einem überbagerten Entwässerungsbrunnen. Mit freundlicher Genehmigung der RWE Power AG.	156
Bild 4.15:	Dünnschliffaufnahme einer Bohrlochwand mit Skin-Schicht aus einem überbagerten Entwässerungsbrunnen (F_k = Filterkies, S_k = Skin-Schicht, $GWL-sS_k$ = Grundwasserleiter mit sekundärer Skin-Schicht (bräunliche Ablagerungen im Porenraum), GWL = Grundwasserleiter im Ausgangszustand). Vergrößerung 5-fach, nicht polarisiertes Licht. Mit freundlicher Genehmigung der RWE Power AG.	156
Bild 4.16:	Mikroskopischer Dünnschliff des Porenraumes, ca. 5 cm außerhalb der ehemaligen Bohrlochwand eines Trinkwasserbrunnens aus den Niederlanden. Links im polarisierten Licht. Die Pfeile zeigen Partikelbrücken (de Zwart et al. 2006).	157
Bild 4.17:	Bildung (1) von Partikelbrücken und ihre Zerstörung (2) durch kurzfristige Umkehrung der Fließrichtung mit nachfolgendem Abtransport (3). ...	157
Bild 4.18:	Wirkungen der Abrasion auf Materialoberflächen.	159
Bild 4.19:	Auswirkungen der Abrasion auf Filterschlitz und Schlitzbrücken.	159
Bild 4.20:	Mögliche Ursachen für eine Sandführung: (a) zu geringmächtige Kiesschüttung, (b) Filterrohr nicht zentriert in der Kiesschüttung, (c) während des Ausbaues in den Filterkies gerutschtes Material aus dem Grundwasserleiter.	160
Bild 4.21:	Exzentrischer Ausbau in einem überbagerten Entwässerungsbrunnen (1) Filterrohr, (2) Filterkies mit inhomogener Verteilung von Inkrustationen, (3) Grundwasserleiter. Foto: Weidner, mit freundlicher Genehmigung der RWE Power AG.	161
Bild 4.22:	Beim Ausbau in den Ringraum gerutschtes Sandpaket an einem überbagerten Entwässerungsbrunnen des Braunkohlentagebaues Wackersdorf, Bayern (H. Etschel, mit freundlicher Genehmigung).....	161
Bild 4.23:	Ablagerungen auf einem Steigleitungsflansch bei einem sandführenden Brunnen (Foto: Treskatis).	162
Bild 4.24:	Mögliche Probleme bei einem Sand führenden Brunnen.	163
Bild 4.25:	Setzung eines unterirdischen Brunnenschachtes infolge einer längeren, unbemerkten Sandführung des Brunnens (Foto: Treskatis).	164
Bild 4.26:	Oberflächenabschluss von zwei Grundwassermessstellen aus dem Emsland. Durch Setzung des Oberbodens bewegte sich die darin fixierte Schutzverrohrung nach unten, während die im Grundwasserleiter stehenden Filterrohre ortsfest blieben. Dadurch wurden Schutzkappen aufgedrückt bzw. abgesprengt (Foto: Houben).	166

Bild 4.27:	Schema der Konsolidierung des Ringraummaterials durch Auspressen des Porenwassers aus bindigen Schüttgütern (z. B. Tonpellets) infolge von Setzungen der hangenden Kiesschüttung. Umgezeichnet nach Zilch et al. (2002).	167
Bild 4.28:	Durch Einwirkung eines Wasserstrahls aus einer undichten Steigleitung verursachtes Loch in einem Brunnenrohr DN 300 (Foto: Treskatis).	168
Bild 4.29:	Schematische Darstellung der Spannungsverteilung bindiger Schüttgüter im Ringraum eines Brunnens. Umgezeichnet nach Zilch et al. (2002).	169
Bild 4.30:	Einregelung der Glaskugeln (links) und Filterkieskörnern (rechts) im Verlauf von Setzungsversuchen im Labormaßstab (Treskatis et al. 2011, 2012).	170
Bild 4.31:	Setzungsmaß unterschiedlicher Schüttgüter im Laborversuch (Treskatis et al. 2011, 2012).	171
Bild 4.32:	Beispiel für Vandalismus: Steine in einer Beobachtungsmessstelle (Nolte et al. 2004).	176
Bild 4.33:	Aufgebrochene Grundwassermessstelle (Foto: Treskatis).	177
Bild 5.1:	Zeitliche Entwicklung der Brunnenleistung an einem Horizontalfilterbrunnen. Die roten Pfeile kennzeichnen die Regeneriemaßnahmen.	180
Bild 5.2:	Erhöhung des Eintrittsverlustes an Infiltrationsbrunnen.	182
Bild 5.3:	Zunahme des zusätzlichen Druckverlustes s_c in Injektionsbrunnen als Folge verschiedener Alterungsprozesse (verändert nach Huisman & Olsthoorn 1983).	185
Bild 5.4:	Injektionsrate eines Injektionsbrunnens als Funktion des Verhältnisses zwischen der injizierten Partikelmasse und der offenen Filterfläche (verändert nach Daten von Bichara 1986). Das schattierte Feld und der Pfeil bezeichnen die aufgrund unterschiedlicher Rahmenbedingungen auftretende Streuung der experimentellen Daten.	186
Bild 5.5:	Ausbruch von Gesteinsbruchstücken entlang der Klüftung in unverrohrten Festgesteinsbrunnen (BGR).	187
Bild 5.6:	Kamerabefahrungen in unverrohrten Festgesteinsbrunnen: (links) unregelmäßiges Bohrloch durch Ausbruch von Fels entlang einer Kluft, (rechts) partiell blockiertes Bohrloch (Fotos: Jürgen Wagner, Grundwasser- und Geo-Forschung, Neunkirchen).	188
Bild 5.7:	Zeitreihe des Grundwasserstandes einer Messstelle aus den Niederlanden. Nach einer Regenerierung im Jahr 1996 reagiert die Messstelle deutlich empfindlicher auf die natürlichen Schwankungen des Grundwasserstandes (nach Daten von Jiao und Post 2019).	190
Bild 5.8:	Aufbau einer Unterwassermotopumpe (Flowserve).	191
Bild 5.9:	Bestandteile einer Anlagenkennlinie (Thamsen & Wulff 2010, TU Berlin).	192
Bild 5.10:	Kennlinienfeld einer Unterwassermotorpumpe mit Wirkungsgrad und Anlagenkennlinien für unterschiedliche geodätische Höhen (Thamsen & Wulff 2010, TU Berlin).	193
Bild 5.11:	Verbrannte Wicklungen eines Unterwassermotors (Foto: Sebastian Wulff, TU Berlin).	194
Bild 5.12:	Zeitliche Entwicklung der Temperatur von vier im selben Schacht installierten Unterwassermotorpumpen (Vattenfall).	194
Bild 5.13:	Möglichkeiten der Kühlung von Unterwassermotoren (Flowserve).	195

Bild 5.15:	Drosselkurve und Wirkungsgradverlauf einer Unterwassermotorpumpe ohne und mit Verockerung (Thamsen & Wulff 2010, TU Berlin).	197
Bild 5.14:	Stark verockertes Saugsieb einer Pumpe (Foto: Sebastian Hauelsen, TU Berlin).	197
Bild 5.16:	Verockerte Unterwassermotorpumpe aus der Trinkwassergewinnung (Flowserve).	198
Bild 5.17:	Sandverschleißspuren lauftrad- und gehäuseseitig am Dichtspalt (Fotos: Max Hergesell).	199
Bild 5.18:	Drosselkurve und Wirkungsgradverlauf einer Unterwassermotorpumpe ohne und mit Sandverschleiß (Thamsen & Wulff 2010, TU Berlin).	199
Bild 5.19:	Sandverschleiß an Hülse (links) und Gehäuse (rechts) einer Unterwasserpumpe (Fotos: Sebastian Wulff, TU Berlin).	200
Bild 5.20:	Korrodiertes Lauftrad (links) im Vergleich zum Neubauzustand (rechts) (Flowserve).	201
Bild 5.21:	Wirkungsgrad von Unterwassermotorpumpen in Brunnen gemäß einer Studie der Pumpenwirtschaft an 2.576 Pumpen (nach Daten von Hübner 2011b).	203
Bild 6.1:	Unterwasserfarbkamera mit radialer und axialer Blickmöglichkeit der Fa. JT Elektronik GmbH, Lindau (Foto: Cleanwells).	206
Bild 6.2:	Innenansichten von Brunnenfiltern in axialer und radialer Sicht (Fotos: Aquaplus, Kronach).	207
Bild 6.4:	Vermessung der Schlitzabstände in einem Holzfilter mittels Lasertechnik (Foto: Etschel Brunnenservice, Planegg).	208
Bild 6.3:	Vermessung einer unregelmäßig geformten Schadstelle in einem PVC-Rohr mittels Lasertechnik (Foto: Etschel Brunnenservice, Planegg).	208
Bild 6.5:	Bestimmung des Innendurchmessers eines Brunnenrohrs mittels Lasertechnik (Foto: Etschel Brunnenservice, Planegg).	208
Bild 6.6:	Vermessung eines Fremdkörpers im Brunnensumpf mittels Lasertechnik (Foto: Etschel Brunnenservice, Planegg).	209
Bild 6.8:	Undichte Rohrverbindung in einer PVC-Vollwandrohrstrecke mit Inkrustationsbildungen (Foto: blm, Storkow).	209
Bild 6.7:	Radialer Blick in die Filterkiesschüttung. Das Peilrohr liegt entgegen der Empfehlungen des DVGW-Regelwerks am Filterrohr (Foto: blm, Storkow).	209
Bild 6.9:	Setzungsriß in einem PVC-Schlitzfilter (Foto: blm, Storkow).	209
Bild 6.10:	Ansicht eines Kontrollpultes mit Bildschirm zur Übertragung der Kamerabilder in den Messwagen (Foto: Treskatis).	210
Bild 6.11:	Festlegung des Bezugspunkts für die Kamerabefahrung: Oberkante Brunnenkopf (Foto: Treskatis).	210
Bild 6.12:	Messpunkt für die Wasserstandsmessungen mittels Lichtlot (= Messung des Abstichs, nicht der „Absenkung“) an einem definierten Peilrohrzugang im Brunnenkopf (Foto: Treskatis).	212
Bild 6.13:	Darstellung der Ergebnisse eines Leistungspumpversuchs in einem Brunnen unter ungespannten Verhältnissen vor und nach einer Regenerierung.	214
Bild 6.14:	Bestimmung des Brunneneintrittswiderstandes (B) und des turbulenten Verlustanteils durch die Brunnenanströmung (C) durch die Auswertung eines mehrstufigen Leistungspumpversuchs.	216

Bild 6.15:	Beispiel einer elektromagnetischen Wanddickenmessung (EMDS) von Stahlbrunnenrohren mit Bewertung der Wanddicken in Relation zur Referenzwanddicke (Messdiagramm der Fa. blm Storkow).	224
Bild 6.16:	Reduzierte Wanddicke eines ca. 80 Jahre alten Graugussfilterrohres infolge von Korrosion (Foto: Treskatis).	224
Bild 6.17:	FEL-Log zur Überprüfung der Dichtigkeit von Rohrverbindungen im PVC-Ausbau eines Brunnens. Für den endgültigen Dichtkeitsnachweis muss diese Messung mit einem Packertest oder TFL untersetzt werden. Nach Baumann & Tholen (2002).	225
Bild 6.18:	Nachweis undichter Rohrverbindungen durch Tracer-Fluid-Logging und FEL-Log in einem PVC-Ausbau. Nach Lux (1997).	226
Bild 6.19:	Vergleich der Zuflussmengen in einem Brunnen vor und nach einer kombinierten Brunnenregenerierung (Fa. blm Storkow).	228
Bild 6.20:	Messdiagramme zur Kontrolle des Brunnenausbaus mit der Kombination von NN-, GG- und SGL-Log: fehlerhafte und potenziell undichte Ringraumabdichtung (Fa. blm Storkow).	229
Bild 6.21:	Probe eines erstarrten magnetisch dotierten Füllbinders® der Fa. Schwenk Zement KG. Die Magnetitbruchstücke sind in der graugelben Abdichtungsmasse als schwarze Punkte gut erkennbar (Foto: Treskatis).	231
Bild 6.22:	Prinzipskizze zur Funktion des Gasdynamischen Tests (GDT) zur Überprüfung der Ringraumdichtigkeit. Aus Unterlagen der Fa. blm Storkow. . .	232
Bild 6.23:	Schematische Darstellung der oberflächennahen Sickerwasserwegsamkeiten im Umfeld eines Brunnens. Aus Treskatis (2015b).	233
Bild 6.24:	Schemabild der Tracergaswegsamkeiten an einem Brunnen mit Sperrrohr Ausbau. Aus Treskatis (2015b).	234
Bild 6.25:	Aufspürung der Tracergasaustritte mittels Wasserstoffspürsonden an einem oberirdischen Brunnenabschlussbauwerk (Foto: Treskatis).	235
Bild 6.26:	Markierung des Tracergasaustrittsfeldes um einen unterirdischen Brunnenschacht (Foto: Treskatis).	236
Bild 6.27:	Beispiel einer Auswertung der Tracergasaustritte um zwei Brunnen in quartären Kiesen Mittelfrankens nach Lage zum Brunnenkopf und in Form von H_2 -Isokonzentrationslinien.	237
Bild 6.28:	Brunnenausbau mit Hohlraumbildung im Ringraum (Quelle: Fa. blm Storkow).	238
Bild 6.29:	Funktionsprinzip des Packerscheibenflowmeters. Nach Lux (1997). . .	240
Bild 6.30:	Geophysikalische Messungen und deren Interpretation zur Ausbaukontrolle eines Brunnens mittels FEL-Logs (qualitative Dichtigkeit der Rohrverbindung), GG-Log (Ringraumkontrolle), und Packerscheibenflowmeter (FLOW) zur Filterrohrdurchlässigkeit. Nach Lux (1997).	241
Bild 6.31:	FLOW-Messung in einem Brunnen: Bestimmung der Entnahme- und Schluckhorizonte. Aus Baumann & Triller (2011).	242
Bild 6.32:	Injektor für die schichtspezifische Eingabe von fluoreszierenden Farbstoffen beim Tracer-Fluid-Logging (TFL) (Foto: Treskatis).	243
Bild 6.33:	Messkurven eines Tracer-Fluid-Loggings (TFL) mit dem fluoreszierendem Farbtracer Uranin als Nachweis der Grundwasserströmungen in einem Brunnen. Aus Baumann & Triller (2011).	244
Bild 6.34:	Ablagerungen von Eisenmineralien in einem Krümmer am Brunnenkopf (Foto: Treskatis).	247

Bild 6.35:	Einrichtung zur Beprobung des abgepumpten Wassers mit Zapfstelle, Wasserzähler und Imhoff-Trichter (Foto: Treskatis).....	249
Bild 6.36:	Massenbilanzierung der chemischen Regenerierung eines Brunnens im Rheinland mit einem Reduktionsmittel. (a) Konzentration des gelösten und suspendierten Mangans im Verlauf des Abpumpens, (b) daraus berechnete entfernte Menge gelösten Mangans pro Zeitabschnitt (je fünf Minuten).	250
Bild 6.37:	Hypothetische Alterungskurven von Brunnen bei verschiedenen Instandhaltungsszenarien.	255
Bild 6.38:	Abnahme des Ergiebigkeitswertes eines Brunnens infolge voranschreitender Brunnenalterung.	257
Bild 6.39:	Beispiel einer Entwicklung der Brunnenergiebigkeit in Funktion der Zeit (Neubauleistung: 89 m ³ /h/m): Abnahme von Q_E bis zu einem Zeitpunkt, ab dem der Brunnen nicht mehr ausreichend zur Versorgungssicherheit beitragen kann (Ersatz durch Neubau erforderlich).....	260
Bild 6.40:	Schematische Darstellung der wirtschaftlichen Optimierung einer Betriebsperiode zwischen zwei Regenerierungen (s^* : technische Grenzabsenkung eines Brunnens; s_w : wirtschaftlicher Absenkungsbetrag des Brunnens). Aus Urban et al. (2007).	261
Bild 6.41:	Schematische Darstellung des Einflusses des Zuflussprofils und der Position der Filterober- und -unterkante auf die Regenerierfähigkeit des Brunnens.	270
Bild 6.42:	Schematische Darstellung des Wirkbereichs der Brunnenregenerierung in einem Brunnen.	271
Bild 7.1:	Kostentypen im Brunnenbetrieb. Aus Urban et al. (2007).	274
Bild 7.2:	Wirtschaftlich relevante Phasen im Lebenszyklus eines Brunnens: Grundlage für die Kalkulation der Lebensdauer einer Brunnenanlage. Nach Maniak (2001).	276
Bild 7.3:	Entwicklung der Kostenfaktoren des Brunnenbetriebes in Funktion der Zeit. Aus Walter (2006).	287
Bild 7.4:	Beispiele von Kostenspannbreiten für Regenerierarbeiten an Vertikalfilterbrunnen.....	292
Bild 8.1:	Prozessschritte der mechanischen Regenerierung (Bildquelle: BGR). .	294
Bild 8.2:	Trennmechanismen mechanischer Regeneriervverfahren: (1) hydraulische Erosion der Ablagerungen, (2) thermisch induzierte Expansion oder Kontraktion z. B. der Kieskörner und Ablagerungen, (3) Impulsgesteuerte Trennung der Ablagerungen von den Kieskörnern.	295
Bild 8.3:	Funktionsstrecke einer Entwicklungseinrichtung mit gepackter Pumpe und Impulsgenerator (Abbildung: pigadi, Berlin; Grafik: D. Düvelmeyer, Berlin). Aus Treskatis (2017).	296
Bild 8.4:	Inkrustierte Außenfläche eines Wickeldrahtfilters eines Sumpfbungsbrunnens (Foto: Treskatis, mit freundlicher Genehmigung der RWE AG). .	304
Bild 8.5:	Feststoffkontrolle mittels Spitzglasmessung: Der Sand- und Trübstoffaustrag nimmt in den Spitzgläsern von links nach rechts im Verlauf des Regeneriervorgangs ab (Foto: Treskatis).....	308
Bild 8.6:	Sandaustrag beim Kolben mit abnehmendem Sandgehalt. Abbruch aufgrund nicht weiter steigender oder sinkender Austragsrate..	309

Bild 8.7:	Sandaustrag beim Kolben mit zunächst abnehmendem, danach wieder zunehmendem Sandgehalt infolge eines Defekts im Brunnen. Abbruch aufgrund des steigenden Risikos eines Brunnenkollapses.	309
Bild 8.8:	Prinzip des Ausbürstens eines Filterrohres mit Angabe der Bewegungsrichtung der Borsten (links: für vertikal geschlitzte Filterrohre; rechts: für horizontal geschlitzte Filterrohre). Nach Schröder (2000).	310
Bild 8.9:	Kunststoffbürsten für die Brunnenreinigung (Foto: Treskatis).	311
Bild 8.10:	Defekte Bürstenscheiben (Foto: Cleanwells, Rottweil).	311
Bild 8.11:	Kunststoffbürsten mit Vorrichtung zur Niederdruck-Innenspülung (Foto: Treskatis).	312
Bild 8.12:	Schema der Kolbenbewegung und des dadurch induzierten Wasserflusses in einem Vertikalfilterbrunnenrohr.	314
Bild 8.13:	Ungeeignete, defekte Kolben (Foto: Cleanwells, Rottweil).	315
Bild 8.14:	Einbau eines Seihers mit weichdichtenden Kolben in einen Versuchsbrunnen am Bau-ABC Rostrup (Foto: Treskatis).	316
Bild 8.15:	Schemadarstellung einer Unterwasserpumpe zwischen Packerscheiben zur Intensiventnahme innerhalb der Filterstrecke.	319
Bild 8.16:	Beispiel einer Unterwasserpumpe zwischen Packerscheiben (Foto: Treskatis).	320
Bild 8.17:	Beispiel eines Systems zur Intensiventnahme nach DVGW W 130 mit vorgegebenem Packerabstand und variabler Fördermenge (Foto: Treskatis).	320
Bild 8.18:	Einbau eines weichdichtenden Kolbens einer Doppelkolbenkammer SDKK® in einen großkalibrigen Brunnen (Foto: Fa. Hölscher Wasserbau).	322
Bild 8.19:	Theoretisch erforderliche, radiale Zuflussmengen zu einer Entnahmekammer mit der Länge 1 m (l_p), um an der Bohrlochwand über die Kiesschüttung mit dem Korndurchmesser D_{50} die erforderliche Fließgeschwindigkeit zur Entfernung von Feststoffpartikeln zu erreichen (Nillert 2008).	324
Bild 8.20:	Numerische Simulation der Fließgeschwindigkeiten im Umfeld einer Entnahmekammer bei unterschiedlichen Durchlässigkeitskontrasten zwischen der Kiesschüttung und dem Grundwasserleiter (Erläuterung der Fälle a) bis c) siehe Text) (Nillert 2008).	326
Bild 8.21:	Beispiel eines dichtungswirksamen Doppelkolbenkammergerätes (Foto: pigadi).	327
Bild 8.22:	Baustellenfoto einer Brunnenbaumaßnahme mit Einsatz einer Doppelkolbenkammer SDKK® (Foto: Fa. Hölscher Wasserbau).	328
Bild 8.23:	Blick in einen Sandmesscontainer bei der Intensiventnahme oder Entsandung von Brunnen (Foto: Fa. Hölscher Wasserbau).	328
Bild 8.24:	Feststoffaustrag S mit einer Manschettenkammer MK bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums AK an fünf Brunnen der Berliner Wasserbetriebe. Die erzielte Änderung der spezifischen Ergiebigkeit (Q_{spez} als Säulen dargestellt) wird verglichen mit den Ergiebigkeiten nach Einsatz einer Doppelkolbenkammer (SDKK®) (Nillert & Wittstock 2009).	329
Bild 8.25:	Beispiel einer symmetrischen Doppelkolbenkammer DN 400 mit Ausgleichsrohren (PCT/DE2010/000470, E03B 3/15 (2006.01)) und hydraulischem Impulsgeber im unteren Kolben (Foto: GCI GmbH).	330
Bild 8.26:	Einbau einer Dreikolbenkammer TriKK® in einen Brunnen (Foto: Fa. Hölscher Wasserbau).	332

Bild 8.27:	Detail einer Dreikolbenkammer TriKK® (Foto: Fa. Hölscher Wasserbau).	332
Bild 8.28:	Beispiel eines Mehrkammergerätes zur mechanischen und chemischen Brunnenregenerierung mit angebauten Bürsten (Foto: Fa. BPS, Pulheim).	334
Bild 8.29:	Beispiel eines Mehrkammergerätes, das auch zur Niederdruck-Innenspülung verwendet werden kann (Foto: Fa. Aquaplus, Kronach).	334
Bild 8.30:	Prinzipskizze des Wasserstromes in einem Mehrkammergerät. Nach Detay (1997).	335
Bild 8.31:	Beispiel eines Niederdruckspülgerätes (Foto: DGFZ 2003).	337
Bild 8.32:	Beispiel eines Gerätes zur Hochdruckinnenspülung mit rotierendem Düsenkopf. (Foto: Fa. Aquaplus, Kronach).	339
Bild 8.33:	Beispiel eines Doppelrotationsgerätes mit gegenläufig arbeitenden Düsenkränzen (Foto: Treskatis).	340
Bild 8.34:	Funktionsprinzip einer Hochdruckinnenspülung mittels Doppelrotationsgerät. Nach Unterlagen der Fa. EBS, Planegg.	340
Bild 8.35:	Schema der Geräteanordnung auf der Baustelle zur Hochdruckinnenspülung mit Doppelrotationsgerät und zusätzlich eingebauter Pumpe für den kontinuierlichen Austrag der gelösten Ablagerungen. Nach Unterlagen der Firma E+M, Hof/Saale.	341
Bild 8.36:	Wirkung von Wasserstrahlen auf die Lagerungsverhältnisse im Filterkies. Nach DGFZ (2003).	342
Bild 8.37:	Schäden an einem Steinzeugfilter durch unsachgemäße Hochdruckspülung (Foto: Munding, Aquaplus).	343
Bild 8.38:	Einsatz von Spüllanzen zur Regeneration des Filterkieses im Ringraum eines Brunnens und dessen Wirkung auf die Kiesschüttung: I = Brunnenringraum vor der Verfahrensanwendung (dunkel gefärbter Bereich deutet die Lage der Inkrustierungen an); II = Einführung der Spüllanze; III = Aufbrechen der Inkrustationen und Vermengung mit dem Filterkies; die Ringraumabdichtung ist ebenfalls zerstört und unwirksam.	344
Bild 8.39:	Beispiel einer Anordnung von Peilfiltern in der Kiesschüttung eines Brunnens, die zur Hochdruckreinigung der Kiesschüttung genutzt werden können (Foto: Treskatis).	345
Bild 8.40:	Prinzipskizze einer Brunnenregenerierung mit tiefkalter Kohlensäure (BGR).	348
Bild 8.41:	Veränderungen der Rohwasserbeschaffenheit nach einer Regenerierung mit tiefkalter Kohlensäure (nach Daten von Jüttner & Ries 2002).	349
Bild 8.42:	Ausbreitung der Energie als Funktion des Abstandes von der Quelle, für kugelförmige (Punktquelle) und zylinderförmige Ausbreitung (Linienquelle).	351
Bild 8.43:	Abschwächung der Intensität als Funktion des Abstandes von der Quelle, hier am Beispiel einer Ultraschallquelle. Man beachte die logarithmische Teilung der y-Achse.	352
Bild 8.44:	Mit Gleichung [8.9] berechnete prozentuale Reflektion an der Grenzfläche zwischen Wasser und verschiedenen Feststoffen.	353
Bild 8.45:	Schematische Darstellung der Brunnenregenerierung mit Sprengschnüren (Zeichnung: pigadi GmbH, Berlin).	355
Bild 8.46:	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Explosion einer Sprengschnur im Wasser. Man erkennt die zylinderförmige Ausbreitung der Gasblasen von	

	der Quelle weg und nachfolgend den Aufstieg der Blasen im Brunnen (Quelle: pigadi GmbH, Berlin).....	356
Bild 8.47:	Prinzipskizze der drei Phasen der Brunnenregenerierung mit Knallgas: (a) Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff durch Elektrolyse mit Gleichstrom, (b) Gase sammeln sich unter Gasglocke, (c) Zündung.	357
Bild 8.48:	Gasimpulsgenerator mit Zentrierungen (Foto: pigadi GmbH, Berlin)...	358
Bild 8.49:	Ultraschalleinheiten zur Brunnenregenerierung, links: für große Brunnen-durchmesser, rechts: für Brunnendurchmesser bis 300 mm (Photos: Sonic Umwelttechnik GmbH, Bad Mergentheim).....	360
Bild 8.50:	Mit verschiedenen Methoden gemessene Energieverluste beim Durchgang von Ultraschall durch unterschiedliche Filtermaterialien (verändert nach Daten von Bott & Wilken (2002)).	361
Bild 8.51:	Prinzipskizze eines Roto-Kavitations-Gerätes, hier ohne Pumpe (neu gezeichnet nach einer Firmenbroschüre von Whirlwindi, Niederlande). . .	362
Bild 8.52:	Vergleich von Beschleunigung, Amplitude und Energieeintrag verschiede-ner mechanischer Regenerierungsverfahren in Kiesschüttung und angren-zendem Grundwasserleiter eines physikalischen (1:1) Brunnenmodells (nach Daten von DGFZ 2003).	367
Bild 8.53:	Tauchereinsatz in einem Horizontalfilterbrunnen (Fotoquelle: T. Daffner).	371
Bild 9.1:	Zunahme der Oberfläche S als Funktion der Kantenlänge L bei Aufspaltung eines Würfels (n = Anzahl der Würfel, S = Oberfläche).....	376
Bild 9.2:	Löslichkeit der Eisenoxidminerale Ferrihydrit und Goethit als Funktion des pH-Wertes (umgezeichnet nach Cornell & Schwertmann 1996). Man be-achte die logarithmische Skalierung der Achsen.	378
Bild 9.3:	Auflöseverhalten einer kristallinen Brunnenverockerung in Salzsäure bei verschiedenen pH-Werten (logarithmische Darstellung der y-Achse). .	378
Bild 9.4:	Auflösung von Karbonaten bei einer chemischen Regenerierung eines verockerten Brunnens mit Salzsäure. Nach Daten von Berger 1997. . .	381
Bild 9.5:	Auflöseverhalten von Eisenoxidmineralen verschiedener Kristallisation in Schwefelsäure/Phosphorsäureester bei pH 0,66.	382
Bild 9.6:	Vergleich der Effizienz von verschiedenen Chemikalien (jeweils 0,1 molare Lösungen) gegenüber gering (Ferrihydrit) und höher kristallinen (Goethit) synthetischen Eisenoxiden nach einer Einwirkzeit von sieben Stunden (Houben 2003b).	390
Bild 9.7:	Auflösung von synthetischen Eisenoxidmineralen unterschiedlicher Kristal-linität (Oberfläche) in 0,1 M Na-Dithionit-Lösung (Houben 2003b).. . .	391
Bild 9.8:	Zusammenhang zwischen spezifischer Oberfläche verschiedener syntheti-scher Eisenoxidminerale und der zur vollständigen Auflösung in 0,1 M Salz-säure benötigten Zeit (extrapoliert nach Ratengesetzen von Hou-ben 2003b).	391
Bild 9.9:	Schemabild einer Standbehandlung mit Chemikalien. Regeneriermittel fließt in nicht-inkrustierten Filterabschnitten ab und verdrifft im Grundwas-serleiter.	393
Bild 9.10:	Anmischkammer zur Auflösung eines pulverförmigen Regeneriermittels mit Pumpe für Umwälzung/Injektion (rechts) und Schaber zur Mobilisierung von abgesunkenen Feststoffen. Man beachte die Schutzausrüstung des Personals (Bild: Treskatis).....	395

Bild 9.11:	Anmisch- und Dosierkammer für flüssige Regeneriermittel (Bild: Fa. Aquaplust, Kronach).	396
Bild 9.12:	Zunahme der Ergiebigkeit von zwei Brunnen in Krefeld als Folge mechanischer und chemischer Regenerierung (verändert nach Houben 2001). 397	
Bild 9.13:	Zunahme der Ergiebigkeit eines Brunnens am Niederrhein während einer mehrstufigen mechanisch-chemischer Regenerierung. Der dritte Schritt (pH-neutrales Reduktionsmittel anstelle von Säure) brachte den Durchbruch (verändert nach Houben 2001).	398
Bild 10.1:	Sanierungsbedürftiger Brunnenkopf im Brunnenschacht: Korrosion und abgesackte Kiesverfüllung zwischen Sperrrohr und Kopfrohr als Sanierungsgründe (Foto: Treskatis).	405
Bild 10.2:	Zerstörung eines Schlitzfilters durch einen mit hohem Wasserdruck aus der Pumpensteigleitung austretenden Wasserstrahl: Der Filterkies wurde am Austrittspunkt aus dem Filterrohr in Bewegung versetzt und schliff zuerst die Beschichtung und dann den Stahl des Filterrohres von außen nach innen weg, sodass das gezeigte Loch entstand (Foto: F. Herrmann).	406
Bild 10.3:	Defekter Wickeldrahtfilter: Wickeldrahtfilter (WD-Filter) sind beim Einbau besonders drucksensitiv und vertragen keine axialen Beanspruchungen. Ähnliche Schadensbilder entstehen an WD-Filtern bei unkontrollierten Druckwellenimpulsverfahren (Foto: F. Herrmann).	406
Bild 10.4:	Irreversible Inkrustierung der Kiesschüttung mit Manganoxiden (Foto: Fa. Ochs).	407
Bild 10.5:	Irreversible Verstopfung der Filterschlitzes eines OBO-Holzfilters mit Unterkorn der Filterkiesschüttung (Foto: Fa. Ochs).	407
Bild 10.6:	Überflutung eines Brunnenfeldes bei Hochwasser (Foto: Treskatis).	408
Bild 10.7:	Erosion der Baugrubenverfüllungen der Anschlussleitung und des Brunnenschachtes infolge eines Hochwassers (Foto: Treskatis).	408
Bild 10.8:	Sanierungsauslöser „Baumbewuchs“: Ursache für das Eindringen von Wurzeln und Oberflächenwasser in den Brunnen (Foto: Treskatis).	409
Bild 10.9:	Umfangreicher Wurzelwuchs in einem Schachtbrunnen (Foto: Treskatis).	409
Bild 10.10:	Ausgebohrte Ausbauten eines Brunnens: Die Altausbauten werden beim Überbohren oder Überwaschen meist stark deformiert und müssen oft erst zerkleinert werden, bevor sie aus einem Bohrloch zu bergen sind (Foto: Treskatis).	410
Bild 10.11:	Außenansicht eines aufgelassenen Brunnens mit offenem Brunnendeckel, sodass der Zugang für jedermann möglich ist (Unfallgefahr) (Foto: Treskatis).	413
Bild 10.12:	Blick in einen aufgelassenen Brunnen ohne Abdeckung und Sicherung des Zugangs zum Grundwasser (Unfallgefahr und Gefährdung des Grundwassers) (Foto: Treskatis).	413
Bild 10.13:	Ungeeignete Ringraumabdichtung zwischen Kopfrohr und Hüllrohr des Brunnenkopfs/Sperrrohrs (Foto: Treskatis).	428
Bild 10.14:	Pressringdichtung zur sicheren Abdichtung des Ringraums zwischen Kopfrohr und Hüllrohr des Brunnenkopfs/Sperrrohrs (Foto: Treskatis).	428
Bild 10.15:	Übersicht der Sanierungsmethoden und deren Anwendungsmöglichkeiten bei verschiedenen Brunnenausbaumaterialien. Nach Rübesamen & Nolte (1999).	433
Bild 10.16:	Reste einer überbohrten Ringraumsperre aus Beton (Foto: Treskatis).	438

Bild 10.17:	Konstruktionsprinzip einer Einschubverrohrung im Vollrohrbereich eines Vertikalfilterbrunnens.	440
Bild 10.18:	Lochfraß an einem Stahlvollrohr DN 400.	441
Bild 10.19:	Undichte Rohrverbindung mit Eintritt von oberflächennahem Grundwasser (schwarz gefärbt durch Huminstoffe) (Foto: Nolte).....	442
Bild 10.21:	Schematische Darstellung des Einbaus einer selbsttragenden Innenrohrmanschette (I: Beschädigung im Vollrohr; II: Position der Innenrohrmanschette; a bis c: Verfahrensschritte beim Anpressen der Manschette in der Aufsicht).	442
Bild 10.20:	Beispiel einer selbsttragenden, mittels aufblasbarer Packersysteme einbaubaren Innenrohrmanschette (Foto: Uhrig Kanaltechnik, Geisingen).	442
Bild 10.22:	Einbaukonfiguration einer Innenrohrmanschette mit Gestänge (Foto: pigadi).....	443
Bild 10.23:	Einbau von segmentierten Einschubrohren durch Andrücken von dünnwandigen Metallzylinder mittels Packern gegen die vorhandene Ausbauverrohrung (Zeichnung mit freundlicher Genehmigung von Inflatable Packers Int. Pty.; Perth, Australia).	443
Bild 10.24:	Einbau von Sperrrohren und Zementierungen als Relining-Methode zur Sanierung von offenen Bohrlöchern im Festgestein oder rauen Sperrrohren bei Brunnen mit verlorenem Filterrohrausbau (Zeichnung mit freundlicher Genehmigung von Inflatable Packers Int. Pty.; Perth, Australia).....	444
Bild 10.25:	Einbau eines Reduzierstückes als Einschub in einem Brunnen mit teleskopiertem Ausbau (Zeichnung mit freundlicher Genehmigung von Inflatable Packers Int. Pty.; Perth, Australia).	444
Bild 10.26:	Einschub DN 150 PVC in einen Altausbau aus PVC ohne Ringraumverfüllung: der verbleibende Raum für den Pumpeneinbau ist in diesem Beispiel sehr knapp bemessen (Foto: Treskatis).	445
Bild 10.27:	Beim Überbohren zerstörtes Filterrohr DN 300 (Stahl, kunststoffbeschichtet) (Foto: Treskatis).	449
Bild 10.28:	Überbohrkrone mit Zahnkranz (Foto: Treskatis).	449
Bild 10.29:	Einfahrt einer 6 m langen Überbohrgarnitur zur Entfernung der Ringraumsperre und des Sperrrohres in einen Brunnen (Foto: Treskatis). . .	450
Bild 10.30:	Antrieb eines Mitnehmergestänges, welches die Überbohrkrone im Brunnenvorschacht steuert (Foto: Treskatis).	450
Bild 10.31:	Ziehen der überbohrten Ringraumsperre aus Beton (Foto: H. Jobmann, Bieske und Partner GmbH).....	450
Bild 10.32:	Brunnenausbau mit unvollständiger Überbohrung des Altausbaus. . .	451
Bild 10.33:	Wasserandrangkurve und Bemessungskurve des Brunnens aus Bild 10.32 – Druckverluste im sanierten Brunnen aufgrund nicht vollständig entfernter Kiesschüttung und Inkrustationen.	452
Bild 10.34:	Perforator zum Schneiden von Brunnenrohren oder Herstellen von Verpressöffnungen im Brunnenausbau: Das Sand-Wassergemisch wird als Schneidgut mit hohem Druck durch die Düsen verpresst (Foto: Fa. Fangmann, Salzwedel).	454
Bild 10.35:	Rohrschnitt in einem Schlitzbrückenfilter (Foto: Treskatis).....	454
Bild 10.36:	Entfernung der Ringraumschüttung durch Ausbohren bzw. Aussaugen im Schutze einer Hilfsverrohrung DN 1200 (Foto: Treskatis).....	455

Bild 10.37:	geschnittene und nahezu unversehrt gezogene Brunnenrohre DN 300 aus kunststoffbeschichtetem Stahl; Bergung mittel Fangbirne aus dem überbohrten Bohrloch DN 600 (Foto: Treskatis).	455
Bild 10.38:	Inkrustationen aus Eisenoxid mit Verbackung des Gazeetzes eines Peilfilterrohres (Widerstandsfiler in der Kiesschtüttung) (Foto: Treskatis).	456
Bild 10.39:	Überbohrkerne mit Resten eines zerbohrtem OBO-Holzfilter (Foto aus Tewes 2010).	456
Bild 10.40:	Zertrümmerte PVC-Brunnenrohrgarnitur DN 250, die als Einschub in einem korrodierten Stahlrohr DN 400 eingebaut war (Foto: Treskatis).	457
Bild 10.42:	Abstandshalter und Reste der „verbackenen“ Filterkiesschtüttung beim Überbohren des salzsäuregeschädigten Brunnens (Foto: H. Jobmann, Bieske und Partner GmbH).	457
Bild 10.41:	Verbackener Filterkies im Ringraum eines unsachgemäß mit Salzsäure regenerierten Brunnens (Rekristallisation der Karbonate und Eisenspezies bei der Standbehandlung und ansteigendem pH-Wert) (Foto: H. Jobmann, Bieske und Partner GmbH).	457
Bild 10.43:	Filterkuchenreste und Abdichtungsmaterial (grau) von der Bohrlochwand beim Überbohren des Brunnens (Foto: Jobmann, Bieske und Partner GmbH).	458
Bild 10.44:	Schematischer Brunnenausbau vor der Sanierung mittels Überbohrung (Fallbeispiel).	463
Bild 10.45:	Schematischer Brunnenausbau nach der Sanierung (Fallbeispiel).	464
Bild 10.46:	Sanierungsarbeiten an einem Horizontalfilterbrunnen von enercity (Hannover) durch die Fa. BHG Brechtel GmbH: Vortrieb von neuen Filtersträngen. Schachtdurchmesser 4 m, Tiefe 24 m (Foto: G. Houben).	466
Bild 10.47:	Übersicht der Rückbaumethoden und deren Anwendungsmöglichkeiten bei verschiedenen Brunnenausbbaumaterialien. Nach Rübesamen & Nolte (1999).	469
Bild 10.48:	Beispiel einer „schichtengerechten“ Brunnenrohrverfüllung in einem Brunnen mit funktionsfähiger Ringraumsperre. Nach Freie und Hansestadt Hamburg (1999a).	470
Bild 10.49:	Beispiel eines Brunnenrückbaus mit (Wieder-)Herstellung einer Ringraumabdichtung und Verfüllung des Brunnenrohres. Nach Freie und Hansestadt Hamburg (1999a).	471
Bild 10.51:	Beispiel eines Brunnenrückbaus mit Entfernung der Brunnenausbauten und Verfüllung des Bohrloches mit Dichtmaterialien. Nach Freie und Hansestadt Hamburg (1999a).	472
Bild 10.50:	Fräskopf zum Zerbohren nichtmetallischer Ausbaumaterialien. (Foto: F. Herrmann, Bieske und Partner Süd GmbH).	472
Bild 10.52:	Rückbau eines Brunnens mit Herstellung von Abdichtungen durch Perforation und Verpressen von Suspensionen. Anschließend wurde der Brunnen gemäß Schichtenfolge verfüllt. Nach Freie und Hansestadt Hamburg (1999b).	473
Bild 10.53:	Injektionsbohrung zur Verpressung des Ringraums (Foto: Treskatis).	474
Bild 10.54:	Demontage und Rückbau eines gemauerten Brunnenschachtes (Foto: pigadi).	474

Bild 10.55:	Tiefbrunnen mit nicht vorhandener Ringraumsperre auf Höhe des Braunkohleflözes und Mischverfilterung der Grundwasserleiter Horizont 6D und Horizont 6B (Treskatis 2001).	477
Bild 10.56:	Schema zur Herstellung der Ringraumsperre mittels „Sprengverpressung“ und anschließendem Rückbau des Brunnens aus Bild 10.41 (Treskatis 2001).	478
Bild 10.57:	Tiefbrunnen in einer Brunnenbohrung, die den Stauer (Horizont 6C) durchteuft hat und ohne Abdichtung zum Hangendgrundwasserleiter (Horizont 6D) ausgebaut wurde (Treskatis 2001).	479
Bild 10.58:	Schema zum teilweisen Rückbau und Neuausbau des Brunnens aus Bild 10.56 mittels „Sprengverpressung“ im Liegenden des Horizontes 6D (Treskatis 2001).	480
Bild 11.1:	Beispiel einer Auswertegrafik zur Ermittlung des Regenerierbedarfes in einem Brunnen. Die Zunahme des alterungsbedingten Eintrittswiderstandes wird durch die größer werdende Differenz zwischen Brunnenwasserspiegel und Peilrohrwasserspiegel bei fallender Förderleistung angezeigt. . . .	484
Bild 11.2:	Entwicklung der spezifischen Ergiebigkeit (lila) und der Restleistung (orange) des Brunnens infolge einer zu spät begonnenen Regenerierung. blaue Säulen: spezifische Brunnenleistung; orange Säulen: Restleistung bezogen auf die Ausgangsergiebigkeit	485
Bild 11.3:	Beispiel einer Baustelleneinrichtung für eine Brunnenregenerierung mittels Mehrkammergerät (Foto: Aquaplust, Kronach).	495
Bild 11.4:	Lagerung von Gestängen auf Böcken (Foto: Treskatis).	496
Bild 11.5:	In einen unzureichend verschlossenen Brunnen gefallene und dort ertrunkene Ratte. Links: Kamerabefahrung, rechts: Bergung. Befund: coliforme Bakterien: 410 CFU/100 mL, <i>E.coli</i> : 15 CFU/100 mL, Nagetiere: 1 (Fotos: Jobmann, Bieske und Partner GmbH).	496
Bild 11.6:	Eingabe von flüssigen Regenerierchemikalien in einen Brunnen. Man beachte die Fasspumpe, die Eingabevorrichtung und die Schutzausrüstung (Foto: pigadi GmbH).	498
Bild 11.7:	Persönliche Schutzausrüstung für Arbeiten in (Brunnen-)Schächten (Fotos: Bernhard Arenz).	501
Bild 11.8:	Vorteile der Definition eines Abbruchkriteriums gegenüber einer vorgeschriebenen Behandlungszeit t_1 : (a) wenig belasteter Bereich, Kriterium vorzeitig erreicht, Umsetzung möglich, (b) stark belasteter Bereich, Kriterium nach t_1 noch nicht erreicht, Weiterbehandlung erforderlich. Messparameter kann z. B. der Sandgehalt sein.	502
Bild 11.9:	Nachhaltigkeit der durch verschiedene Regenerierungen erzielten Leistungssteigerungen an einem Brunnen am Niederrhein.	503
Bild 11.10:	Veränderung der Nitratkonzentrationen im Rohwasser eines Brunnens am Niederrhein infolge einer kombinierten hydromechanisch-chemischen Regenerierung (Houben et al. 2000b).	504
Bild 11.11:	(a) Brunnen an Oberkante Filter stark verockert, (b) nach Regenerierung: Freilegung des oberen Filterabschnittes, verstärkter Zutritt von oxischem, oberflächennahem Grundwasser, (c) schnelle, erneute Abnahme der Ergiebigkeit (BGR).. . . .	505
Bild 11.12:	Veränderung der katalytisch wirksamen Oberfläche von Eisenocker im Porenraum der Filterkiesschüttung infolge einer Regenerierung.	505

Bild 11.13:	Wichtige Eintragswege der Verkeimung bei der Regenerierung von Brunnen.	507
Bild 11.14:	Beispiel des Verlaufs einer Verkeimung im Brunnenwasser nach einer Regenerierung.....	508
Bild 12.1:	Radioaktive Bestrahlung eines Brunnens mit zwei um 180° versetzten eingekapselten γ -Strahlensonden im Filterkies (umgezeichnet nach Firmenprospekt Gamma-Service Recycling GmbH, Leipzig, mit freundlicher Genehmigung).....	520
Bild 12.2:	Entwicklung der Leistung von Brunnen aus den Niederlanden für zwei verschiedene Bohrverfahren (verändert nach Timmer et al. 2003).	526
Bild 12.3:	Beispiel der Geometrie von Brunnen mit dünner („schlanker“) und dicker („mächtiger“) Kiesschüttung.....	528
Bild 12.4:	Zeitlicher Verlauf der Absenkung bei verschiedenen Förderregimen in Brunnen 50A, Brunnenfeld Noordbergum (Vitens), Förderrate 65 m ³ /h (van Beek et al. 2009b).	530
Bild 12.5:	Schemabild eines Brunnens (a) ohne und (b) mit Saugstromsteuerung und der idealisierten Zustromverteilung (Houben 2006).	531
Bild 12.6:	Gemessene Zuflussverteilung (Flowmeter) in einem Brunnenfilter (a) ohne und (b) mit Saugstromsteuerung (Houben 2006).	532
Bild 12.7:	Gemessene Leistungsquotienten eines Brunnens aus Norddeutschland mit und ohne Saugstromsteuerung, (a) im sauberen, (b) im verockerten Zustand (Houben 2006).	533
Bild 12.8:	Druckbegasung eines Brunnens mit Inertgas.	534
Bild 12.9:	Schemabild der unterirdischen Enteisung.	535
Bild 12.10:	Schemabild der tiefengestaffelten Entnahme (neu gezeichnet nach van Beek & Brandes 1977, zitiert in Appelo & Postma 1996).	536
Bild 12.11:	Kiesspülrohre im Filterkies (a) Neubauzustand, (b) verockert, (c) bei der Spülung (BGR).	537
Bild 12.12:	Kiesspülrohre aus Edelstahl im Filterkies eines Vertikalfilterbrunnens (Foto: Treskatis).	538