

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	1
Abstract.....	2
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	9
Danksagung.....	12
1 Veranlassung und Zielsetzung	13
2 Beschreibung des Untersuchungsraumes und der Untersuchungsobjekte.....	16
2.1 Lage und Ausdehnung der Untersuchungsstandorte und Ablauf der Untersuchung	17
2.2 Geologische und hydrogeologische Situation	20
2.2.1 Tektonische Gliederung und Entwicklungsgeschichte der Niederrheinischen Bucht.....	20
2.2.2 Geologische Schichtenfolge im Bereich des Hauptuntersuchungsgebietes (Rur-Scholle)	22
2.2.3 Grundwasserstockwerksbau und Grundwasserfließrichtung	27
3 Modellvorstellung zur Genese der Grundwasserchemie in Braunkohlenabraum-	
kippen und zu hydrogeochemischen Prozessen in deren Umfeld.....	29
3.1 Genese des Kippengrundwassers durch Pyritoxidation und Folgereaktionen	29
3.1.1 Vorkommen und Bildungsbedingungen von Pyrit.....	29
3.1.2 Mechanismen der Pyritoxidation durch Sauerstoff und Eisen(III)	30
3.1.3 Hydrogeochemische Folgereaktionen der durch den Braunkohlentagebau ausgelösten Pyritoxidation	32
3.2 Hydrogeochemische Reaktionen im Grundwasserabstrom (unverritztes Gebirge) der Abraumkippen.....	35
4 Untersuchungsmethoden	36
4.1 Untersuchungen zur Beschaffenheit der Sedimente.....	36
4.1.1 Probengewinnung und -lagerung	36
4.1.2 Extraktionsuntersuchungen in Säulen mit synthetischem Kippengrundwasser	37
4.1.2.1 Aufbau und Durchführung der Säulenversuche.....	37
4.1.2.2 Tracerversuche.....	39
4.1.3 Sequentielle Extraktionsuntersuchungen in Säulen	40
4.1.3.1 Problemstellung und Anforderungen an die Extraktionsuntersuchungen.....	40
4.1.3.2 Literaturübersicht sequentieller Extraktionsverfahren zur Bestimmung ausge- wählter Metallbindungsformen und Durchführung der Extraktionssequenzen.....	41
4.1.4 Bestimmung der Bilanz-Säureneutralisationskapazität und der Silikatverwitterung in Schüttelversuchen	44
4.1.5 Bestimmung der potenziellen Kationenaustauschkapazität	45
4.1.6 Bestimmung von Pyritschwefel- und Kohlenstoffgehalten	46
4.1.7 Bestimmung des Wasseranteils der Sedimente	46
4.2 Wasseranalytik	46
5 Hydrogeochemie der Abraumkippen und des unverritzten Gebirges sowie Ermittlung von Anfangsbedingungen für die 1D-Stofftransport- und Reaktionsmodellierungen	48
5.1 Hydrogeochemie der bestehenden Abraumkippen Zukunft/West und Inden I sowie der geplanten Abraumkippe Inden II.....	48
5.1.1 Geochemie der Abraumkippen.....	48
5.1.1.1 Geochemie der Abraumkippe Zukunft/West.....	48

5.1.1.2	Geochemie der Abraumkippe Inden I.....	51
5.1.1.3	Geochemie der Abraumkippe Inden II.....	53
5.1.1.4	Zusammenfassende Übersicht von versauerungsrelevanten geochemischen Eigenschaften der Braunkohlennebergesteine	55
5.1.2	Beschaffenheit der Kippengrundwässer.....	55
5.1.2.1	Grundwasserchemie der Abraumkippe Zukunft/West.....	56
5.1.2.2	Grundwasserchemie der Abraumkippe Inden I	58
5.1.2.3	Prognose der Beschaffenheit des Kippengrundwassers sowie des geplanten Restsees im Bereich des Tagebaues Inden II.....	59
5.1.2.4	Chemische Eigenschaften eines für das gesamte Untersuchungsgebiet charakteristischen Kippengrundwassers.....	63
5.1.3	Austragsentwicklung der Braunkohlenabraumkippe durch Uferfiltrat des Blausteinsees	69
5.2	Hydrogeochemie von Nebengesteinshorizonten im Abstrom der Abraumkippen.....	76
5.2.1	Mittlere Geochemie des Horizontes 8 im Abstrom der Abraumkippen.....	77
5.2.2	Beschaffenheit des durch Pyritoxidation unbeeinflussten Grundwassers des Horizontes 8	78
5.3	Bedeutung der silikatischen pH-Pufferkapazität bei der Kippengrundwassergenese auf Basis von Schüttelversuchen	80
5.3.1	Nachweis sauerstofffreier Verhältnisse während der Durchführung der Schüttelversuche	81
5.3.2	Bilanz-Säureneutralisationskapazitäten der untersuchten Abraumsedimente.....	82
5.3.3	Ermittlung der unter Tagebaubedingungen reaktiven Silikatgehalte.....	82
5.3.3.1	Schwefelsäuretitration von Abraumproben bis pH = 2.....	82
5.3.3.2	Bilanzierung der reaktiven Silikatgehalte.....	84
5.4	Bindungsformen des anorganischen Kohlenstoffes der Abraumsedimente auf Basis von sequentiellen Extraktionsuntersuchungen in Säulen.....	88
5.4.1	Methodik der Auswertung	89
5.4.2	Calcit-Siderit-Verhältnis und anorganischer Kohlenstoffgehalt der Abraumsedimente.....	91
6	Prognose der hydrogeochemischen Entwicklung im Abstrom der Abraumkippen Inden und Zukunft/West bei Infiltration von Kippengrundwasser.....	94
6.1	Identifikation der bei den Simulationsrechnungen zum Kippenwasseraustrag zu berücksichtigenden Mineralphasen mit Hilfe von Säulenversuchen	94
6.2	3D-Transportmodellierungen zum Austrag eines konservativen Stoffes aus den Abraumkippen mit dem Modell Rur-Scholle der bergbautreibenden Gesellschaft.....	100
6.2.1	Vorgehensweise bei der Berechnung des physikalischen Stofftransportes.....	101
6.2.2	Ermittlung der Hauptabstromgebiete und der relevanten Grundwasserleiter	102
6.2.3	Prognose der konservativen Sulfatausbreitung im Bereich der Hauptabstromgebiete	105
6.3	1D-Stofftransport- und Reaktionsmodellierungen zur räumlich-zeitlichen Ausbreitung von Pyritoxidationsprodukten im Abstrom der Abraumkippen	108
6.3.1	Vorgehensweise bei der Berechnung des reaktiven Stofftransportes	108
6.3.2	Prognose der Kippengrundwasserausbreitung entlang ausgewählter Stromlinien.....	111
6.3.3	Zusammenfassende Übersicht der Modellergebnisse	118
7	Zusammenfassung.....	120
8	Literaturverzeichnis.....	129

Anlagen

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 2.1:	Lage des Untersuchungsgebietes (mit Rahmen im rechten Bild) im rheinischen Braunkohlenrevier westlich von Köln (verändert nach BOEHM & VON SCHWARZENBERG 2000).....	16
Abb. 2.2:	Lage der drei Untersuchungsstandorte Zukunft/West, Inden I und Inden II sowie des geplanten Tagebaurestsees Inden II und der Profillinien zur Konstruktion geologischer Querprofile (nächste Seite)	18
Abb. 2.3:	Tektonische Übersicht der Niederrheinischen Bucht und Lage des Untersuchungsgebietes im Bereich der südlichen Rur-Scholle (verändert nach ABRAHAM 1994).....	20
Abb. 2.4:	Geologisches Nordwest-Südost-Profil durch den ehemaligen Tagebau Zukunft/West mit Lage des im Rahmen von Rekultivierungsmaßnahmen angelegten Blausteinsees. Die Lage der Profillinie ist Abbildung 2.2 zu entnehmen.	23
Abb. 2.5:	Geologisches Nordost-Südwest-Profil durch den Tagebau Inden I mit Lage der Endböschungen für die Jahre 2005 (räumlicher Teilabschnitt I) und 2012 (räumlicher Teilabschnitt II). Die Lage der Profillinie ist Abbildung 2.2 zu entnehmen.....	24
Abb. 2.6:	Geologisches Nordost-Südwest-Profil durch den Tagebau Inden II mit Lage der Endböschungen für das Jahr 2024 sowie des geplanten Seebodens. Die Lage der Profillinie ist Abbildung 2.2 zu entnehmen.....	25
Abb. 3.1:	Schematischer Profilschnitt mit den Stadien der Braunkohलगewinnung und der im Tagebau Inden I/II typischen Horizontabfolge im Bereich der Abbauseite (Bezeichnung der Schichten in Anlehnung an SCHNEIDER & THIELE 1965)	30
Abb. 4.1:	Gewinnung (links) und Begasung (rechts) nicht oxidiertes Braunsedimente im Bereich der Abbauseite des Tagebaues Inden.....	36
Abb. 4.2:	Schematischer Aufbau der Säulenversuche (verändert nach CREMER 2002).....	38
Abb. 4.3:	Untersuchte operationell definierte Bindungsformen und die zu ihrer Erhebung eingesetzte Extraktionssequenz (verändert nach LENK 2001).....	43
Abb. 5.1:	Hydrochemische Situation im Bereich der Braunkohलगewinnung und dessen überwiegend noch unbeeinflussten Abstrom (Bezeichnung der Schichten in Anlehnung an SCHNEIDER & THIELE 1965)	49
Abb. 5.2:	Lage der Bohransatzpunkte und der Thiessen-Polygone zur Berechnung der mittleren Geochemie im Bereich des Braunkohलगewinnung Inden II	53
Abb. 5.3:	Schematisches Profil der im Tagebau Inden II zukünftig aufzufahrenden Braunkohलगewinnungsschichten und deren mittlere anorganische Kohlenstoff- und Pyritschwefelgehalte.....	54
Abb. 5.4:	Mittlere chemische Beschaffenheit eines für das gesamte Untersuchungsgebiet charakteristischen Kippengrundwassers als Kreisdiagramm (Angaben in mmol(eq) %).....	64
Abb. 5.5:	Berechnete Sättigungsindizes der Mineralphase Calcit von Grundwasserproben der Braunkohलगewinnung Zukunft/West und Inden I in Abhängigkeit vom pH-Wert (n = 44; 10 Grundwassermessstellen).....	65
Abb. 5.6:	Eisengesamtkonzentrationen von Grundwasserproben der Braunkohलगewinnung Zukunft/West und Inden I in Abhängigkeit vom pH-Wert (n = 91; 14 Grundwassermessstellen).....	66
Abb. 5.7:	Konzentrationsverhältnisse von Eisen und Sulfat in Grundwasserproben der Braunkohलगewinnung Zukunft/West und Inden I (n = 91; 14 Grundwassermessstellen).....	67
Abb. 5.8:	Berechnete Sättigungsindizes der Mineralphase Siderit von Grundwasserproben der Braunkohलगewinnung Zukunft/West und Inden I in Abhängigkeit vom pH-Wert (n = 44; 10 Grundwassermessstellen).....	67
Abb. 5.9:	Gemessene Sulfatkonzentrationen von Grundwasserproben der Braunkohलगewinnung Zukunft/West und Inden I in Abhängigkeit vom pH-Wert (n = 91; 14 Grundwassermessstellen).....	68

Abb. 5.10:	Berechnete Sättigungsindizes der sekundären Mineralphase Gips von Grundwasserproben der Abraumkippen Zukunft/West und Inden I in Abhängigkeit vom pH-Wert (n = 44; 10 Grundwassermessstellen).....	68
Abb. 5.11:	Grundwassergleichenplan für die Abraumkippe Zukunft/West (Situation Mitte des Jahres 2006).....	70
Abb. 5.12:	Geologisches Südsüdwest-Nordnordost-Profil durch die Abraumkippe Zukunft/West mit Lage des Blausteinsees und der Grundwassermessstelle 868211. Daneben ist schematisch die Lage einer Einheitsstromröhre mit Angaben der hydraulischen Rahmenbedingungen dargestellt, die den Fließweg von Uferfiltrat des Blausteinsees zur Grundwassermessstelle 868211 schematisch nachzeichnet.....	71
Abb. 5.13:	Entwicklung der Wasserspiegelhöhe des Blausteinsees sowie der Standrohrspiegelhöhe der Grundwassermessstelle 868211 und damit verbundene Entwicklung des Standrohrspiegelhöhenunterschiedes und der Grundwasserabstandsgeschwindigkeit für den Zeitraum 1994 bis 2004.....	72
Abb. 5.14:	Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit und des pH-Wertes im Grundwasser der durch Uferfiltrat des Blausteinsees beeinflussten Grundwassermessstelle 868211.....	73
Abb. 5.15:	Verlauf der Sulfat- und Eisenkonzentration im Grundwasser der durch Uferfiltrat des Blausteinsees beeinflussten Grundwassermessstelle 868211.....	73
Abb. 5.16:	Verlauf von Sättigungsindizes der sekundären Mineralphase Gips im Grundwasser der durch Uferfiltrat des Blausteinsees beeinflussten Grundwassermessstelle 868211.....	74
Abb. 5.17:	Verlauf der molaren Sulfat- und Chloridkonzentration im Grundwasser der durch Uferfiltrat des Blausteinsees beeinflussten Grundwassermessstelle 868211.....	75
Abb. 5.18:	Vergleich des gemessenen und des mit PHREEQC modellierten Konzentrationsverlaufes von Sulfat bei der Elution von Kippensedimenten durch gering mineralisiertes Uferfiltrat des Blausteinsees.....	75
Abb. 5.19:	Verlauf der (extrapolierten) Sulfatkonzentration im Grundwasser der durch Uferfiltrat des Blausteinsees beeinflussten Grundwassermessstelle 868211 sowie aus der Einheitsstromröhre (vgl. Abb. 5.19) ausgetragene, relative Sulfatfracht in Abhängigkeit vom ausgetauschten Porenvolumen.....	76
Abb. 5.20:	Mediane der Sulfatkonzentrationen von im Horizont 8 verfilterten Grundwassermessstellen sowie Lage des 84,1. Perzentil (entspricht der festgelegten Grenze zwischen vom Tagebau beeinflussten Konzentrationen und dem geogenen „Normalbereich“).....	79
Abb. 5.21:	Entwicklung des pH-Wertes während ausgewählter Schüttelversuche ohne Säurezugabe (Referenzversuche).....	81
Abb. 5.22:	Tiefenverteilung der im Tagebau Garzweiler ermittelten Bilanz-Säureneutralisationskapazitäten (pH = 7; nach WISOTZKY & LENK (2007a)).....	82
Abb. 5.23:	Entwicklung des pH-Wertes während ausgewählter Schüttelversuche in Abhängigkeit der Säurezugabe und der Versuchsdauer in logarithmischer Darstellung.....	83
Abb. 5.24:	Entwicklung des pH-Wertes während eines Schüttelversuches mit Saarfeldspat in Abhängigkeit der Säurezugabe und der Versuchsdauer in logarithmischer Darstellung.....	84
Abb. 5.25:	Berechnete Sättigungsindizes der Mineralphasen amorphes SiO ₂ und Quarz in den Eluaten der durchgeführten Schüttelversuche (Pfeile verbinden Referenz- und Realproben).....	85
Abb. 5.26:	Siliziumkonzentrationen in den Eluaten der Schüttelversuche.....	86
Abb. 5.27:	In Schüttelversuchen durch verdünnte Schwefelsäure (pH = 2) umgesetzte Mengen an Silikatphasen ausgedrückt als SiO ₂	86
Abb. 5.28:	Tiefenverteilung der im Tagebau Garzweiler mit Hilfe von Schüttelversuchen ermittelten silikatischen Säureneutralisationskapazität bei pH = 2.....	88

Abb. 5.29:	Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit im Extrakt des Säulenversuches S-1 (Frimmersdorfer Sand); die senkrechten Hilfslinien dienen einer Abgrenzung der einzelnen Bindungsformfraktionen auf Basis der elektrischen Leitfähigkeit.....	90
Abb. 5.30:	Verlauf des pH-Wertes (links) und der Calciumkonzentration (rechts) im Extrakt des Säulenversuches S-1 (Frimmersdorfer Sand) während der ersten drei Sequenzschritte.....	90
Abb. 5.31:	Verlauf der Calcium-, Magnesium- und Eisenkonzentrationen in den Extrakten der Säulenversuche S-1 (Frimmersdorfer Sand), S-2 (Neurather Sand) und S-3 (Hauptkies-Serie) während des Karbonat-Schrittes der sequentiellen Extraktion	91
Abb. 6.1:	Konzentrationsdurchgangskurve des Chloridtracers während des Säulenversuches „U 3“ (nicht oxidiertes Abraum Hz. 8) zur Bestimmung der hydraulischen Kennwerte	95
Abb. 6.2:	Modellierung des Chloriddurchgangs für den Säulenversuch U3 im Vergleich zu gemessenen Konzentrationswerten. Zusätzlich sind in der Abbildung die mit dem Tracerversuch bestimmten hydraulischen Parameter dargestellt.....	96
Abb. 6.3a:	Vergleich der gemessenen und der mit PHREEQC modellierten Konzentrationsverläufe von Sulfat und Eisen (1. Modell-Entwicklungsstufe; Säulenversuch U3).....	97
Abb. 6.3b:	Vergleich des gemessenen und des mit PHREEQC modellierten Calciumkonzentrationsverlaufes sowie des pH-Wertes (1. Modell-Entwicklungsstufe; Säulenversuch U3)	97
Abb. 6.4a:	Vergleich der gemessenen und der mit PHREEQC modellierten Konzentrationsverläufe von Sulfat und Eisen (2. Modell-Entwicklungsstufe; Säulenversuch U3).....	98
Abb. 6.4b:	Vergleich des gemessenen und des mit PHREEQC modellierten Calciumkonzentrationsverlaufes sowie des pH-Wertes (2. Modell-Entwicklungsstufe; Säulenversuch U3)	98
Abb. 6.5a:	Vergleich der gemessenen und der mit PHREEQC modellierten Konzentrationsverläufe von Sulfat und Eisen (3. Modell-Entwicklungsstufe; Säulenversuch U3).....	98
Abb. 6.5b:	Vergleich des gemessenen und des mit PHREEQC modellierten Calciumkonzentrationsverlaufes sowie des pH-Wertes (3. Modell-Entwicklungsstufe; Säulenversuch U3)	98
Abb. 6.6a:	Vergleich der gemessenen und der mit PHREEQC modellierten Konzentrationsverläufe von Sulfat und Eisen (4. Modell-Entwicklungsstufe; Säulenversuch U3).....	100
Abb. 6.6b:	Vergleich des gemessenen und des mit PHREEQC modellierten Calciumkonzentrationsverlaufes sowie des pH-Wertes (4. Modell-Entwicklungsstufe; Säulenversuch U3)	100
Abb. 6.6c:	Vergleich des gemessenen und des mit PHREEQC modellierten CO ₂ -Konzentrationsverlaufes (4. Modell-Entwicklungsstufe; Säulenversuch U3).....	100
Abb. 6.7:	Sulfatinnhalte der Abraumkippen Zukunft/West und Inden im Modell Rur-Scholle der RWE Power AG als Grundlage der konservativen Stofftransportmodellierung (Wanderpunktverfahren).....	101
Abb. 6.8:	Mit dem 3D-Modell Rur-Scholle der RWE Power AG simulierte, nicht-reaktive Sulfatausbreitung im Horizont 8 (SCHNEIDER & THIELE 1965) für das Jahr 2200 sowie Verlauf der Schnittpuren entlang derer die 1D-Stofftransport- und Reaktionsmodellierungen erfolgten.....	103
Abb. 6.9:	Mit dem 3D-Modell Rur-Scholle der RWE Power AG simulierte, nicht-reaktive Sulfatausbreitung im Horizont 8 (SCHNEIDER & THIELE 1965) für das Jahr 2300 sowie Verlauf der Schnittpuren entlang derer die 1D-Stofftransport- und Reaktionsmodellierungen erfolgten.....	104
Abb. 6.10:	Mit dem 3D-Modell Rur-Scholle der RWE Power AG simulierte, nicht-reaktive Sulfatausbreitung in den einzelnen Grundwasserleitern für die Jahre 2200 und 2300 entlang der Schnittpur T 2.....	105
Abb. 6.11:	Mit dem 3D-Modell Rur-Scholle der RWE Power AG simulierte Sulfatkonzentration entlang der Schnittpur T 2 im Jahre 2200	106
Abb. 6.12:	Mit dem 3D-Modell Rur-Scholle der RWE Power AG simulierte Sulfatkonzentration entlang der Schnittpur T 2 im Jahre 2300	107

Abb. 6.13:	Mit dem 3D-Modell Rur-Scholle der RWE Power AG simulierte Sulfatkonzentration entlang der Schnittpur T 3 im Jahre 2200	107
Abb. 6.14:	Mit dem 3D-Modell Rur-Scholle der RWE Power AG simulierte Sulfatkonzentration entlang der Schnittpur T 3 im Jahre 2300	108
Abb. 6.15:	Schematische Darstellung der eindimensionalen Stromröhren zur Simulation der reaktiven Stoffausbreitung im Grundwasserabstrom des Untersuchungsgebietes.....	109
Abb. 6.16:	Anpassung des 1D-Reaktionsmodells an das hydraulische 3D-Modell anhand der Austragsfunktion des Sulfates sowie modellierter Eisenaustrag für die Schnittpur T 2 nördlich des Tagebaues Inden I im Jahre 2300 (die Lage der Schnittpur T 2 ist Abb. 6.8 zu entnehmen)	112
Abb. 6.17:	Modellierte Entwicklungen des pH-Wertes sowie der Calcium- und CO ₂ -Gesamtkonzentrationen für die Schnittpur T 2 nördlich des Tagebaues Inden I im Jahre 2300 (die Lage der Schnittpur T 2 ist Abb. 6.8 zu entnehmen)	113
Abb. 6.18a:	Modellierte Entwicklung des sedimentären Calcitgehaltes im Bereich der Schnittpur T 2 nördlich des Tagebaues Inden I im Jahre 2300 (Karbonatgehalt mit 50 % Calcit u. 50 % Siderit; die Lage der Schnittpur T 2 ist Abb. 6.8 zu entnehmen).....	114
Abb. 6.18b:	Modellierte Entwicklung des sedimentären Sideritgehaltes im Bereich der Schnittpur T 2 nördlich des Tagebaues Inden I im Jahre 2300 (Karbonatgehalt mit 50 % Calcit u. 50 % Siderit; die Lage der Schnittpur T 2 ist Abb. 6.8 zu entnehmen).....	114
Abb. 6.19a:	Modellierte Entwicklung des sedimentären Calcitgehaltes im Bereich der Schnittpur T 2 nördlich des Tagebaues Inden I im Jahre 2300 (Karbonatgehalt mit 95 % Calcit u. 5 % Siderit; die Lage der Schnittpur T 2 ist Abb. 6.8 zu entnehmen).....	115
Abb. 6.19b:	Modellierte Entwicklung des sedimentären Sideritgehaltes im Bereich der Schnittpur T 2 nördlich des Tagebaues Inden I im Jahre 2300 (Karbonatgehalt mit 95 % Calcit u. 5 % Siderit; die Lage der Schnittpur T 2 ist Abb. 6.8 zu entnehmen).....	115
Abb. 6.20:	Anpassung des 1D-Reaktionsmodells an das hydraulische 3D-Modell anhand der Austragsfunktion des Sulfates sowie modellierter Eisenaustrag für die Schnittpur T 3 nördlich des Tagebaues Inden II im Jahre 2300 (die Lage der Schnittpur T 3 ist Abb. 6.8 zu entnehmen)	116
Abb. 6.21:	Modellierte Entwicklungen des pH-Wertes sowie der Calcium- und CO ₂ -Gesamtkonzentrationen für die Schnittpur T 3 nördlich des Tagebaues Inden II im Jahre 2300 (die Lage der Schnittpur T 3 ist Abb. 6.9 zu entnehmen)	117
Abb. 6.22a:	Modellierte Entwicklung des sedimentären Calcitgehaltes im Bereich der Schnittpur T 3 nördlich des Tagebaues Inden II im Jahre 2300 (Karbonatgehalt mit 50 % Calcit u. 50 % Siderit; die Lage der Schnittpur T 3 ist Abb. 6.8 zu entnehmen).....	117
Abb. 6.22b:	Modellierte Entwicklung des sedimentären Sideritgehaltes im Bereich der Schnittpur T 3 nördlich des Tagebaues Inden II im Jahre 2300 (Karbonatgehalt mit 50 % Calcit u. 50 % Siderit; die Lage der Schnittpur T 3 ist Abb. 6.8 zu entnehmen).....	117

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 2.1:	Zusammenfassende Darstellung des Ablaufs der Untersuchung und der wesentlichen Untersuchungsobjekte.....	19
Tab. 2.2:	Schematische Zusammenstellung der an den Untersuchungsstandorten verbreiteten Schichten sowie deren Kennzeichnung als Grundwasserleiter bzw. Grundwassernichtleiter	27
Tab. 4.1:	Lage der Entnahmeorte nicht oxidiertes Bodenproben aus dem unverritzten Gebirge (Horizonte 6B, 6D, 8 und 9B) sowie vor-Ort gemessene Boden-pH-Werte und elektrische Boden-Leitfähigkeiten (Bezeichnung der Schichten in Anlehnung an SCHNEIDER & THIELE 1965; n.b. = nicht bestimmt).....	37
Tab. 4.2:	Zusammensetzung des synthetisch hergestellten Kippengrundwassers (Infiltrationswasser der U-Säulen) im Vergleich zum mittleren Kippengrundwasser der Abraumkippen Zukunft/West und Inden I (s. auch Tab. 5.14)	39
Tab. 4.3:	Maße der Versuchssäulen („U-Säulen“ mit synthetischem Kippengrundwasser) und Sedimentkennwerte (Hz. = Horizont; Bezeichnung der Schichten in Anlehnung an SCHNEIDER & THIELE 1965).....	39
Tab. 4.4:	Etablierte Extraktionsreagenzien zur Bestimmung ausgewählter Bindungsformfraktionen. Die hervorgehobenen Lösemittel wurden in den Säulenversuchen eingesetzt (WISOTZKY & LENK 2007a)	42
Tab. 4.5:	Maße der Versuchssäulen („S-Säulen“ mit Durchführung einer Extraktionssequenz) und Sedimentkennwerte (Hz. = Horizont; Bezeichnung der Schichten in Anlehnung an SCHNEIDER & THIELE 1965).....	43
Tab. 4.6:	Eingesetzte Mess- und Analyseverfahren der physikalisch-chemischen und hydrochemischen Parameter sowie deren Nachweisgrenzen (NWG).....	47
Tab. 5.1:	Mineral- und Gasphasen sowie Kationenaustauscher des inversen hydrogeochemischen Modells (X = negativ geladener Austauscher, s = solid, g = gaseous) zur Bestimmung der Gehalte reaktiver Mineralphasen in Zukunft/West.....	49
Tab. 5.2:	Gemessene (Minima, Maxima) und mit PHREEQC berechnete (Mittelwerte) Zusammensetzung des Grundwassers der Abraumkippe Zukunft/West sowie des Mischgrundwassers der Horizonte 8, 7A und 6D als Grundlage der inversen hydrogeochemischen Modellierung [Angaben in mg/l].....	50
Tab. 5.3:	Invers modellierte Stoffumsätze bei der Bildung des heutigen Grundwassers der Braunkohlenabraumkippe Zukunft/West (StV = Standardvolumen mit 4.145 g Feststoff u. 1l Grundwasser).....	51
Tab. 5.4:	Mittlere Sedimentchemie (volumengewichtet) der im Bereich des Tagebaues Inden I verkippten, nicht-bindigen Nebengesteine für den Zeitraum 1992 bis 2010 (Bezeichnung der Schichten in Anlehnung an SCHNEIDER & THIELE 1965; * Daten aus OBERMANN ET AL. 1993).....	52
Tab. 5.5:	Invers modellierte Stoffumsätze bei der Bildung des heutigen Grundwassers der Braunkohlenabraumkippe Inden I (StV = Standardvolumen mit 4.145 g Feststoff u. 1l Grundwasser)	52
Tab. 5.6:	Mittlere Sedimentchemie (volumengewichtet) und Mächtigkeiten der Nebengesteine des Tagebaues Inden II (kippenrelevanter Abraum = Horizonte 16/14, 10, 11, 9A-9C, 8, 7; Bezeichnung der Schichten in Anlehnung an SCHNEIDER & THIELE 1965)	54
Tab. 5.7:	Zusammenfassende Übersicht der Pyritschwefel- und C _{anorg} -Gehalte von nicht bindigen Braunkohlennebenengesteinen der Abraumkippen Zukunft/West, Inden I und Inden II sowie Vergleich mit den Untersuchungsergebnissen von OBERMANN ET AL. (1993).....	55

Tab. 5.8:	Deskriptive Statistik (n = 40) der im Grundwasser der Abraumkippe Zukunft/West gemessenen physikalisch-chemischen Parameter, SI-Werte ausgewählter Mineralphasen und Vergleich mit Untersuchungsbefunden von OBERMANN ET AL. (1998).....	57
Tab. 5.9:	Deskriptive Statistik (n = 51) der im Grundwasser der Abraumkippe Inden I gemessenen physikalisch-chemischen Parameter, SI-Werte ausgewählter Mineralphasen und Vergleich mit Untersuchungsbefunden von OBERMANN ET AL. (1993).....	58
Tab. 5.10:	Anfangsbedingungen der hydrogeochemischen Vorwärtsmodelle zur Bestimmung der im Tagebau Inden II zu erwartenden Beschaffenheit des Kippengrundwassers (Bezeichnung der Schichten in Anlehnung an SCHNEIDER & THIELE 1965).....	60
Tab. 5.11:	Beschaffenheit des in die Abraumkippe Inden II aus dem unverritzten Gebirge einströmenden Grundwassers und Prognose der mittleren Kippengrundwasserqualität (Hz. = Horizont).....	61
Tab. 5.12:	Modellierte Kippengrundwasserchemie für die Abraumkippe Inden I auf Grundlage der Sedimentchemie und unterschiedlichen Gehalten anorganischen Kohlenstoffes sowie Vergleich mit realen Messwerten	62
Tab. 5.13:	Modellierte hydrochemische Entwicklung des Kippengrundwassers beim Übertritt in den Restsee Inden II	63
Tab. 5.14:	Mittlere chemische Beschaffenheit eines für das gesamte Untersuchungsgebiet charakteristischen Kippengrundwassers sowie SI-Werte ausgewählter Mineralphasen (Grundlage für die reaktive 1D-Transportmodellierung).....	64
Tab. 5.15:	Ausgewählte physikalisch-chemische Parameter des für die Befüllung des Blausteinsees verwendeten Sumpfungswassers (Mittelwerte 01/1995 – 04/2005).....	71
Tab. 5.16:	Mittlere Geochemie des Hz. 8 im Abstrom der Kippen, die in das Stofftransport- und Reaktionsmodell eingegeben wurde.....	77
Tab. 5.17:	Mittlere Beschaffenheit des von Pyritoxidation unbeeinflussten Grundwassers des Horizontes 8 für den Zeitraum 1999-2004.....	80
Tab. 5.18:	Chemische und mineralogische Zusammensetzung des in Schüttelversuchen eingesetzten Kalifeldspates (Produkt der Saarfeldspatwerke Huppert, nördliches Saarland).....	84
Tab. 5.19:	Extrahierte Calcium-, Magnesium- und Eisenfrachten während der Karbonat-Schritte der Säulenversuche (sequentielle Extraktion).....	92
Tab. 5.20:	Während der sequentiellen Extraktion gelöste Mengen karbonatischer Mineralphasen und daraus berechnete Gehalte anorganischen Kohlenstoffes der in die Säulen eingebauten Abraumsedimente	92
Tab. 6.1:	Geometrische, hydraulische und geochemische Kennwerte der eindimensionalen Stromröhren zur Simulation der reaktiven Stoffausbreitung im Grundwasserabstrom des Untersuchungsgebietes (die Karbonatgehalte beziehen sich auf einen Calcitanteil von 50 bzw. 95 % am Gesamtgehalt anorganischen Kohlenstoffes).....	110
Tab. 6.2:	Charakteristische Spannweiten der modellierten Konzentrationen wichtiger Wasserinhaltsstoffe im Einflussbereich $C_{\text{Sulfat}} > 250 \text{ mg/l}$ sowie Längen der durch das einströmende Kippengrundwasser entkalkten Zonen im Abstrom der Abraumkippen für das Jahr 2300 (Modellrechnungen mit einem Calcit-Siderit-Verhältnis von 50 : 50).....	119
Tab. 7.1:	Zusammenfassende Übersicht der Pyritschwefel- und C_{anorg} -Gehalte von nicht bindigen Braunkohlenebengesteinen der Abraumkippen Zukunft/West, Inden I und Inden II sowie Vergleich mit den Untersuchungsergebnissen von OBERMANN ET AL. (1993).....	121
Tab. 7.2:	Mittlere chemische Beschaffenheit eines für das gesamte Untersuchungsgebiet charakteristischen Kippengrundwassers sowie SI-Werte ausgewählter Mineralphasen (Grundlage für die reaktive 1D-Transportmodellierung).....	123
Tab. 7.3:	Mittlere Geochemie des Hz. 8 im Abstrom der Kippen, die in das Stofftransport- und Reaktionsmodell eingegeben wurde.....	124

Tab. 7.4:	Charakteristische Spannweiten der modellierten Konzentrationen wichtiger Wasserinhaltsstoffe im Einflussbereich $C_{\text{Sulfat}} > 250 \text{ mg/l}$ sowie Längen der durch das einströmende Kippengrundwasser entkalkten Zonen im Abstrom der Abraumkippen für das Jahr 2300 (Modellrechnungen mit einem Calcit-Siderit-Verhältnis von 50 : 50).....	126
-----------	---	-----