

Für das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

Abschlussbericht

Werkvertrag vom 23.09.2011 (Az. 13-0345.40/53/8 - B 687) Projektnummer: 22/11



Absetzerkippe im Tagebau Vereinigtes Schleenhain, (Foto: Seiler 2012)

Dresden, am 30. Juli 2012 überarbeitete Version vom 31. Dezember 2013



Für das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

Abschlussbericht

<u>Auftraggeber:</u> Sächsisches Landesamt für Umwelt,

Landwirtschaft und Geologie

Zur Wetterwarte 11 01109 Dresden

Werkvertrag Az.: 13-0345.40/53/8 - B 687 vom 23.09.2011

<u>Auftragnehmer:</u> Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann

Lungkwitzer Str. 12 01259 Dresden

Projektnummer: 22/11

Bearbeiter: Dr. Wilfried Uhlmann

Dipl.-Geol. Yvonne Lindig Dipl.-Geoökol. Dirk Seiler

Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Nestler

Dresden, am 30. Juli 2012, überarbeitete Version vom 31. Dezember 2013

pr. W. Uhlmann



Inhaltsverzeichnis

Inhali	tsverz	zeichnis	1
Anlag	genve	rzeichnis	3
Abkü	rzung	ısverzeichnis	4
Zusa	mmer	nfassung	6
1		itung	
•		Veranlassung	
		Aufgabenstellung	
	1.3	Bemerkungen zur Aufgabenstellung	.10
		Auftragserteilung	
2	Ausw	rirkungen des Braunkohlenbergbaus auf die Wasserkörper	.12
	2.1	Begrifflichkeiten	
	2.2	Quellen der stofflichen Belastung	
		Wirkungspfade und Schutzgüter	
	2.4	Maßnahmen zur Verhinderung/Minderung der stofflichen Belastungen	
3		nkohlenbergbau in Sachsen	
	3.1	Aktiver Bergbau	
		3.1.1 Lausitzer Revier	
		3.1.2 Mitteldeutsches Revier	
	3.2	Sanierungsbergbau	
		3.2.1 Lausitzer Revier	
4			
4	4.1	ierung der Kippenwasserbeschaffenheit	.46
		Hydrogeochemie	
	7.2	4.2.1 Geochemie der Pyritverwitterung	
		4.2.2 Kinetik der Pyritverwitterung	
		4.2.3 Pufferung	
		4.2.4 Stoffrückhalt und Selbstreinigung	
		4.2.5 Kennzeichnung	.57
		4.2.5.1 Versauerungspotential	
		4.2.5.2 Genetische Aspekte	
	4.3	Prognose der Kippenversauerung	
		4.3.1 Bilanzierung	
		4.3.2 Bewertung	
_	.,	4.3.3 Raum-Zeit-Aspekte	
5	Versa	auerungs- und Stofffreisetzungspotential	.66
	5.1	Aktiver Bergbau	
		5.1.2 Mitteldeutsches Revier - Kippe Vereinigtes Schleenhain	
	5.2	Sanierungsbergbau	
6		elle Kippenwasserbeschaffenheit	
U		Lausitzer Revier	
	0.1	6.1.1 Innenkippe des Tagebaus Nochten	
		6.1.2 Innenkippe des Tagebaus Reichwalde	
		6.1.3 Innenkippen des Sanierungsbergbaus der LMBV	
	6.2	Mitteldeutsches Revier	
		6.2.1 Tagebau Vereinigtes Schleenhain	.95
		6.2.2 Innenkippen des Sanierungsbergbaus der LMBV	.95
	6.3	Vergleich der Tagebaue und Reviere	.98

7	Maß	Snahme	n im Brau	unkohlenbergbau	102			
	7.1			erien und Maßstäbe				
	7.2		Tagebaubegleitende Maßnahmen					
		7.2.1	Maßnah	men der Quellenbehandlung (Kategorie A im aktiven				
			Bergbau	1)	104			
			7.2.1.1	Übersicht	104			
			7.2.1.2	Verfahrensprinzipien	105			
			7.2.1.3	Entwicklungsstand und Beispiele	108			
			7.2.1.4	Eignung	110			
		7.2.2	Maßnah	men zur Eindämmung der räumlichen Ausdehnung				
			der Que	lle (Kategorie B)	112			
			7.2.2.1	Übersicht	112			
			7.2.2.2	Verfahrensprinzipien	112			
			7.2.2.3	Entwicklungsstand und Beispiele	113			
			7.2.2.4	Eignung	114			
		7.2.3	Maßnah	men zur Verhinderung der Stoffausbreitung				
			(Kategor	rie C)	114			
			7.2.3.1	Übersicht	114			
			7.2.3.2	Verfahrensprinzipien	115			
			7.2.3.3	Entwicklungsstand und Beispiele	116			
			7.2.3.4	Eignung	117			
	7.3	Nachs	sorgende l	Maßnahmen	118			
		7.3.1	Übersich	nt	118			
		7.3.2	Verfahre	ensprinzipien	120			
		7.3.3	Entwicklungsstand und Beispiele123					
		7.3.4	Behandl	ung der Stoffquellen (Kategorie A im				
				ngsbergbau)	129			
		7.3.5	Verringe	rung des Stoffaustrages aus den Quellen (Kategorie				
				nierungsbergbau)	131			
		7.3.6	Verringe	rung der Stoffausbreitung (Kategorie C im				
				ngsbergbau)	133			
		7.3.7		rung des Stoffeintrages in das Schutzgut (Kategorie				
				nierungsbergbau)	135			
		7.3.8		ung des betroffenen Schutzgutes (Kategorie E im				
			Sanierur	ngsbergbau)	137			
8	Star	nd der 1	Гесhnik u	nd Ausblick	139			
	8.1	Interna	ational		139			
	8.2	Nation	nal		142			
		8.2.1	Lausitze	r Revier	142			
				utsches Revier				
		8.2.3		ches Revier				
		8.2.4	Sanierur	ngsbergbau	153			
	8.3	Bewer	rtung		156			
	8.4	8.4 Entwicklungspotentiale						
9	Que	uellenverzeichnis						
	9.1							
	9.2			Studien				
	9.3			terial				
	9.4	Internet						

Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Karten des hydrochemischen Zustandes des Kippenwassers im ostsächsischen Lausitzer Revier					
Anlage 2	Karten des hydrochemischen Zustandes des Kippenwassers im ostsächsischen Lausitzer Revier: Tagebau Berzdorf 6 Bl					
Anlage 3	Karten des hydrochemischen Zustandes des Kippenwassers im Mitteldeutschen Revier: Südraum Leipzig6					
Anlage 4		nydrochemischen Zustandes des Kippenwassers tschen Revier: Nordraum Leipzig 6 Blatt				
Anlage 5	Skala der Be	ewertungskriterien 3 Blatt				
Anlage 6		der tagebaubegleitenden Maßnahmen ippenversauerung				
	Anlage 6.1	Eignung bergbautechnologischer Maßnahmen zur Verringerung der Pyritverwitterung und der Kippenversauerung (Kategorie A im aktiven Bergbau) 7 Blatt				
	Anlage 6.2	Vergleichende Bewertung der Wirkungsfaktoren der tagebaubegleitenden Maßnahmen zur Quellenbehandlung (Kategorie A im aktiven Bergbau)				
	Anlage 6.3	Eignung hydraulischer Maßnahmen zur Eindämmung der räumlichen Ausdehnung der Quelle (Kategorie B im aktiven Bergbau)				
	Anlage 6.4	Eignung von Maßnahmen zur Behandlung von Kippenwasser (Kategorie C im aktiven Bergbau) 2 Blatt				
Anlage 7		de Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen ippenversauerung				
	Anlage 7.1	Maßnahmen der Quellenbehandlung 4 Blatt				
	Anlage 7.2	Maßnahmen zur Verringerung des Stoffaustrages 3 Blatt				
	Anlage 7.3	Maßnahmen zur Verringerung der Stoffausbreitung 3 Blatt				
	Anlage 7.4	Maßnahmen zur Verringerung des Eintrages in das Schutzgut				
	Anlage 7.5	Maßnahmen zur Behandlung des betroffenen Schutzgutes 4 Blatt				



Abkürzungsverzeichnis

Institutionen

BTUC	Brandenburgische Technische Universität Cottbus
BMBF	. Bundesministerium für Bildung und Forschung
DEBRIV	Deutscher Braunkohlen-Industrie-Verein e.V.
DGFZ	Dresdner Grundwasserforschungszentrum e. V.
FIB	Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. Finsterwalde
IWB	Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden
LAUBAG	Lausitzer Braunkohle Aktiengesellschaft mbH
	(Vorläuferunternehmen der VEM)
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LMBV	Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft
	mbH Senftenberg
MIBRAG	. Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH Theißen
VEM	. Vattenfall Europe Mining AG Cottbus

Technische Fachbegriffe

AFB	. Abraumförderbrücke
AKi	. Absetzerkippe
	. Braunkohlenbergbau
BVT	. beste verfügbare Technik
	. Direktversturzkippe
E	
EHS	. Eisenhydroxidschlamm
EKB	. Eimerkettenbagger
	. Fauna-Flora-Habitat
FR	. Feldriegel
GT	. Großtechnisches Versuchsstadium
GWBA	. Grubenwasserbehandlungsanlage (Sprachgebrauch bei VEM)
GWRA	. Grubenwasserreinigungsanlage (Sprachgebrauch bei MIBRAG
	und LMBV)
GWWA	. Grundwasserwiederanstieg
HKi	. Hauptkippe
HKR	. Hochkippenriegel
KT	. Kleintechnisches Versuchsstadium
KWH	. Kippenwasserhaltung
LWH	. Liegendwasserhaltung
	. Repräsentatives Elementar- (oder Einheits-)volumen
RL	. Restloch
RR	. Randriegel
SdT	. Stand der Technik
SRB	. Schaufelradbagger
SWH	. Sonderwasserhaltung

TB	Teilbecken
Tgb	Tagebau
TS	Talsperre
TwVO	Trinkwasserverordnung
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfgesetz
VKi	Vorkippe
VKNR	Vorkippenriegel

Geologische Fachbegriffe

Grundwasserleiter mit Nummer
Grundwasser
Grundwasserleiter
Hangendschluff
Lausitzer Flözhorizont
Liegendschluff
Oberbegleiter
Pleistozäner Grundwasserleiter
Quartär
Tertiärer Grundwasserleiter
Unterbegleiter

Chemische Fachbegriffe

ABA	. acid-base-accounting (Säure-Basen-Bilanz)
DOC	. Gelöster organischer Kohlenstoff (dissolved organic carbon)
K _{B4,3}	. Basenkapazität (zum pH-Wert 4,3) / Acidität
K _{B4.3}	. Basenkapazität (zum pH-Wert 4,3) nach rechnerischer Belüftung
	mit PhreeqC
K _{B8,2}	. Basenkapazität (zum pH-Wert 8,2) / Acidität
K _{S4,3}	. Säurekapazität (zum pH-Wert 4,3) / Alkalinität
K _{S4.3}	. Säurekapazität (zum pH-Wert 4,3) nach rechnerischer Belüftung
	mit PhreeqC
pH _{ox}	pH-Wert nach rechnerischer Belüftung mit PhreeqC
TIC	. Gesamter anorganischer Kohlenstoff (total inorganic carbon)



Zusammenfassung

- (1) Die Braunkohle ist ein wichtiger Primärenergieträger in Deutschland und aus energiepolitischer Sicht derzeit unverzichtbar. Die Braunkohle wird überwiegend verstromt und sichert die Grundlastversorgung mit Elektroenergie. Ein Teil der Braunkohle wird in Brennstoffe (Briketts, Kohlestaub, Wirbelschichtkohle) umgewandelt und ein geringerer Teil chemisch veredelt (Koks, Montanwachs). Deutschland zählt zu den größten Braunkohlenförderländern der Welt und ist hinsichtlich der Tagebau- und der Kraftwerkstechnologie führend.
- (2) Die produktiven Braunkohleflöze finden sich ausschließlich in tertiären Lockergesteinsedimenten. Sie liegen zwischen 50 und 400 Meter unter der Geländeoberfläche. Die Braunkohle wird in Tagebauen mit mobilen Baggern gefördert. Dazu muss das Deckgebirge abgetragen werden. Das Deckgebirge wird überwiegend auf der ausgekohlten Seite des Tagebaus wieder verkippt. Zum gefahrlosen Abbau der Braunkohle müssen die Tagebaue entwässert werden. Die Sümpfung der Braunkohlentagebaue erfolgt derzeit überwiegend mit Vertikalfilterbrunnen.
- (3) Im Deckgebirge über den Braunkohleflözen liegen pleistozäne und tertiäre Sedimente. Die tertiären Sedimente enthalten das Eisendisulfidmineral Pyrit. Bei der Grundwasserabsenkung, während der offenen Exposition der Deckgebirgssedimente im Tagebau und während der nachfolgenden Liegezeit auf den Kippen kommt Pyrit mit Luftsauerstroff in Kontakt. Dabei verwittert ein Teil des Pyrits und es entsteht ein saures Kippenwasser mit hohen Sulfat- und Eisenkonzentrationen. Enthält das Deckgebirge pleistozäne Sedimente mit karbonatischen Mineralen, z. B. Geschiebemergel, werden die Säuren in der Kippe neutralisiert und Eisen weitgehend festgelegt. Solche vergleichsweise günstigen geologischen Bedingungen sind nicht in allen Kohlefeldern gegeben.
- (4) Während des Bergbaubetriebes ist das Kippenwasser zunächst hauptsächlich ein Problem der Bergbaubetreibenden. In Grubenwasserbehandlungsanlagen wird das Kippenwasser neutralisiert und das Eisen entfernt. Zur Entfernung von Sulfat existiert derzeit keine wirtschaftliche Technologie. Nach dem Abschluss der Kohleförderung und der Rekultivierung stellt das Kippenwasser eine Gefahr für den entstehenden Bergbaufolgesee, für das Grundwasser im Abstrom der Kippen und für die berührten grundwasserabhängigen Landökosysteme dar. Direkt oder indirekt sind auch die Fließgewässer davon betroffen.
- (5) Infolge weitreichender Grundwasserabsenkungstrichter sind auch unverritzte Grundwasserleiter von der Grundwasserabsenkung in den Tagebauen und von stofflichen Veränderungen betroffen. Das Problem der Pyritverwitterung und der Versauerung bleibt somit nicht auf die unmittelbaren Braunkohlentagebaue und ihre Kippen beschränkt.
- (6) Die Braunkohleunternehmen sowie von ihnen beauftragte staatliche und private Forschungseinrichtungen führen seit etwa einem Vierteljahrhundert systematische Untersuchungen zu den Pyritgehalten, zur Exposition der Sedimente und zum Umfang der Pyritverwitterung in den Braunkohlentagebauen durch. Dabei

wurde erkannt, dass Pyritgehalte, Exposition und Verwitterungsumfang revier-, tagebau- und technologiespezifisch unterschiedlich sind. Diese Erkenntnis ist für die Übertragbarkeit von Lösungsansätzen zur Minderung der Kippenversauerung bedeutsam. Aus den Erkenntnissen der Untersuchungen wurden drei Komplexe von Maßnahmen zur Verhinderung bzw. Minderung der Pyritverwitterung und ihrer Folgen abgeleitet: tagebaubegleitende Maßnahmen, nachsorgende Maßnahmen sowie das Monitoring und die Modellevaluation zur Problematik.

- (7) Tagebaubegleitende Maßnahmen zielen auf eine Modifikation der Tagebautechnologie oder die Zugabe von Stoffen in die Kippen. Die technologischen Möglichkeiten in den Tagebauen mit Absetzerbetrieb (Mitteldeutsches und Rheinisches Revier) unterscheiden sich dabei grundlegend von den technologischen Möglichkeiten in den Tagebauen mit Förderbrückenbetrieb (Lausitzer Revier).
- (8) Zu den aussichtsreichen tagebaubegleitenden Maßnahmen für Tagebaue mit Absetzertechnologie gehören die selektive Gewinnung pyritreicher Sedimente und ihre gezielte Verkippung in untere Kippscheiben bzw. die selektive Gewinnung pyritarmer, gepufferter Sedimente und ihre oberflächige Verkippung. In Tagebauen mit Förderbrückenbetrieb führt die Verkürzung der technologischen Zeiten zwischen dem Abwurf der Förderbrückenkippe und ihre Abdeckung mit einer kulturfähigen Absetzerkippe zu einer Verringerung der Pyritverwitterung. Den genannten Maßnahmen sind jedoch Grenzen durch die Technologie, die Tagebausicherheit und die Substratverfügbarkeit gesetzt.
- (9) Auf die Pyritverwitterung und die Genese des Kippenwassers kann auch stofflich Einfluss genommen werden, vor allem durch die Anwendung von Bakteriziden zur Hemmung schwefel- und eisenoxidierender Bakterien, durch den Einbau alkalischer Stoffe zur Kompensation der Versauerung oder durch den Einbau respiratorisch wirkender Stoffe als Konkurrenzreaktion zur Pyritverwitterung. Bei einem vollvolumigen Einbau erreichen die Einsatzmengen der genannten Stoffgruppen jedoch Größenordnungen, die den Braunkohlenbergbau unwirtschaftlich machen, abgesehen von der Verfügbarkeit entsprechender Mengen. Die Anwendung von Bakteriziden ist zudem genehmigungsrechtlich bedenklich.
- (10) Der Einsatz alkalischer Stoffe im Sinne einer Teilkompensation der Versauerung lässt sich wirtschaftlich darstellen, wenn hierfür alkalische Reststoffe zur Anwendung gelangen. Als solche kommen zum Beispiel Kraftwerksaschen, Aschen aus kommunalen und gewerblichen Blockheizkraftwerken, karbonatische Rückstände der Baustoff- und chemischen Industrie sowie karbonatreiche Eisenhydroxidschlämme aus den Grubenwasserbehandlungsanlagen der Bergbauunternehmen selbst in Betracht. Der genehmigungsrechtliche Aspekt solcher Anwendungen ist bis auf die Eisenhydroxidschlämme derzeit noch nicht geklärt.
- (11) Zahlreiche in der internationalen Literatur vorgeschlagene Maßnahmen zur Verhinderung der Pyritverwitterung, wie zum Beispiel die Krustenbildung auf Pyritmineralen durch Phosphatierung, haben entweder Entwurfs- und



Forschungscharakter oder sind auf die spezifische Problemstellung und die enormen Dimensionen des deutschen Braunkohlenbergbaus nicht übertragbar.

- (12) Als Ideal eines Lausitzer Braunkohlentagebaus hinsichtlich minimaler stofflicher Auswirkungen auf den Wasserhaushalt stellt sich eine hydrogeologisch vollständig eingespundete Lagerstätte dar. Speziell für die hydrogeologischen Verhältnisse des Lausitzer Braunkohlereviers wurde die Dichtwandtechnologie entwickelt. Derzeit können Dichtwände bis 130 Meter Tiefe gebaut werden. Die Kapazitäten für den Dichtwandbau wurden in den letzten Jahren deutlich erweitert. Die Anwendung der Dichtwandtechnologie ist jedoch nur im zeitlichen Vorlauf zur Tagebausümpfung sinnvoll. Bei einem fortgeschrittenen Lagerstättenabbau müssen andere Lösungen bevorzugt werden.
- (13) Das Kippenwasser selbst scheidet aufgrund seiner Genese und Beschaffenheit für Nutzungen langfristig aus und stellt deshalb kein Schutzgut im Sinne des UVPG dar. Wasserwirtschaftliche Schutzgüter sind die tagebauumgebenden Wasserkörper, wie der Bergbaufolgesee, das Grundwasser im unverritzten Gebirge und die Fließgewässer. Die Zielrichtung tagebaubegleitender Maßnahmen in fortgeschrittenen Braunkohlentagebauen kann sich deshalb nur noch auf die Verhinderung einer Ausbreitung des Kippenwassers konzentrieren. Hierfür kommen hydraulische und/oder geochemische Barrieren in Betracht. Die gezielte Errichtung geochemischer Barrieren in den Tagebauen mit Förderbrückentechnologie scheint aussichtsreich. Zur Bemessung und technologischen Umsetzung besteht jedoch noch Forschungsbedarf.
- (14) Der großflächige Sanierungsbergbau in der Lausitz und in Mitteldeutschland ist mit Jahrzehnte lang aufgelassenen Tagebauen konfrontiert. Die Pyritverwitterung und Versauerung ist hier häufig sehr weit fortgeschritten. Der Sanierungsbergbau ist insbesondere von sauren Bergbaufolgeseen, hohen stofflichen Belastungen im ansteigendem Grundwasser sowie ihren Folgen für die Fließgewässer betroffen. Für den Sanierungsbergbau kommen ausschließlich nachsorgende Maßnahmen in Betracht. Mit nachsorgenden Maßnahmen kann kein Einfluss mehr auf die Pyritverwitterung genommen werden. Sie zielen auf eine Verhinderung bzw. Minimierung der Folgen der Pyritverwitterung auf die umgebenden aquatischen Schutzgüter.
- (15) Große Fortschritte wurden im Sanierungsbergbau bei der Technologieentwicklung zur In-lake-Wasserbehandlung mittels mobiler Schiffseinheiten erzielt. Die Behandlung des Grundwassers durch reaktive Wände oder unterirdische Reaktoren erweisen sich als verfahrenstechnisch anspruchsvoll und sehr teuer. Hoch entwickelte technische Verfahren der Wasserbehandlung, wie z. B. elektrochemische Verfahren oder die Nanofiltration können punktuell eingesetzt werden, scheiden jedoch bei hohen stofflichen Belastungen und bei großen Mengen der zu behandelnden Wässer meist aus wirtschaftlichen Gründen aus.
- (16) Im Sanierungsbergbau grenzen sich in der Regel die verfahrenstechnisch aussichtsreichen und wirtschaftlich akzeptablen Ansätze auf die Wassermengen- und Wassergütebewirtschaftung der Fließgewässer und Bergbaufolgeseen, auf ausgewählte naturräumliche Verfahren der Wasserbehandlung sowie, in Einzelfällen, auch auf technische Anlagen der Wasserbehandlung ein.





1.1 Veranlassung

In den Regionen mit aktivem Braunkohlenbergbau sowie in den Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle ist der natürliche Wasserhaushalt stark beeinträchtigt. Nachteilige Auswirkungen sind großflächige und langfristige Veränderungen von Menge und Beschaffenheit sowohl des Sicker- und Grundwassers als auch der Fließ- und Standgewässer. Wesentliche Ursache ist die bergbaubedingte Grundwasserabsenkung und der damit verbundene Sauerstoffzutritt, der zur Pyritverwitterung führt. Das Mineral Pyrit und seine Modifikation Markasit sind insbesondere in den tertiären Lockergesteinen enthalten. Die Folge der Verwitterung ist eine Versauerung der Kippen und die Freisetzung großer Mengen an Sulfat und Eisen in die anstehenden Oberflächen- und Grundwasserkörper. Durch den fortschreitenden Grundwasserwiederanstieg, das Erreichen der Endwasserstände in den Bergbaufolgeseen des Sanierungsbergbaus und den diffusen Stoffaustrag aus den Kippen wird die Sulfat- und Eisenbelastung im Vergleich zur gegenwärtigen Situation voraussichtlich weiter zunehmen.

Da in den bereits sanierten Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle nur begrenzte Möglichkeiten für die Minderung von Versauerungspotentialen der Kippen erschließbar sind, zielte das geplante Vorhaben schwerpunktmäßig auf Maßnahmen gegen die Kippenversauerung im aktiven Braunkohlenbergbau.

1.2 Aufgabenstellung

Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie hatte im Juli 2011 im Sächsischen Ausschreibungsblatt unter der Vergabe-Nummer B687 (Az. 13-0345.40/53/8) ein wissenschaftlich-technisches Projekt zur Untersuchung von "Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle" ausgeschrieben.

Das Projekt besteht aus zwei Teilen. Ziel des **ersten Teils** war es, den aktuellen Stand der "Beste-Praxis"-Verfahren gegen die Kippenversauerung im aktiven und im Sanierungsbergbau für Sachsen Deutschland, Europa und die Welt zusammenzutragen und bezüglich Ihrer Kosten-Nutzen-Relationen sowie weiterer Kriterien zu bewerten. Ergänzend sollten im ersten Teil des Projektes Pilotvorhaben aufgeführt und beurteilt werden.

Im **zweiten Teil** des Projektes sollten ausgewählte Verfahren im Praxisversuch in einem aktiven Tagebau des sächsischen Lausitzer Braunkohlenreviers getestet und bezüglich ihrer Wirtschaftlichkeit bewertet werden. Sofern möglich, sollte die Grundlage für spätere Dauerversuche auf einigen Kippenstandorten geschaffen werden.

Für das Kippenwasserprojekt waren vor allem vorhandene Erfahrungen, Gutachten, Maßnahmenpapiere, Studien und Recherchen wesentlicher Akteure der Region zu nutzen. Dazu gehören insbesondere die Vattenfall Europe Mining AG (VEM), die Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH (MIBRAG) und die Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV). Zudem sollte das

Gutachten von Prof. Drebenstedt (TU Bergakademie Freiberg) Berücksichtigung finden. Die Veröffentlichungen der ortsansässigen Universitäten (BTU Cottbus, TU Bergakademie Freiberg, TU Dresden) sowie weiterer Forschungseinrichtungen, wie des Forschungsinstituts für Bergbaufolgelandschaften e.V. Finsterwalde (FIB), des Umweltforschungszentrums Halle-Leipzig (UFZ), des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V. (DGFZ) sowie in der Forschung tätiger Ingenieurbüros, wie die G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH Freiberg und das IWB Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann in Dresden, waren einzubeziehen.

Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) besitzt eine umfangreiche Datenbasis zur Wasserbeschaffenheit in der Region. Unabhängig davon war eine generelle nationale und internationale Kenntnisstandanalyse durchzuführen. Die Erkenntnisse aus ähnlichen EU-Projekten und BMBF-Projekten sollten berücksichtigt werden. Es waren Patente zu recherchieren, Verfahren als solche kenntlich zu machen bzw. die Angaben aus den Patentrechten zu beachten. Der Teil 1 des Projektes sollte neben der textlichen Erläuterung ein umfassendes Literatur- und Quellenverzeichnis enthalten.

1.3 Bemerkungen zur Aufgabenstellung

Der Auftraggeber hatte auf Grund begrenzter Zeit- und Finanzressourcen in der Aufgabenstellung bezüglich der Feldversuche wenigstens auf Flächenversuche mit Stoffeinbringung an der Kippenoberfläche (oder auf Zwischenebenen) orientiert. Aus der Problemkenntnis des Bieters war jedoch nicht absehbar, ob diese Verfahren überhaupt Eingang in die Liste der "Beste-Praxis"-Verfahren mit einer günstigen Kosten-Nutzen-Relation finden würden.

Bezüglich des Teilprojektes 2 "Praxisversuche im aktiven Bergbau" gab der Bieter außerdem zu bedenken, dass die Praxisversuche in der verfügbaren Projektlaufzeit bis Oktober 2012 sowohl aus planerischen als auch aus naturwissenschaftlichen Gründen nicht zum Abschluss geführt werden können, zumal im Teil 1 des Projektes erst ein entsprechender Vorlauf hinsichtlich der "Beste-Praxis"-Methoden zu erarbeiten war, auf dessen Grundlage überhaupt erst Verfahren für die Versuche ausgewählt und in die Diskussion eingebracht werden konnten. Die Versuche sind anschließend planerisch und genehmigungsrechtlich vorzubereiten. Die Versuchsflächen auf den Kippen sind anschließend in technischer Hinsicht entsprechend anzulegen. Das ausführende Bergbauunternehmen muss hierfür Mittel und Kapazitäten planen. Zwei wichtige Leistungspositionen, die "Bergrechtliche Genehmigung" und "Technische Installation der Praxisversuche", waren in der Aufgabenstellung des Teilprojektes 2 auf Grund o. a. begrenzter Ressourcen nicht explizit enthalten. Es wurde eingeschätzt, dass innerhalb der Projektlaufzeit, selbst bei gutem Kooperationswillen und Mitwirkung aller Beteiligter, die Versuche bestenfalls installiert und in Gang gesetzt werden können. Vom ausführenden Bergbauunternehmen (Vattenfall Europe Mining AG) wurde vorgeschlagen, innerhalb des Projektteils 2 zunächst Vorversuche auf einem niedrigeren Skalenniveau als Grundlage zur fachlichen Begründung und zur Bemessung eines feldmaßstäblichen Feldversuches vorzuschalten. Außerdem muss die Vattenfall Europe Mining AG interne Abstimmungen mit den beteiligten Gewerken führen.

1.4 Auftragserteilung

Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie hat nach diesen Konkretisierungen das Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann in Dresden mit Werkvertrag Az. 13-0345.40/53/8 – B687 vom 23.09.2011 mit dem Kippenwasserprojekt beauftragt. Am 11.10.2011 fand eine Anlaufberatung im Hause des Auftraggebers statt. Zu der Anlaufberatung wurde ein projektbegleitender Arbeitskreis gebildet. Der Auftragnehmer befand sich im engen Dialog mit dem Auftraggeber.

Zwischen dem LfULG und dem Bergbauunternehmen Vattenfall Europe Mining AG ist ein Kooperationsvertrag für die Begleitung des Projektes in der Versuchsphase in Vorbereitung. Damit wird die technische und fiskalische Grundlage für die Fortführung des Teils 2 der Studie geschaffen. Mit dem Bergbauunternehmen VEM grenzen sich die potentiellen Versuchsflächen auf die Tagebaue Nochten und Reichwalde ein.

Eine Versuchsplanung zum Teil 2 des Projektes wurde im 2. Quartal des Jahres 2012 im Entwurf vorgelegt und in nach anschließender Diskussion und Abstimmung mit der Vattenfall Europe Mining AG, dem Sächsischen Landesamt für Umwelt Landwirtschaft und Geologie und weiteren Projektbeteiligten als feste Arbeitsgrundlage bestätigt.

2 Auswirkungen des Braunkohlenbergbaus auf die Wasserkörper

2.1 Begrifflichkeiten

Für die chemische Zusammensetzung des Wassers wird in der vorliegenden Arbeit der wertfreie Begriff "Beschaffenheit" (bzw. "Wasserbeschaffenheit") verwendet. Die Begriffe "Qualität" (bzw. "Wasserqualität") und "Güte" (bzw. "Wassergüte") implizieren bereits eine Wertung, z. B. in Hinblick auf die Wasserrahmenrichtlinie, das Wasserhaushaltsgesetz, das Sächsische Wassergesetz, die Trinkwasserverordnung oder auf die Wassergüteklassifikation der LAWA etc.

Die Autoren bemühen sich in Wertschätzung auch des interessierten fachfremden Lesers, die Verwendung von Anglizismen weitgehend zu vermeiden. Die deutsche Sprache bietet ausreichend Möglichkeiten für eine allgemein verständliche Beschreibung der Sachverhalte. Die Autoren bemühen sich weiterhin, eine Sprachanleihe aus sachfremden Fachgebieten zu vermeiden. In hydrogeologischen Arbeiten ist mitunter die Unart verbreitet, sich am Sprachgebrauch der Medizin zu bedienen, was sich in der Verwendung von Begriffen wie z. B. Anamnese (= Vorgeschichte), Therapie (= Behandlung), Prophylaxe (= Vorbeugung) und weitere manifestiert.

Zur Begrifflichkeit des Prozesses der Versauerung argumentiert [Drebenstedt 2009] wie folgt: "Da die Versauerung des Wassers nicht nur in Kippen mit tertiären Bestandteilen stattfinden kann, auch wenn dies in der Regel den überwiegenden Teil darstellt, sondern auch im entwässerten Hinterland der gewachsenen Tagebauböschungen, ist der Begriff "Kippenwasserversauerung" nicht korrekt und soll im Weiteren durch den Begriff "Sauerwasserbildung" ersetzt werden."

Die fachliche Argumentation ist korrekt. Die Autoren halten aber den Begriff "Sauerwasserbildung" dennoch für ein sprachlich ungünstiges Konstrukt, welches bislang in den verwandten Fachkreisen nicht gebraucht wird. Wir verwenden im Folgenden die Begriffe Kippenwasserversauerung (verkürzt auch: Kippenversauerung) bzw. Grundwasserversauerung, wenn es sich explizit um die Versauerung in den Kippen bzw. in den gewachsenen Grundwasserleitern handelt, oder einfach nur den übergeordneten Begriff der Versauerung, wenn allgemein über den Prozess gesprochen wird. Daneben steht der Begriff der Gewässerversauerung, der sich i. d. R. nur auf die Oberflächengewässer (Fließgewässer und Bergbaufolgeseen) bezieht. Der Begriff der Kippenversauerung ist gegenüber dem Begriff der Kippenwasserversauerung universeller, weil er sich nicht nur auf die wässrige Phase beschränkt. Ein bedeutender Teil des Versauerungspotentials in den zunächst trocken liegenden Kippen befindet sich im immobilen Porenwasser, am Ionenaustauscher und in Sekundärmineralen.

Der Begriff der Versauerung im Grundwasserbereich ist insofern mitunter missverständlich, weil die Pyritverwitterung zunächst gar nicht zu einer deutlichen Verringerung des pH-Wertes führen muss. Unter anaeroben Bedingungen liegt der pH-Wert infolge der basischen Eigenschaften der Eisen(II)-Ionen meist im schwach sauren Bereich zwischen pH \approx 5 und pH \approx 6. Eine Versauerung im Sinne einer

deutlichen pH-Wertabsenkung erfolgt erst bei der Belüftung des Wassers, bei der Oxidation des Eisen(II) zu Eisen(III) und bei den nachfolgenden Hydrolysereaktionen des Eisen(III)-Ions. Allein aus dem pH-Wert eines anaeroben Kippenwassers oder Grundwassers kann nicht auf die *Versauerungsneigung bei Belüftung* geschlossen werden. Zur Kennzeichnung der Versauerungsneigung eines anaeroben Wassers wurde deshalb von den Autoren bereits in den frühen Bearbeitungen für die LMBV der Begriff der *potentiellen Acidität bzw. potentiellen Alkalinität* eingeführt, siehe hierzu auch [LUA BB 1995].

Im Rheinischen Braunkohlerevier wird nach [Obermann u.a. 1991] der Abraum an Hand des Pyritschwefelgehaltes klassifiziert. Dabei wird *nicht versauerungsfähiges* und *versauerungsfähiges* Material unterschieden (vgl. <u>Tabelle 1</u>). Der versauerungsfähige Abraum wird weiter unterteilt in *versauerungsunempfindliches* und *versauerungsempfindliches* Material. Die Klassifizierung erfolgt aufgrund von Erfahrungswerten und berücksichtigt das natürliche Pufferpotential der Sedimente.

Tabelle 1: Geochemische Klassifizierung des Abraumes im Rheinischen Revier [Obermann u. a. 1993], [Eyll-Vetter 2007]

FeS ₂ -S [Masse-%]	0,	1 0,2				
Klassifizierung	nicht vorsouerungsfähig	versauerungsfähig				
Riassifizierung	nicht versauerungsfähig	versauerungsunempfindlich	versauerungsempfindlich			

Eine vergleichbare Einteilung der tertiären Sedimente ist im Mitteldeutschen und Lausitzer Revier nicht üblich.

2.2 Quellen der stofflichen Belastung

Im Braunkohlenbergbau können drei stoffliche Belastungsquellen infolge der Pyritverwitterung und der Versauerung unterschieden werden (<u>Bild 1</u> und <u>Tabelle 2</u>):

- (1) Innenkippen der Tagebaue
- (2) Außenhalden der Tagebaue
- (3) Grundwasserleiter, die von der Grundwasserabsenkung betroffen sind

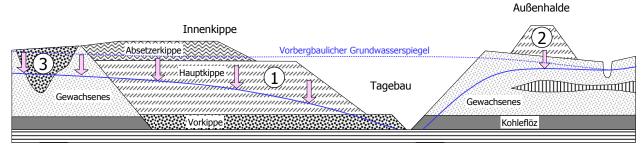


Bild 1: Lokalisierung der Pyritverwitterung und Versauerung in einem aktiven Braunkohlentagebau mit Förderbrückentechnologie

Der Umsatz der Pyritverwitterung in den belüfteten Bereichen der Innenkippen erfolgt in Abhängigkeit von der Liegezeit entweder bis zur Überdeckung mit Absetzerkippen oder bis zum Grundwasserwiederanstieg. Für die Sanierungstagebaue des Lausitzer Braunkohlenreviers wurden aufgrund fehlender Überdeckung und die über Jahrzehnte anhaltende Grundwasserabsenkung Verwitterungsraten zwischen 10 % und 50 % ermittelt [ARGE 2011]. Nach mehreren unabhängigen Untersuchungen kann in den Innenkippen der aktiven Lausitzer Braunkohlentagebaue der Vattenfall Europe Mining AG mit einer Umsatzrate der Pyritverwitterung im Mittel von 5 % bis 10 % des Pyrits bis zur Überdeckung mit den Absetzerkippen gerechnet werden, siehe dazu [BTU 1998], [TUBAF 1998], [Berger 2000], [IWB 2001b] u. a. Diese Befunde müssen durch eine geochemische Kippennacherkundung validiert werden. Im Unterschied zu den meisten Sanierungstagebauen werden die Innenkippen der aktiven Tagebaue in wesentlich kürzeren Zeiten mit Absetzerkippen überzogen und rekultiviert.

In den Außenhalden dominieren je nach der geologischen Konstellation der Braunkohlentagebaue pleistozäne Aufschlussmassen mit niedrigeren Pyritgehalten. Durch die dauerhafte Lage der Außenhalden über dem Grundwasserspiegel erfolgt die Pyritverwitterung hier jedoch hochgradig (50 %) bis vollständig (100 %).

Insbesondere die jüngeren pleistozänen Sedimente mit fluviatiler Genese, wie z. B. die Untere und Obere Talsandfolge (gfS3n; gfW) im Lausitzer Urstromtal, aber auch bestimmte holozäne Niedermoorbildungen enthalten Pyrit [Uhlmann u.a. 2011]. Der Pyritgehalt der klastischen pleistozänen Sedimente hat eine Größenordnung von 1 % bis 10% im Vergleich zu den tertiären Sedimenten. In den holozänen organogenen Moorbildungen werden stellenweise aber deutlich höhere Pyritgehalte als in den tertiären Sedimenten gemessen. Bei längerer Entwässerung der pleistozänen Sedimente oder der flachgründigen Niedermoore kann der absolute Verwitterungsumsatz des Pyrits eine vergleichbare Größenordnung wie in den überwiegend tertiären Mischbodenkippen der Tagebaue erreichen, wo Pyrit aufgrund der Überkippung nur anteilig verwittert (Tabelle 2).

Tabelle 2: Charakterisierung der Stoffeigenschaften

Quelle	Gehalt an Pyritschwefel	Umsatzrate des Pyrits	Zeitdauer der Verwitterung	
Innenkippe Massenanteilig tertiäres und quartäres Material, tertiäres Material überwiegend: 0,050,50 Masse-%		je nach Liegezeit der Kippen in den aktiven Braunkohlentagebauen der Lausitz anteilig etwa 5 % 10 %	bis zur Überdeckung mit Absetzerkippen oder bis zum Abschluss des Grundwasser- wiederanstiegs	
Außenhalde Massenanteilig tertiäres und quartäres Material, quartäres Material überwiegend: 0,020,20 Masse-%		Hoch bis vollständig: 50 % 100 %	erfolgt durch Lage über dem Grund- wasserspiegel langfristig bis zum vollständigen Umsatz	
Grundwasserleiter (belüftete Lamelle) im Absenkungstrichter	Überwiegend gering: 0,0020,05 Masse-%	Hoch bis vollständig: 50 % 100 %	während der bergbau- lichen Grundwasser- absenkung	



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften

2.3 Wirkungspfade und Schutzgüter

Im Unterschied zum aktiven Braunkohlenbergbau herrscht im Sanierungsbergbau überwiegend eine Emissionssituation. Die stoffliche Belastung des Grundwassers infolge der Pyritverwitterung und der Versauerung breitet sich über verschiedene Wirkungspfade aus und bedroht mittelbar oder unmittelbar verschiedene Schutzgüter. Als Transportpfade für die Ausbreitung der Produkte der Pyritverwitterung sind zu betrachten:

- die ungesättigte Bodenzone (spielt lediglich für die Außenhalden eine Rolle),
- das Grundwasser,
- die Standgewässer und
- die Fließgewässer.

Als Schützgüter werden betrachtet:

- der Boden,
- die Fließgewässer,
- die Standgewässer (Talsperren und Seen),
- das Grundwasser und
- Bauwerke.

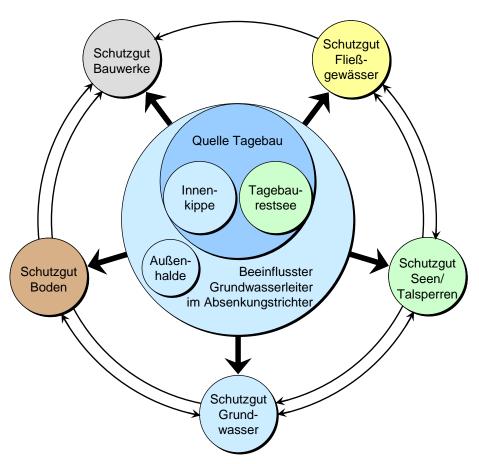


Bild 2: Darstellung der allgemeinen systemanalytischen Zusammenhänge von Quellen, Wirkungspfaden und Schutzgütern zum Problem der Pyritverwitterung und Versauerung in Braunkohlenbergbaugebieten

Zwischen den Quellen und den Schutzgütern lassen sich über die unmittelbaren und mittelbaren Transportpfade vernetzte Wirkungszusammenhänge darstellen (<u>Bild 2</u>). Solche Wirkungsbeziehungen sind in den nachfolgenden Abschnitten beispielhaft dargestellt.

Eine intensive systemanalytische Auseinandersetzung mit den hydrochemischen Folgen des Braunkohlenbergbaus und den komplexen Wirkungsbeziehungen zwischen Quellen, Transportpfaden und Schutzgütern erfolgte in [IWB 2010] im Rahmen der Untersuchungen zur Eisenbelastung in der Spree und in der Kleinen Spree. Die Wirkungsbeziehungen sind beispielhaft für den Untersuchungsausschnitt in <u>Bild 3</u> dargestellt. Die Wirkungen auf die Schutzgüter lassen sich nur durch konsequente Quantifizierung der Volumen- und Stoffströme darstellen. Auch die Bemessung von Maßnahmen ist auf die Kenntnis der quantitativen Zusammenhänge dringend angewiesen.

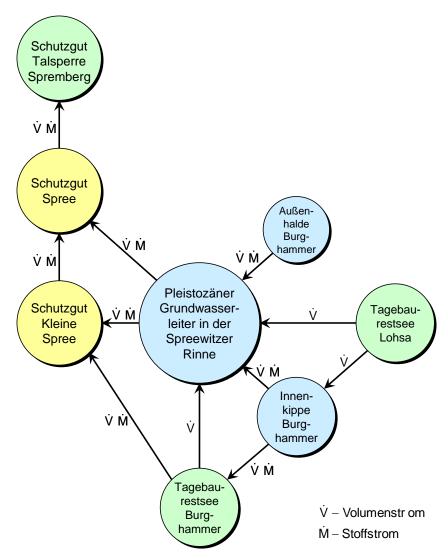


Bild 3: Maßgebende Quellen, Wirkungspfade und Schutzgüter im Zusammenhang mit der Eisenbelastung in der Spree und in der Kleinen Spree

2.4 Maßnahmen zur Verhinderung/Minderung der stofflichen Belastungen

Von [Drebenstedt 2009] wird zwischen "... primären, sekundären (auch "präventiven") und tertiären (auch "therapeutischen") Maßnahmen ..." gegen die Versauerung unterschieden. Diese sind inhaltlich wie folgt umrissen:

- Primäre Maßnahmen zielen darauf ab, den Kontakt der Eisensulfidminerale mit Sauerstoff und Wasser (im teilentwässerten Vorfeld vor dem eigentlichen Tagebau, [Hoth 2011]) zu verhindern
- Sekundäre Maßnahmen sollen den Anteil der potenziell verwitterbaren Eisensulfide während des Tagebaubetriebes minimieren
- Tertiäre Maßnahmen betreffen die Nachbehandlung von verwitterten Bereichen und versauertem Wasser mit dem Ziel der Anhebung des pH-Wertes

Unter primären Maßnahmen ist von [Drebenstedt 2009] im Folgenden (S. 6 der genannten Quelle) nur noch die Verhinderung des Zutritts von Sauerstoff in den Reaktionsraum durch Dichtwände und Schutzinfiltration gemeint. Damit wird dieser Maßnahmenkomplex auf den Absenkungstrichter der gewachsenen, den Tagebau umgebenden Grundwasserleiter beschränkt. Der o. g. Definition der Maßnahmen liegt im Wesentlichen die technologische Chronologie des Tagebaubetriebs (Absenkung, Tagebaubetrieb, Rekultivierung) zugrunde.

Diese Begrifflichkeit zu den Maßnahmen ist mit der seit langem eingeführten Begrifflichkeit zur Pyritverwitterung nicht kongruent (<u>Tabelle 3</u>). [Obermann & Wisotzky 1998] unterscheiden zwischen primärer und sekundärer Pyritverwitterung. Unter der primären Pyritverwitterung werden die Oxidation von pyritreichen Sedimenten bei der Vorfeldentwässerung, an den offen liegenden baggerseitigen Bermen und Böschungen im Tagebau, während des Transports der Sedimente im Tagebaubetrieb sowie an den offen liegenden kippenseitigen Bermen und Böschungen zusammengefasst. Die sekundäre Verwitterung bezeichnet die Oxidation der pyrithaltigen Kippensedimente von der fertiggestellten Kippenoberfläche aus.

Die o. g. Klassifikation der Maßnahmen in primäre, sekundäre und tertiäre beinhaltet vordergründig einen Zeitbezug zum Tagebau, stellt aber keinen Bezug der Pyritverwitterung zu Schutzgütern her. Sie beantwortet folglich nur die Frage, wie die Pyritverwitterung und die Kippenversauerung verhindert bzw. gemindert werden können, und nicht die Frage, ob die Pyritverwitterung und Kippenversauerung in jedem Einzelfall auch verhindert bzw. gemindert werden müssen. Nach der Lesart von [Drebenstedt 2009] wird damit das Kippenwasser in den Rang eines Schutzgutes gehoben.

Die hydrochemischen Auswirkungen des Braunkohlenbergbaus auf das Umfeld der Tagebaue wurden bislang zu wenig gewürdigt. Aus der Sicht der Bergschadensbewertung wurden die Auswirkungen bislang auf eine Absenkungslinie von 2 Meter um die Tagebaue begrenzt. Neue Untersuchungen, wie z. B. in [IWB 2010] zeigen, dass die umweltchemischen Auswirkungen der Pyritverwitterung diesen Bereich im Einzelfall deutlich überschreiten können.



Den Idealfall für die Gestaltung eines künftigen Braunkohlentagebaus hinsichtlich der Minimierung der wasserhaushaltlichen und stofflichen Auswirkungen auf das Umfeld stellt, zumindest im Lausitzer Braunkohlenrevier, eine umlaufende Dichtwand um das Abbaufeld dar. In diesem Fall beschränkt sich die notwendige Sümpfung lediglich auf die Entwässerung des eigentlichen Kohlefeldes. Das Umfeld des Tagebaus ist von der Sümpfung nur wenig betroffen. Nachbergbaulich sind aus den Kippen kaum stoffliche Emissionen über den Grundwasserpfad zu erwarten. Eine vorausschauende Minderung/Verhinderung der Pyritverwitterung und der Kippenversauerung sind in diesem Tagebau nicht erforderlich. Das Kippenwasser bleibt auf Dauer eingekapselt. Der natürliche oberirdische Gebietsabfluss aus der Tagebaukontur kann in einem speziell gestalteten oberen Grundwasserleiter unschädlich abgeführt oder bei Erfordernis behandelt werden.

Tabelle 3: Zusammenstellung der Begrifflichkeiten zur Pyritverwitterung und zu den Maßnahmen im Braunkohlenbergbau

	Umfeld	Vorfeld ←	- Tagebau ←	_	Kippe	/Halde	Tagebau- restsee	Umfeld
Stadium des		Aktiver 7	Гадеbau			Sanierungsbergbau		
Bergbaus		 	Förderbetrieb		Rekulti	vierung		
Verwitterungsraum		Primäre Pyritverwitterung Py			Sekundäre tverwitterung			
Wasserhaltung	Absenkung	Sümp	ofung			Grundwasser- wiederanstieg	Flutung	Grundwasser- wiederanstieg
Maßnahmen nach [Obermann 1991]			A-Maßnahmen zur Minimierung der primären Verwitterung)	B-Maßna Minderung/V des Schadst	erhinderung	
Maßnahmen nach [Drebenstedt 2009]		Primäre Maßnahmen	Sekundäre Maßnahmen		iäre ahmen			
Vorgeschlagene Maßnahmenpakete	Ta	agebaubegleite	baubegleitende Maßnahmen			Nachs	orgende Maßn	ahmen

Die Autoren schlagen deshalb eine Erweiterung des Betrachtungsrahmens für das ursprüngliche Thema der Kippenversauerung vor. Zumal in der vorliegenden Ausarbeitung Maßnahmen sowohl im Sanierungsbergbau als auch im aktiven Braunkohlenbergbau zu betrachten sind. Bei dem aktuell fortgeschrittenen Stand des Grundwasserwiederanstiegs im Sanierungsbergbau kann die Pyritverwitterung hier ohnehin nicht mehr verhindert bzw. gemindert werden. Hier können nur noch die Folgen der Pyritverwitterung gelindert werden. Es handelt sich folglich um nachsorgende Maßnahmen.

In die nachfolgenden Betrachtungen werden die Pyritverwitterung und die Versauerung in den Absenkungstrichtern der gewachsenen Grundwasserleiter in der Umgebung der Braunkohlentagebaue einbezogen. Des Weiteren wird die Betrachtung stärker in Richtung von Schutzgütern orientiert.

Ein Beispiel für eine systemanalytische Behandlung und konsequente Quantifizierung ist die Projektbearbeitung zur "Untersuchung der hydrochemischen und ökologischen Auswirkungen der Exfiltration von eisenhaltigem und saurem Grundwasser in die Kleine Spree und in die Spree. Teil 2: Maßnahmen" im Auftrag der LMBV [IWB 2010]. Die Unterlage strukturiert alle nach dem Stand der Technik und des Wissens bekannten Maßnahmen zur Verhinderung/Minderung des Eiseneintrages in die genannten Fließgewässer in folgende fünf Hauptkategorien (vgl. Bild 4):

- (A) Maßnahmen zur Verhinderung/Minderung der Stofffreisetzung in der Quelle
- (B) Maßnahmen zur Verhinderung/Minderung des Austrags aus der Quelle
- (C) Maßnahmen zur Verhinderung /Minderung der Ausbreitung auf dem Transportpfad von der Quelle zum Schutzgut
- (D) Maßnahmen zur Verhinderung/Minderung des Stoffeintrags in das Schutzgut
- (E) Maßnahmen zur Behandlung des beeinflussten Schutzgutes

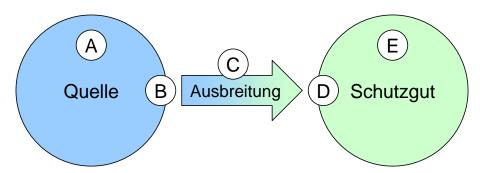


Bild 4: Verfahrenseinteilung für Maßnahmen zur Verhinderung/Minderung der Folgen der Kippenversauerung im Sanierungsbergbau

Als Quelle für die Eisenbelastung der Fließgewässer (= Schutzgut) kamen hier die Innenkippe des Tagebaus Burghammer, der pleistozäne Grundwasserleiter (Talsandfolge) in der Spreewitzer Rinne (ehemaliger Absenkungstrichter) und die Außenhalde des Tagebaus Burghammer in Betracht. Transportpfad war in allen drei Fällen der pleistozäne Grundwasserleiter in der Spreewitzer Rinne. Das Beispiel zeigt zugleich, dass Quelle und Transportpfad begrifflich auch zusammenfallen können.

Die Gliederung der Maßnahmen nach den Kategorien in <u>Bild 4</u> soll auf die Maßnahmen zur Verhinderung/Minderung der Wirkungen der Kippenversauerung im Sanierungsbergbau generell angewendet werden. Im Sanierungsbergbau entwickelt sich, vergleichbar der Altlastenproblematik, hauptsächlich eine Emissionssituation. Nach dem Grundwasserwiederanstieg ändert sich diese grundsätzliche Situation nicht mehr. Im aktiven Bergbau unterscheidet sich die Situation davon sehr stark. Aus hydraulischer und stofflicher Sicht dominiert im aktiven Braunkohlenbergbau eine Immissionssituation. Von den stofflichen Belastungen in Folge der Pyritverwitterung und Kippenversauerung ist zunächst hauptsächlich der Tagebau selbst betroffen. Deshalb sind hier andere Begrifflichkeiten und Zuordnungen von Maßnahmen erforderlich.

Eine erste systemanalytische Annäherung an das Problem der Kippenversauerung im aktiven Braunkohlenbergbau wurde von den Autoren in der Bearbeitung "Erfüllung von Nebenbestimmungen zur wasserrechtlichen Erlaubnis zum Tagebau Welzow-Süd. Teil 1: Maßnahmen zur Minderung/Vermeidung der Kippenversauerung bzw. ihrer Folgen" im Auftrag der VEM [IWB 2009] beschritten. Als Weiterentwicklung dieser Arbeiten werden die Maßnahmenkategorien im aktiven Bergbau wie folgt benannt:

- (A) Maßnahmen zur Verhinderung/Minderung der Stofffreisetzung in der Quelle (Tagebaukippe, Außenhalde, Absenkungstrichter)
- (B) Maßnahmen zur Verhinderung/Minderung der räumlichen Ausdehnung der Quelle (sinngemäß Barriere zwischen Tagebau und Umfeld)
- (C) Maßnahmen zur Verhinderung/Minderung der Stoffausbreitung
- (D) Maßnahmen zur Verhinderung/Minderung des Stoffeintrags in das Schutzgut (sinngemäß Barriere zum Schutzgut)
- (E) Maßnahmen zur Behandlung des beeinflussten Schutzgutes

Die Prozesse im Absenkungstrichter werden in der verwendeten Begrifflichkeit als erweiterte Quelle geführt, da sie mit dem Tagebaubetrieb in einem unmittelbaren Zusammenhang stehen (Bild 5).

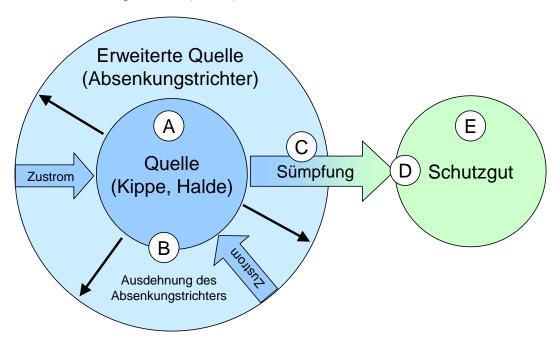


Bild 5: Grundlegende Verfahrenseinteilung für Maßnahmen zur Verhinderung/Minderung der Kippenversauerung und ihrer Folgen im aktiven Braunkohlenbergbau

Im aktiven Braunkohlenbergbau sind die stofflichen Auswirkungen auf die Umgebung zunächst vergleichsweise gering. Um gleichzeitig sowohl die gegenwärtigen als auch die zukünftigen Situationen systemanalytisch zu erfassen, ist es erforderlich, weitere Begriffe und Zusammenhänge einzuführen. Das erfolgt durch die Einführung von Schützgütern dreier Kategorien, die sich durch andersgeartete Betroffenheiten unterscheiden (vgl. <u>Bild 6</u>). Die Kategorien werden wie folgt abgegrenzt (<u>Tabelle 4</u>).

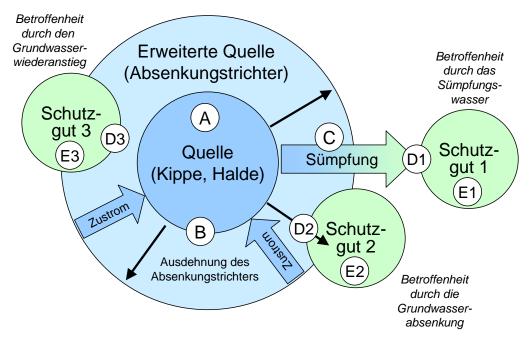


Bild 6: Erweiterte Verfahrenseinteilung für Maßnahmen zur Verhinderung/Minderung der Kippenversauerung und ihrer Folgen im aktiven Braunkohlenbergbau für die Schutzgüter

Tabelle 4: Kategorien der Schutzgüter in Hinblick auf die Beeinflussung der Wasserbeschaffenheit durch den aktiven Braunkohlenbergbau

Kategorie des Schutzgutes	Betroffenheit	Beispiele für Schutzgüter			
1	Direkte (meist stoffliche) Beeinflussung durch das Sümpfungswasser	 Fließgewässer (z. B. Spree, Pleiße) Standgewässer (z. B. TS Spremberg) Grundwassergebundene Landökosysteme (verschiedene FFH-Gebiete) Grundwasser (z. B. Wasserwerk Briesen) 			
2	Indirekte Beeinflussung durch die Grundwasser- absenkung	Grundwassergebundene Landökosysteme (verschiedene FFH-Gebiete)Grundwasser (Wasserfassungen)			
3	Künftige Beeinflussung durch Kippenwasser, Haldensickerwasser und Bergbaufolgeseen beim Grundwasser- wiederanstieg	 Fließgewässer Standgewässer Grundwasserabhängige Landökosysteme Grundwasser (Wasserfassungen) 			

Die Kategorie 3 des Schutzgutes im aktiven Braunkohlenbergbau ist identisch mit der Problemlage und der Maßnahmengliederung im Sanierungsbergbau (Bild 4). Hier wird der konzeptionelle Anschluss hergestellt. Die zunächst für den Sanierungsbergbau eingeführte systemanalytische Strukturierung stellt folglich nur einen Ausschnitt der gesamten Problemlage dar.

Schwerpunkt der Maßnahmen im aktiven Braunkohlenbergbau sind die Kategorien A, B und C, auf die sich die vorliegende Arbeit gemäß der Aufgabenstellung fokussieren wird. Maßnahmen der Kategorie A werden seit vielen Jahren in zahlreichen Projekten im Auftrag der Bergbauunternehmen bereits untersucht. Hierfür bietet sich in weitgehender Anlehnung an die Definition der primären, sekundären und tertiären Maßnahmen nach [Drebenstedt 2009] folgende weitere Untergliederung an (Bild 7):

- A1 Verfahren zur Verhinderung/Minderung der Pyritverwitterung im Vorfeld der Tagebaue
- A2 Verfahren zur Verhinderung/ Minderung der Pyritverwitterung während des Tagebaubetriebs
- А3 Verfahren zur Verhinderung /Minderung der Pyritverwitterung in der Kippe und in der Außenhalde

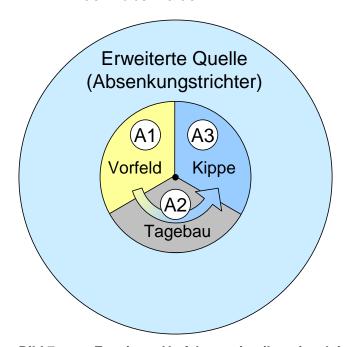


Bild 7: Erweiterte Verfahrenseinteilung im aktiven Braunkohlenbergbau für die Quelle

Tagebaubegleitende Maßnahmen fassen alle Maßnahmen zusammen, die im Tagebau durchgeführt werden können und geeignet sind, Pyritverwitterung bzw. ihr Auswirkungen auf aktuelle bzw. potentielle Schutzgüter einzudämmen. Diese müssen nicht zwingend in der Kippe selbst durchgeführt werden. Demgegenüber stehen nachsorgende Maßnahmen, die im Wesentlichen im Sanierungsbergbau Anwendung finden und den Schutz von betroffenen Schutzgütern vor den Folgen der bereits eingetretenen Kippenversauerung zum Ziel haben.

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften



3 Braunkohlenbergbau in Sachsen

der Braunkohle - Abschlussbericht

3.1 Aktiver Bergbau

3.1.1 Lausitzer Revier

Tagebau Nochten

Der Tagebau Nochten befindet sich südwestlich der Stadt Weißwasser und erschließt das gleichnamige Kohlefeld Nochten (Bild 8). Im Tagebau Nochten wird seit 1973 der 2. Lausitzer Flözhorizont und seit 2006 zusätzlich der 1. Lausitzer Flözhorizont abgebaut [VEM 2010]. Das 2. Lausitzer Flöz lagert in einer Tiefe von 65 bis 100 Meter und ist zwischen 9 und 15 Meter mächtig. Das 1. Lausitzer Flöz befindet sich in geringerer Tiefe zwischen 20 bis 40 Meter und weist eine Mächtigkeit von 2 bis 5 Meter auf. Die Lagerung der Braunkohleflöze ist im Wesentlichen eben. Ausnahmen bilden tektonische Grabenstrukturen, wie der Nochtener Graben und der Graben von Weißwasser, wo die Kohleflöze bis zu 30 Meter abgesenkt sind.

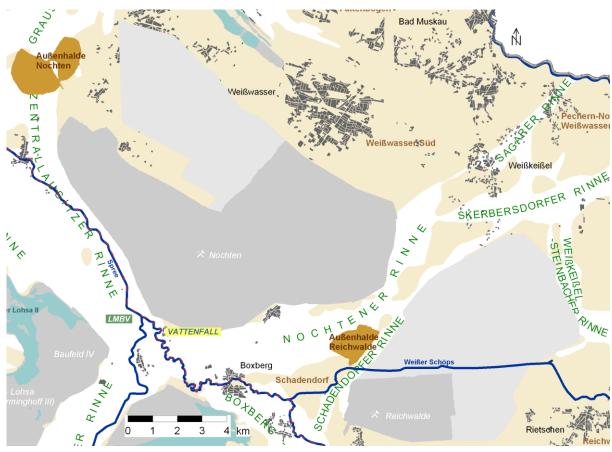


Bild 8: Übersichtskarte der Lausitzer Braunkohlentagebaue Nochten und Reichwalde (hellbraun: Kohlenfelder, dunkelgrau: in Anspruch genommene Abbauflächen, hellgrau: genehmigte Abbauflächen, braun: Außenhalden, blau: Bergbaufolgeseen)

Der über dem 1. LFH lagernde Vorschnitt besteht aus quartären und tertiären Sanden, Kiesen und Tonen (<u>Bild 10</u>). Das Vorschnittmaterial wird mit Schaufelradbaggern abgetragen, über Bandanlagen auf die Kippenseite des Tagebaus trans-

portiert und über Absetzer verkippt. Die zwischen 1. und 2. Lausitzer Flöz lagernden tertiären Schichten werden mit einer Abraumförderbrücke (AFB) vom Typ F 60 abgetragen (Bild 9). Diese besteht aus drei Eimerkettenbaggern und einer 600 Meter langen Bandbrücke, die das Abraummaterial auf die Kippenseite transportiert und hier über drei Abwürfen auf die Direktversturzkippe verkippt. Jährlich werden etwa 70 Mio. m³ Abraum mit der AFB verkippt [VEM 2010].

Auf Grund der AFB-Technologie besitzt die Innenkippe des Tagebaus Nochten einen dreigliedrigen Aufbau. An der Basis wird aus geotechnischen Gründen eine Vorkippe geschüttet, die überwiegend aus rolligem Material besteht. Die mittlere Mächtigkeit der Vorkippe beträgt 10 Meter. Darauf liegt die AFB-Kippe mit einer mittleren Mächtigkeit von etwa 50 Meter. Die AFB-Kippe wird aus drei Abwürfen geschüttet. In die AFB-Kippe gelangen quartäre und tertiäre Sedimente. Den Abschluss bildet die Absetzerkippe, die in der Regel aus zwei Abwürfen des Vorschnittmaterials besteht. Die Mächtigkeit der Absetzerkippe liegt zwischen 10 und 15 Meter.

Im Tagebau Nochten werden jährlich etwa 19 Mio. Tonnen Rohbraunkohle abgebaut. Die Kohleförderung erfolgt mit Schaufelradbaggern und Eimerkettenbaggern. Das Abraum-Kohle-Verhältnis liegt bei etwa 6,5 m³ Abraum pro Tonne Kohle [VEM 2010].

Die Tagebausümpfung erfolgt durch Rand-, Kippen- und Feldriegel, Hebergalerien, Dränagen und offene Wasserhaltungen sowie eine Streckenentwässerung. Derzeit werden etwa 115 Mio. m³/a Wasser im Tagebau Nochten gehoben [VEM 2010].

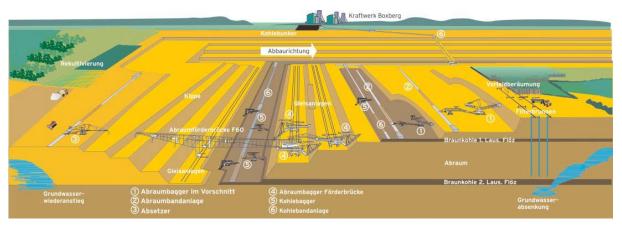
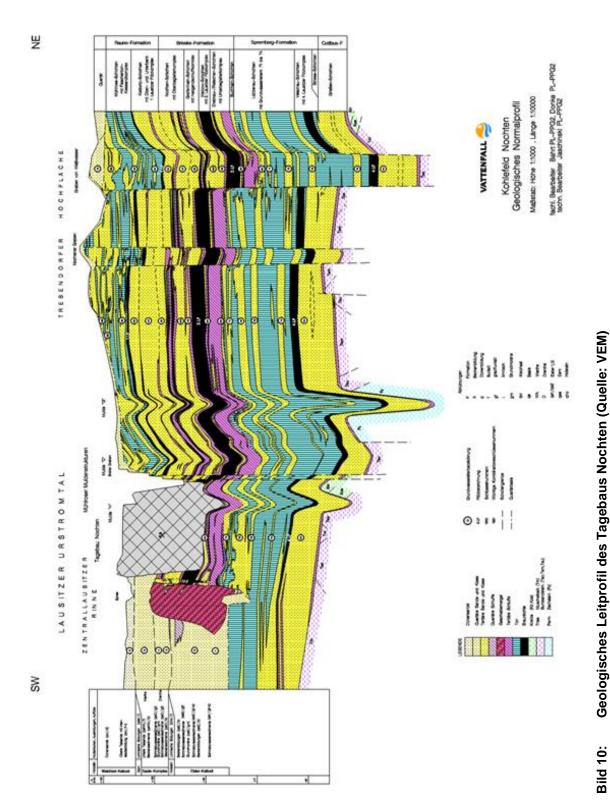


Bild 9: Schematische Darstellung der Kohle- und Abraumfördertechnologie im Tagebau Nochten [VEM 2010]

Das Sümpfungswasser des Tagebaus Nochten wird in den Grubenwasserbehandlungsanlagen Tzschelln und Schwarze Pumpe gereinigt. Die GWBA Tzschelln liegt auf der Innenkippe des Tagebaus. Hier wird ausschließlich Kippenwasser behandelt. Das gereingte Kippenwasser wird bei Sprey in die Spree eingeleitet. Das meiste Sümpfungswasser des Tagebaus Nochten wird über Gräben, umgewidmete Flussläufe und Rohrleitungen zur GWBA Schwarze Pumpe übergeleitet und hier behandelt. Das gereinigte Sümpfungswasser wird im Industriekomplex in Schwarze Pumpe über den Industriekanal bei Zerre in die Spree eingeleitet.



Geologisches Leitprofil des Tagebaus Nochten (Quelle: VEM)



Tagebau Reichwalde

Der Tagebau Reichwalde befindet sich südlich der Stadt Weißwasser am Südostrand des Lausitzer Braunkohlenreviers und erschließt die Kohlenfelder Reichwalde-Süd und Reichwalde-Nord. Im Tagebau wird mit Unterbrechungen seit 1987 das 2. Lausitzer Braunkohleflöz abgebaut. Das 2. Lausitzer Flöz lagert in einer Tiefe bis 85 Meter und weist eine Mächtigkeit zwischen 9 und 12 Meter auf. Es fällt von Südosten nach Nordwesten ein (Bild 12).

Die Freilegung der Braunkohle erfolgt mit einer Abraumförderbrücke vom Typ F 60, bestehend aus zwei Eimerkettenbaggern und einer 450 Meter langen Bandbrücke, die das Abraummaterial über drei Abwürfe auf der Kippenseite des Tagebaus verstürzt (Bild 11). Die Kohleförderung erfolgt im Tagebau Reichwalde mit Schaufelradund Eimerkettenbaggern [VEM 2008]. Der Kippenaufbau im Tagebau Reichwalde gleicht auf Grund der Anwendung der Förderbrückentechnologie dem Kippenaufbau im Tagebau Nochten.

Der Tagebau Reichwalde war von 1999 bis 2011 gestundet. Bei Wiederaufnahme der Kohleförderung ist im Regelbetrieb eine Abbauleistung von ca. 10 bis 11 Mio. Tonnen pro Jahr vorgesehen. Das Abraum-Kohle-Verhältnis beträgt etwa 6 m³ Abraum pro Tonne Braunkohle [VEM 2008].

Die kippenseitige Sümpfung des Tagebaus erfolgt durch Filterbrunnen (Kippenriegel) und Dränagen. Im Vorfeldbereich des Tagebaus Reichwalde werden Rand- und Feldriegel zur Entwässerung genutzt. Aktuell werden jährlich rund 60 Mio. m³ Grundwasser zur Trockenlegung des Tagebaus gehoben.

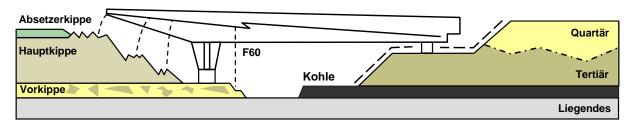
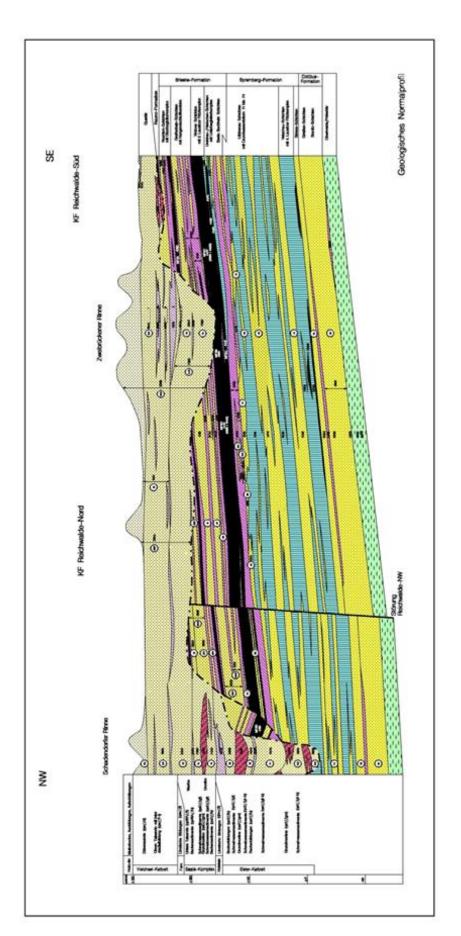
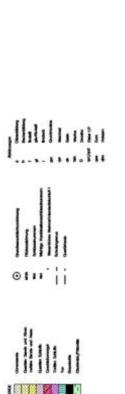


Bild 11: Schematische Darstellung der Tagebautechnologie und des Kippenaufbaus im Tagebau Reichwalde

Das Sümpfungswasser des Tagebaus Reichwalde wird in der Grubenwasserbehandlungsanlage Kringelsdorf gereinigt und in den Weißen Schöps eingeleitet. Der Weiße Schöps mündet nach etwa einem Kilometer in den Schwarzen Schöps. Der Schwarze Schöps mündet nach ca. 12 Kilometern in die Spree.





Kohlofeld Reichwalde Geologisches Normalproffi Metati: How 11000 , Unge 11000

VATTENPALL 🦺

Geologisches Leitprofil des Tagebaus Reichwalde (Quelle: VEM)

Bild 12:



3.1.2 Mitteldeutsches Revier

Tagebau Vereinigtes Schleenhain

Der Tagebau Vereinigtes Schleenhain befindet sich südlich von Leipzig zwischen der Pleiße und der Weißen Elster (Bild 13). Er umfasst die drei Abbaufelder Schleenhain, Peres und Groitzscher Dreieck. Im Tagebau werden das Böhlener Oberflöz, das Thüringer Hauptflöz, das Sächsisch-Thüringische Unterflöz und das Bornaer Hauptflöz abgebaut [MIBRAG 2010a]. Die Braunkohleflöze im Mitteldeutschen Braunkohlerevier sind älter als die Braunkohleflöze der Lausitz. Die Struktur der Braunkohleflöze ist durch syn- und postgenetische Subrosionsprozesse geprägt. Das führte in den Muldenstrukturen zum Teil zu sehr großen Flözmächtigkeiten. Das Sächsisch-Thüringische Unterflöz erreicht Mächtigkeiten bis 60 Meter.

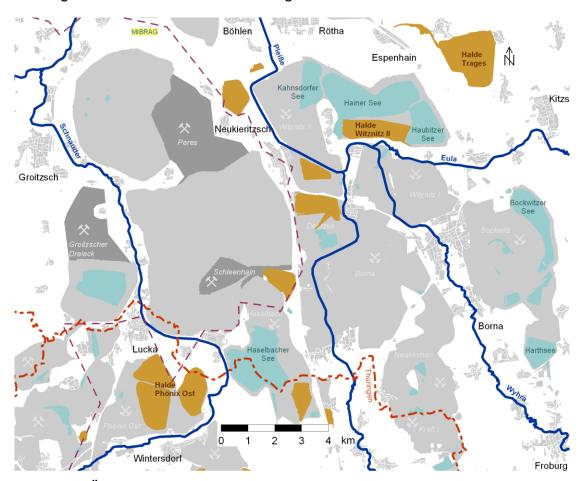
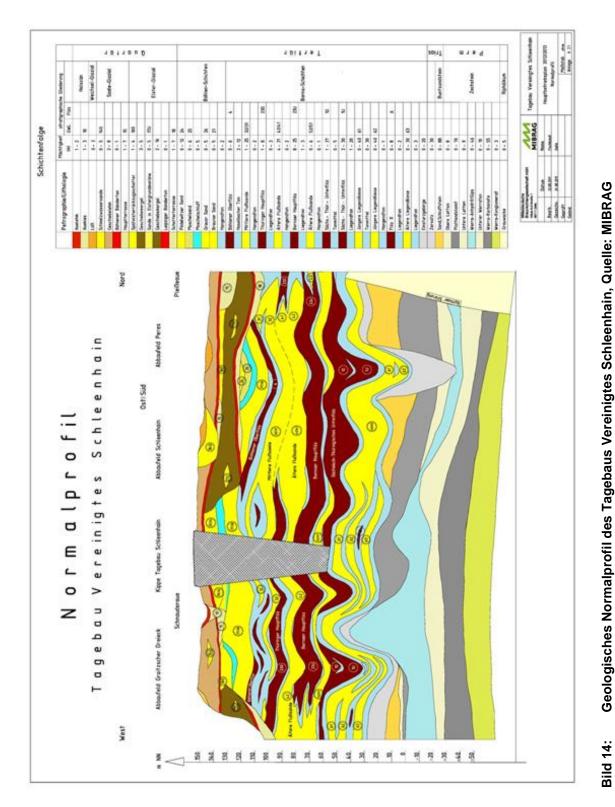


Bild 13: Übersicht über die sächsischen Braunkohlentagebaue der MIBRAG im Mitteldeutschen Revier - Raum Borna (dunkelgrau: aktuelle Abbauflächen, hellgrau: ausgekohlte Bereiche, braun: Außenhalden, blau: Bergbaufolgeseen)

Das Deckgebirge wird vorwiegend aus pleistozänen Ablagerungen der Elster- und Saalekaltzeit sowie aus tertiären Sanden gebildet (<u>Bild 14</u>). Die quartären Sedimente bestehen im Wesentlichen aus Schmelzwassersanden und karbonatreichen Geschiebemergeln. Die einzelnen Flözhorizonte sind durch tertiäre Sande und Tone getrennt. Zur Freilegung der Kohleflöze wird das quartäre und tertiäre Deckgebirge mit Schaufelradbaggern und Eimerkettenbaggern abgetragen (<u>Bild 15</u>).



Geologisches Normalprofil des Tagebaus Vereinigtes Schleenhain, Quelle: MIBRAG



Der Abraum wird über Bandanlagen zur Kippenseite des Tagebaus transportiert und in zwei Absetzerkippen verstürzt. Die zwei Kippen setzen sich jeweils aus einer Tiefschüttung und einer Hochschüttung zusammen (Bild 15). Die quartären Sande und Geschiebemergel gelangen im Wesentlichen in die Hochschüttung der obersten Kippe (2. Kippe). Der gesamte Kippenaufbau wird durch eine ca. 3 Meter mächtige Kulturbodenschicht abgeschlossen, die aus quartären Sedimenten und Mutterboden besteht. Jährlich werden etwa 25 bis 30 Mio. m³ Abraum verkippt [MIBRAG 2010a].

Seit der Wiederinbetriebnahme des Tagebaus Vereinigtes Schleenhain im Jahr 1999 werden jährlich 10 bis 11 Mio. Tonnen Braunkohle in sieben Gewinnungsebenen gefördert. Die Kohleförderung erfolgt mit Schaufelradbaggern, Eimerkettenbaggern und mobilen Löffelbaggern. Im Mitteldeutschen Revier findet sich gegenüber den Lausitzer Tagebauen ein günstigeres Abraum-Kohle-Verhältnis. Bei der Förderung von einer Tonne Kohle fallen etwa 2,9 m³ Abraum an [MIBRAG 2010a].

Zur Tagebauentwässerung werden in den drei Abbaufeldern aktuell etwa 35 bis 40 Mio. m³ Grundwasser gehoben [MIBRAG 2010a]. Die Sümpfung des Tagebaus erfolgt durch Filterbrunnen (Randriegelbrunnen) und offene Wasserhaltungen. Kippenseitig dienen im Abbaufeld Peres auch Dränagen der Entwässerung. Das Sümpfungswasser der Abbaufelder Schleenhain und Groitzscher Dreieck wird in der Grubenwasserreinigungsanlage Neukieritzsch gereinigt und in die Pleiße geleitet. Das über Dränagen getrennt gefasste Kippenwasser im Abbaufeld Peres (derzeit ca. 1 m³/min) wird mit Hilfe einer Kalkdosierungsanlage in situ behandelt und gelangt zusammen mit dem Filterbrunnenwasser des Abbaufeldes Peres (derzeit ca. 12 m³/min) in die Schnauder und in den Rietzschkegraben. Der Rietzschkegraben entwässert über die Schnauder in die Weiße Elster.

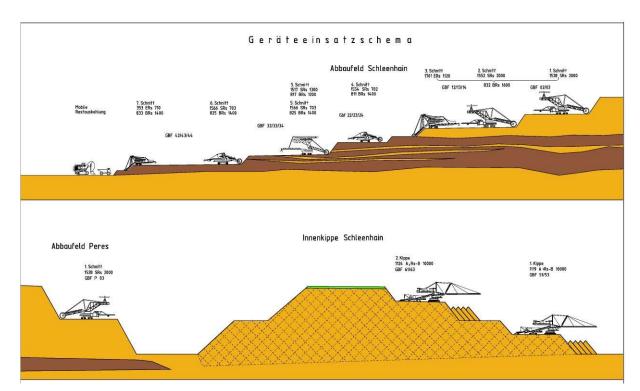


Bild 15: Schema der Abbau- und Verkippungstechnologie im Tagebau Vereinigtes Schleenhain (Quelle: MIBRAG)

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften



3.2 Sanierungsbergbau

der Braunkohle - Abschlussbericht

3.2.1 Lausitzer Revier

Die Sanierungstagebaue des Lausitzer Reviers werden von der LMBV in so genannte Monitoringbereiche gegliedert:

- O1 Bärwalde-Lohsa-Burghammer
- O2 Scheibe-Spreetal-Bluno
- O3 Erweiterte Restlochkette-Laubusch
- O5 Berzdorf

Monitoringbereich O1 (Bärwalde-Lohsa-Burghammer)

Der Monitoringbereich O1 umfasst die Sanierungstagebaue, die sich geographisch etwa zwischen der Kleinen Spree, der Spree und dem Schwarzen Schöps einordnen (<u>Bild 16</u>). Von Südost nach Nordwest folgend sind dies die ehemaligen Tagebaue Bärwalde, Werminghoff II und III (Lohsa), Dreiweibern und Burghammer. Die wesentlichen Kennzahlen dieser Sanierungstagebaue sind in der <u>Tabelle 5</u> dargestellt.

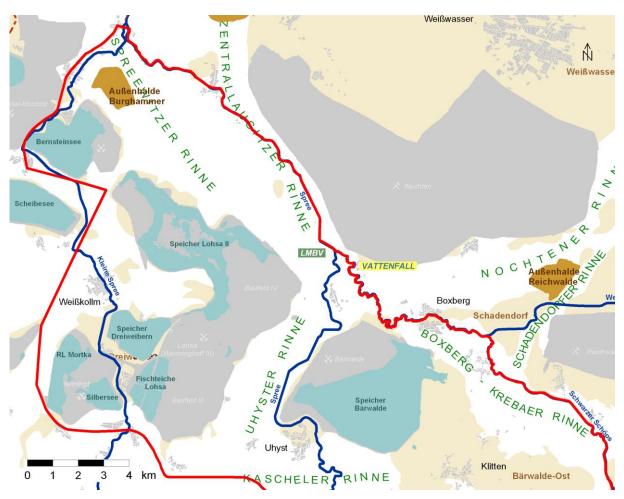


Bild 16: Übersicht des ostsächsischen Monitoringbereiches O1 der LMBV (hellbraun: tertiäre Kohlenfelder, grau: ausgekohlte Flächen, braun: Außenhalden, blau: Bergbaufolgeseen)



Tabelle 5: Kennzahlen der ehemaligen Tagebaue im Monitoringbereich O1 (Quellen: [LMBV 2008b], [LMBV 2008c], [LMBV 2010e])

Tagebau	Tagebau Einheit Bärwalde Werming- Lohsa II Drei- Burg-										
rayenau	cilineit	Bärwalde	Werming- hoff II	LUIISA II	weibern	Burg- hammer					
Betriebsdauer		1973-1992	1935-1960	1950-1984	1981-1989	1959-1973					
Deckgebirgs- mächtigkeit	m	30-45		40	30	bis 50					
Mittlere Flöz- mächtigkeit	m	12	10	8	7	8-16					
Kohle- förderung	Mio. t	190	50	300	14	70					
Abraum bewegung	Mio. m³	690	150	1.200	90	260					
Technologie der Abraum- bewegung		Eimerketten- bagger mit AFB	Eimerketten- bagger mit AFB (ab1946)	Eimerketten- bagger mit AFB	Schaufelrad- bagger- Absetzer- Kombination (DVKi)	Eimerketten- bagger mit AFB (ab 1963)					
Abraum- Kohle- Verhältnis	m³/t	3,6	2,9	4,0	6,4	3,7					
Land- inanspruch- nahme	ha	2.000	750	4.000	300	860					
Entwässerungs- technologie		Filter- brunnen	Strecken	Strecken, Filter- brunnen (ab 1963)	Filter- brunnen	Strecken, Filter- brunnen (ab 1967)					
Bergbau- folgesee		Speicher Bärwalde	Speicher Lohsa I mit Teilbecken RL Mortka und Silber- see	Speicher Lohsa II	Speicher Dreiweibern	Bernsteinsee					
Flutungs- zeitraum		1997-2009	1971-1972	1997-2014	1196-2002	1997-2009					
Flutungs- wasser		Spree, Schwarzer Schöps, Dürrbacher Fließ, Schulen- burgkanal	Kleine Spree	Spree	Kleine Spree	Kleine Spree					
Seefläche im Endzustand	ha	1.299	360	1.081	286	482					
Seevolumen im Endzustand	Mio. m³	173	4	97	35	35					
Besonder- heiten						bis 1997 Ein- spülung von Kraftwerks- asche, Kohletrübe und EHS					

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften



Monitoringbereich O2 (Scheibe-Spreetal-Bluno)

der Braunkohle - Abschlussbericht

Der Monitoringbereich O2 umfasst die Tagebaue, die zwischen der Kleinen Spree, der Kleinpartwitzer Rinne, der Bahnsdorf-Blunoer Rinne und der Schwarzen Elster liegen (Bild 17). Im Einzelnen sind das von Süden nach Norden die ehemaligen Braunkohlentagebaue Werminghoff I, Scheibe, Spreetal-Nordost, Spreetal und Bluno. In der Tabelle 6 sind die wesentlichen Kennzahlen der ehemaligen Tagebaue zusammengefasst.

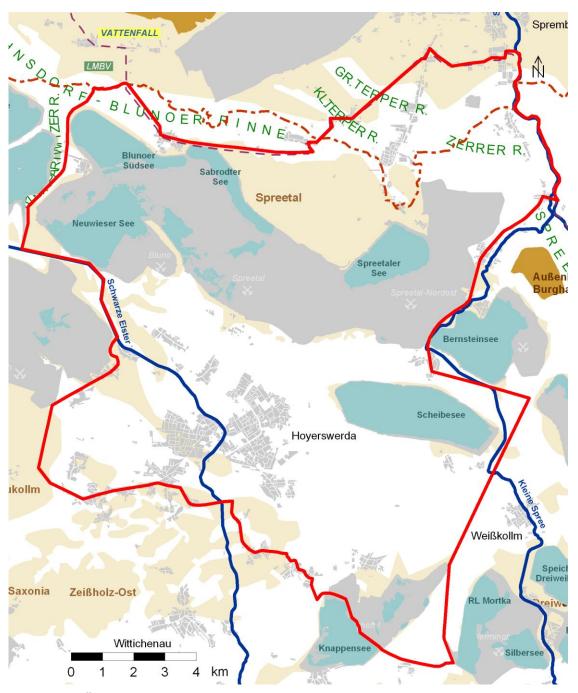


Bild 17: Übersicht des ostsächsischen Monitoringbereiches O2 der LMBV (hellbraun: tertiäre Kohlenfelder, grau: ausgekohlte Flächen, braun: Außenhalden, blau: Bergbaufolgeseen)

Tabelle 6: Kennzahlen der ehemaligen Tagebaue im Monitoringbereich O2 (Quellen: [BTU 2003a], [BTU 2006a], [LMBV 2011a], [LMBV 2008b])

[LMBV 2008b])										
Tagebau	Einheit	Werming- hoff I	Scheibe	Spreetal- Nordost	Spreetal	Bluno				
Betriebsdauer		1913-1945	1984-1996	1981-1991	1915-1983	1955-1968				
Deckgebirgs- mächtigkeit	m		40	45	37	37				
Mittlere Flöz- mächtigkeit	m	10	10	11	9	9				
Kohle- förderung	Mio. t	60	55	35	400	45				
Abraum- bewegung	Mio. m³	120	230	190	1.700	180				
Technologie		Eimerketten- bagger mit AFB (ab 1929)	Schaufelrad- bagger, Eimerketten- bagger	Schreit- bagger (Vorschnitt), Eimerketten- bagger, Schaufelrad- bagger	Eimerketten- bagger, Schaufelrad- bagger, ab 1959 AFB	Schaufelrad- bagger, Eimerketten- bagger				
Abraum- Kohle- Verhältnis	m³/t	2,1	4,2	5,4	4,3	4,0				
Land- inanspruch- nahme	ha	780	760	360	4.300	500				
Entwässerungs- technologie		Strecken	Filter- brunnen	Filter- brunnen	Strecken und Filter- brunnen (ab1969)	Schacht				
Bergbau- folgesee		a) Knappen- see b) Graureiher- see (Rest- loch D/F)	Scheibe See	Spreetaler See	a) Blunoer Südsee b) Sabrodter See c) Bergener See	Neuwieser See				
Flutungs- zeitraum		a) 1945- 1946 b) 2013-	2002-2012	1998-2015	a) 2005- 2015 b) 2006- 2015 c) bis 2015	2002-2015				
Flutungs- wasser		a) Schwarz- wasser b) bis 2004 Oberflächen- wasser	Kleine Spree	gereinigtes Gruben- wasser aus Welzow und Nochten	a) Grund- wasser- anstieg b) Spree c) Grund- wasser- anstieg	Schwarze Elster				

Tagebau	Einheit	Werming- hoff I	Scheibe	Spreetal- Nordost	Spreetal	Bluno
Seefläche im Endzustand	ha	a) 280 b) 140	680	310	a) 350 b) 140 c) 130	630
Seevolumen im Endzustand	Mio. m ³	a) 19 b) 5	110	100	a) 60 b) 30 c) 3	60
Besonder- heiten		b) bis 1997 Einspülung von Kohletrübe, Asche, Schlacke, Industrie- und Hausmüll		Einspülung EHS		

Monitoringbereich O3 (Erweiterte Restlochkette-Laubusch)

Dem Monitoringbereich O3 sind die Tagebaue Heide V, Laubusch, Koschen und Skado zugeordnet (<u>Bild 18</u>). Die Bergbaufolgeseen der beiden Tagebaue Skado und Koschen bilden zusammen mit dem Sedlitzer See (Brandenburg) die so genannte Restlochkette Sedlitz-Skado-Koschen. Die <u>Tabelle 7</u> gibt einen Überblick über die Kennzahlen der ehemaligen Tagebaue Laubusch, Koschen und Skado.

Der Tagebau Heide mit den Kohlefeldern I bis VI liegt überwiegend auf brandenburgischem Territorium und gehört zum Monitoringbereich B3. Das Teilfeld Heide V liegt überwiegend auf sächsischem Terrain. Infolge der Nutzung dieses Restloches als industrielles Absetzbecken zur Verbringung von Restlaugen der Aluminiumproduktion durch die ehemaligen Lautawerke erfolgt die Sanierung in Regie der Gesellschaft zur Entwicklung und Sanierung von Altstandorten mbH (GESA).

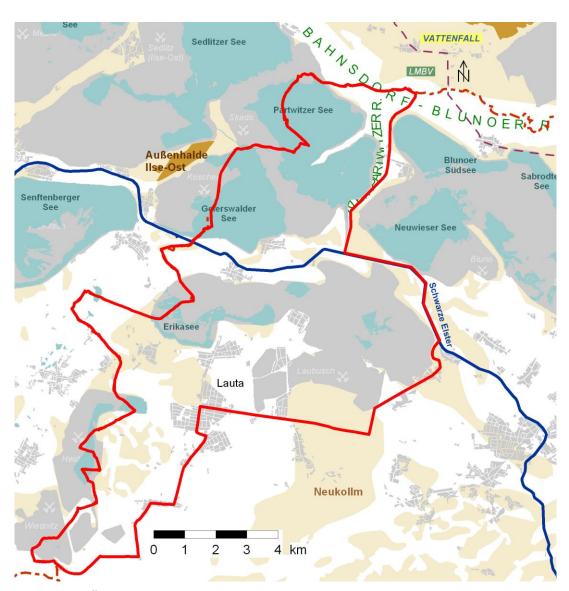


Bild 18: Übersichtskarte des ostsächsischen Monitoringbereiches O3 der LMBV (hellbraun: tertiäre Kohlenfelder, grau: ausgekohlte Flächen, braun: Außenhalden, blau: Bergbaufolgeseen)

Tabelle 7: Kennzahlen der Tagebaue im Monitoringbereich O3, Quellen: [BTU 2010], [LMBV 2007], [LMBV 2009b]

Tagebau	Einheit	Laubusch	Skado	Koschen
Betriebsdauer		1914-1962	1940-1977	1955-1972
Deckgebirgs- mächtigkeit	m	30	40-50	35
Mittlere Flöz- mächtigkeit	m	10	10-13	8-11
Kohleförderung	Mio. t	40	240	85
Abraum- bewegung	Mio. m³	140	770	260



Seite 37

Tagebau	Einheit	Laubusch	Skado	Koschen
Technologie		Eimerkettenbagger mit AFB	Eimerkettenbagger mit AFB	Eimerkettenbagger mit Absetzer
Abraum-Kohle- Verhältnis	m³/t	3,5	3,2	3,1
Land- inanspruch- nahme	ha	2.300	2.000	900
Entwässerungs- technologie		Strecken, Filterbrunnen	Strecken	Strecken
Bergbau- folgesee		a) Erika-See b) Lugteich c) Kortitzmühler See	Partwitzer See	Geierswalder See
Flutungs- zeitraum		a) bis 1970 b) 2010-2014 c) bis 2016	2004-2012	2004-2012
Flutungs- wasser		a) Schleichgraben, Grubenwasser, Aschespülwasser b) Schwarze Elster c) gereinigtes Grubenwasser aus Spreetal, Skado und Bluno	Überleitung Geierswalder See	Schwarze Elster
Seefläche im Endzustand	ha	a) 150 b) 100 c) 30	1.100	640
Seevolumen im Endzustand	Mio. m³	a) 8,0 b) 3,0 c) 1,4	130	100
Besonder- heiten		a) Flusskläranlage, Einleitung von Asche, EHS sowie kommunale und industrielle Abwässer b) Einleitung kommunaler Abwässer der Stadt Hoyerswerda c) Einleitung EHS		

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften



Monitoringbereich O5 (Berzdorf)

der Braunkohle - Abschlussbericht

Das Gebiet des ehemaligen Tagebaus Berzdorf südlich von Görlitz stellt den Monitoringbereich O5 der LMBV dar (<u>Bild 19</u>). Im Unterschied zu den Braunkohlenlagerstätten im Lausitzer Urstromtal weist die Kohlelagerstätte einen komplizierten Flözaufbau auf. Durch die Bildung innerhalb des Berzdorfer Beckens ist der Flözkomplex mächtiger, jedoch in seiner Ausdehnung begrenzt.

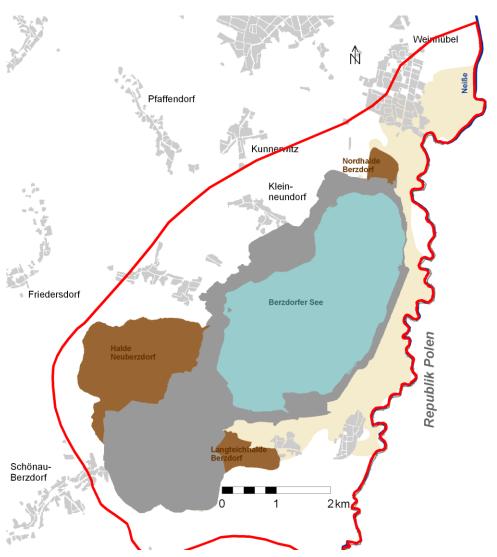


Bild 19: Übersicht des ostsächsischen Monitoringbereiches O5 der LMBV (hellbraun: tertiäre Kohlenfelder, grau: ausgekohlte Flächen, braun: Außenhalden, blau: Bergbaufolgeseen)

Die wichtigsten Kennzahlen des Tagebaus Berzdorf sind in der <u>Tabelle 8</u> zusammengestellt.

Tabelle 8: Kennzahlen des Tagebaus Berzdorf im Monitoringbereich O5 (Quelle: [LMBV 2010f])

(ddene. [Line v Zoror])					
Tagebau	Einheit	Berzdorf			
Betriebsdauer		1946-1997			
Deckgebirgsmächtigkeit	m	50-80			
Flözmächtigkeit	m	bis 80			
Kohleförderung	Mio. t	310			
Abraumbewegung	Mio. m ³	660			
Technologie		Eimerkettenbagger, Schaufelradbagger mit Absetzer			
Abraum-Kohle-Verhältnis	m³/t	2,2			
Landinanspruchnahme	ha	2.000			
Entwässerungstechnologie		Strecken, Filterbrunnen			
Bergbaufolgesee		Berzdorfer See			
Flutungszeitraum		2002-2012			
Flutungswasser		Neiße Pließnitz			
Seefläche im Endzustand	ha	970			
Seevolumen im Endzustand	Mio. m³	330			
Besonderheiten		unkontrollierte Flutung durch Hochwasser im Jahr 2010			

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften

3.2.2

Mitteldeutsches Revier

der Braunkohle - Abschlussbericht

Südraum Leipzig

Neben den aktiven Braunkohlentagebauen Vereinigtes Schleenhain und Profen im Südraum von Leipzig gibt es eine Vielzahl ehemaliger Tagebaue. Direkt südlich von Leipzig befinden sich die ehemaligen Tagebaue Espenhain, Böhlen, Zwenkau und Cospuden (Bild 20). Die Kennzahlen dieser Tagebaue sind in der Tabelle 9 zusammengefasst.

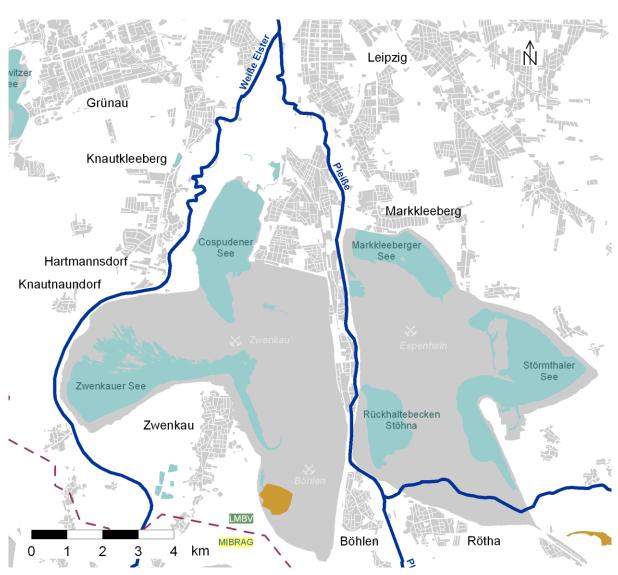


Bild 20: Übersicht über die mitteldeutschen sächsischen Sanierungstagebaue südlich von Leipzig (grau: ausgekohlte Flächen, braun: Außenhalden, blau: Bergbaufolgeseen)

Tabelle 9: Kennzahlen der ehemaligen Braunkohlentagebaue südlich von Leipzig (Quellen: [LMBV 2010a], [LMBV 2010b])

Tagebau	Einheit	Espenhain	Böhlen/Zwenkau	Cospuden
Betriebsdauer		1937-1996	1921-1999	1981-1990
Deckgebirgs- mächtigkeit	m	40	30-35	30-40
Mittleter Flöz- mächtigkeit				
Böhlener Oberflöz	m	8	4-10	8-12
Bornaer Hauptflöz	m	7,5	18	2-10
Kohleförderung	Mio. t	570	590	30
Abraumbewegung	Mio. m³	1.700	1.450	90
Technologie		Eimerkettenbagger mit AFB	Eimerkettenbagger mit AFB	Schaufelradbagger, Eimerkettenbagger mit Absetzer
Abraum- Kohle- Verhältnis	m³/t	3,0	2,5	2,6
Land- inanspruch- nahme	ha	4.000	3.600	320
Entwässerungs- technologie		Strecken, Filterbrunnen	Strecken, Filterbrunnen	Filterbrunnen
Bergbau- folgeseen		a) MarkkleebergerSeeb) Störmthaler See	Zwenkauer See	Cospudener See
Flutungs- zeitraum		a) 1999-2012 b) 2003-2012	2007-2014	1993-2000
Flutungs- wasser		Sümpfungswasser aus Tgb. Profen und Tgb. Vereinigtes Schleenhain	Sümpfungswasser aus Tgb. Profen Weiße Elster	Sümpfungswasser aus Tgb. Zwenkau und Profen
Seefläche im Endzustand	ha	a) 250 b) 730	960	440
Seevolumen im Endzustand	Mio. m³	a) 60 b) 160	170	110
Besonderheiten				

Weiter südlich von Leipzig in der Umgebung von Borna befinden sich die ehemaligen Braunkohlentagebaue Bockwitz, Borna-Ost, Kraft I, Neukirchen, Borna, Witznitz I und Witznitz II, Deutzen und Haselbach sowie zahlreiche weitere kleinere Tagebaue (<u>Bild 21</u>). Die Kennzahlen der größten Tagebaue Bockwitz, Borna, Witznitz und Haselbach sind in der <u>Tabelle 10</u> zusammengestellt.

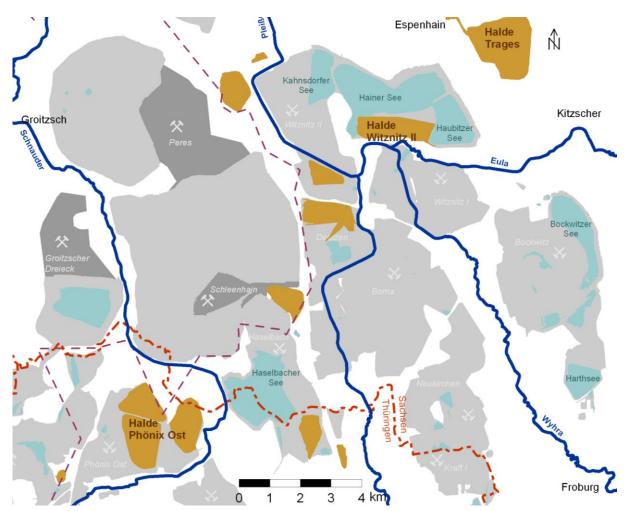


Bild 21: Übersicht über die mitteldeutschen sächsischen Sanierungstagebaue in der Umgebung von Borna (grau: ausgekohlte Flächen, braun: Außenhalden, blau: Bergbaufolgeseen)

Tabelle 10: Kennzahlen der ehemaligen Tagebaue in der Umgebung von Borna (Quellen: [LMBV 2010c], [LMBV 2010d], [LMBV 2011b])

Tagebau	Einheit	Bockwitz	Borna-Ost	Witznitz II	Haselbach
Betriebsdauer		1982-1992	1960-1985	1946-1993	1955-1977
Deckgebirgs- mächtigkeit	m	30-60	30-60	30-60	30-60
Flözmächtigkeit	m	12-25	12-25	12-25	12-25
Kohleförderung	Mio. t	10	100	260	130
Abraum- bewegung	Mio. m³	90	360	640	360
Technologie		Bagger mit Absetzer	Bagger mit Absetzer	Bagger mit Absetzer	Bagger mit Absetzer
Abraum-Kohle- Verhältnis	m³/t	7,5	3,6	2,5	2,8
Land- inanspruch- nahme	ha	240	1.270	1.890	1.020

Tagebau	Einheit	Bockwitz	Borna-Ost	Witznitz II	Haselbach
Entwässerungs- technologie		Filterbrunnen	Strecken, Filterbrunnen	Strecken, Filterbrunnen	Strecken
Bergbau- folgesee		Bockwitzer See	Harthsee	a) Kahnsdorfer See b) Haubitzer See c) Hainer See	Haselbacher See
Flutungs- zeitraum		1995-2004	1985-1999	a)1999-2013 b)1999-2010 c)1999-2010	1993-2002
Flutungs- wasser		Grundwasser- anstieg	Sümpfungs- wasser aus dem Tgb. Bockwitz	Sümpfungs- wasser aus Tgb. Profen und Tgb. Vereinigtes Schleenhain	Sümpfungs- wasser aus dem Tgb. Vereinigtes Schleenhain
Seefläche im Endzustand	[ha]	170	90	a) 130 b) 160 c) 410	340
Seevolumen im Endzustand	[Mio. m³]	20	5	a) 20 b) 30 c) 70	20
Besonderheiten					

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften



Nordraum Leipzig

Auf sächsischem Gebiet befinden sich im Nordraum von Leipzig die ehemaligen Braunkohlentagebaue Breitenfeld, Delitzsch, Holzweißig-West und Goitzsche (<u>Bild 22</u>). Die <u>Tabelle 11</u> gibt einen Überblick über die wesentlichen Kennzahlen dieser Tagebaue.

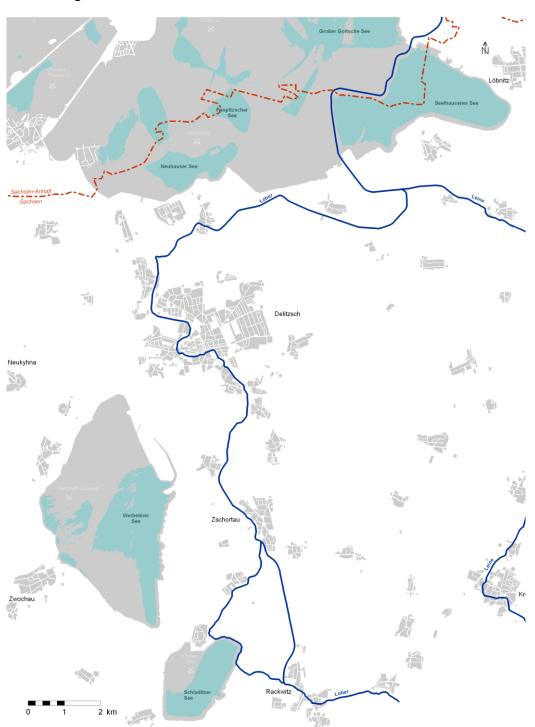


Bild 22: Übersicht der mitteldeutschen sächsischen Sanierungstagebaue im Nordraum von Leipzig (grau: ausgekohlte Flächen, braun: Außenhalden, blau: Bergbaufolgeseen)



Tabelle 11: Kennzahlen der Tagebaue im Mitteldeutschen Revier – Nordraum Leipzig (Quellen: [LMBV 2009a], [Nixdorf u. a. 2000], [www-1], [www-2])

Tagebau	Einheit	Breitenfeld	Delitzsch	Holzweißig- West	Goitzsche
Betriebsdauer		1982-1991	1975-1993	1958-1980	1949-1991
Deckgebirgs- mächtigkeit	m	k. A.	k. A.	12-15	30-40
Mittlere Flöz- mächtigkeit	m	k. A.	k. A.	15-18	10-12
Kohleförderung	Mio. t	7	93	90	320
Abraum- bewegung	Mio. m ³	70	350	260	830
Technologie		Schaufelrad- bagger mit Absetzer	Eimerketten- bagger mit AFB	Schaufelrad- und Eimerketten- bagger mit Absetzer	Schaufelrad- bagger mit Absetzer
Abraum- Kohle- Verhältnis	m³/t	9,4	3,8	2,9	2,6
Land- inanspruch- nahme	ha	360	1.430	830	4.080
Entwässerungs- technologie		Filterbrunnen	Filterbrunnen	k. A.	Filterbrunnen
Bergbau- folgesee		Schladitzer See	a) Werbeliner See b) Zwochauer See c) Grabschützer See	Neuhauser See	a) Großer Goitzsche See b) Seelhausener See
Flutungs- zeitraum		1999-2012	a) 1998-2010 b) 1998-2008 c) 1998-2015	k. A.	a) 1999-2002 b) 2000-2005
Flutungs- wasser		Grundwasser- anstieg	a) Weiße Elster b) Grund- wasseranstieg c) Neue Luppe	Grundwasser- anstieg	b) Mulde
Seefläche im Endzustand	ha	210	a) 450 b) 10 c) 100	170	a) 1.300 b) 630
Seevolumen im Endzustand	Mio. m³	25	a) 40 b) 1 c) 4	25	a) 210 b) 70
Besonderheiten					a) Flutung durch Hochwasser in 2002



4 Formierung der Kippenwasserbeschaffenheit

4.1 Kippenstruktur und Reaktionsräume

Die Pyritverwitterung im Tagebau wird zeitlich und räumlich als primäre und sekundäre Verwitterung unterschieden (<u>Kapitel 2.4</u>). Die primäre Verwitterung beginnt bereits während der Vorfeldentwässerung durch die Grundwasserabsenkung und dem damit verbundenen Kontakt der Sedimente mit dem atmosphärischen Luftsauerstoff. Weiterhin findet die Primärverwitterung an temporär freiliegenden Arbeitsflächen und Böschungen baggerseitig und kippenseitig im Tagebau statt. Sie endet kippenseitig mit der Überdeckung durch neu abgeworfenes Abraummaterial.

Die Belüftung des Abraums während der Grundwasserabsenkung, Abbaggerung und Verkippung ist technologisch unvermeidbar. Darüber hinaus ist der Umfang der primären Pyritverwitterung von der Expositionszeit an den temporären Bagger- und Kippenböschungen im Tagebau abhängig. Diese liegt in den Lausitzer Tagebauen mit Förderbrückentechnologie abhängig von der Fahrweise des Tagebaus zwischen wenigen Tagen (z. B. aktuell bearbeiteter Block im Parallelbetrieb, Strossenende im Schwenkbetrieb) und etwa 4 Monaten (Arbeitsebenen, drehpunktnahe Böschungen) (Tabelle 12).

Tabelle 12: Mittlere Expositionszeiten im Tagebau Welzow-Süd, nach [DGFZ 1999]

Fläche	Betriebsart	Teilbereich	Mittlere Expositionszeit
Bagger- und	Parallelbetrieb	aktuell bearbeiteter Block	0 bis 15 Stunden
Kippen- böschungen		nicht bearbeitete Blöcke	10 Tage
3	Schwenkbetrieb	äußerer drehpunktferner Block	2 Tage
		mittlerer Block	15 Tage
		innerer drehpunktnaher Block	30 bis 40 Tage
Arbeitsebenen	Parallelbetrieb		60 Tage
	Schwenkbetrieb		60 bis 110 Tage
Oberfläche der	Parallelbetrieb	3 bis 8 Jahre	
Förderbrücke	Schwenkbetrieb		8 bis 15 Jahre

Der überwiegende Anteil der Pyritverwitterung erfolgt in den Braunkohlentagebauen durch die sekundäre Verwitterung. Die sekundäre Pyritverwitterung findet durch Sauerstoffdiffusion über die langjährig exponierten Oberflächen der Hauptkippe und Randschlauchböschungen statt. Im Unterschied zu den nur temporär freiliegenden Arbeitsebenen und Kippenböschungen bleiben diese Flächen i. d. R. mehrere Jahre gegenüber dem Luftsauerstoff exponiert. Der atmosphärische Sauerstoff dringt durch diffusive und untergeordnet auch durch konvektive Transportprozesse über die Kippenoberfläche ein. Der ratenlimitierende Prozess für die Pyritverwitterung ist die Sauerstoffdiffusion (vgl. <u>Abschnitt 4.2.2</u>). Die sekundäre Pyritverwitterung endet deshalb i. d. R. erst mit der Abdeckung der Hauptkippenoberfläche durch ein pyritarmes oder ein pyritfreies Material der Absetzerkippe oder mit dem Grundwasseranstieg (<u>Bild 23</u>).

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften

kippe offen liegen und die Überdeckung mit der Absetzerkippe später erfolgt.

Für den Tagebau Nochten wurde in [IWB 2001b] der Umfang der Pyritverwitterung in einem Zeitfenster von 1995 bis 2001 bilanziert. Der Tagebau Nochten wurde in diesem Zeitfenster im Schwenkbetrieb um den Drehpunkt DP3 gefahren. In diesem Zeitfenster wurde ein Pyritumsatz durch primäre Verwitterung von 40 % bis 50 % und ein Pyritumsatz durch sekundäre Verwitterung von 50 % bis 60 % ermittelt (Bild 23). In den anderen Lausitzer Tagebauen sind die Relationen meist stärker zur sekundären Pyritverwitterung verschoben, weil dort größere Flächen der Direktversturz-

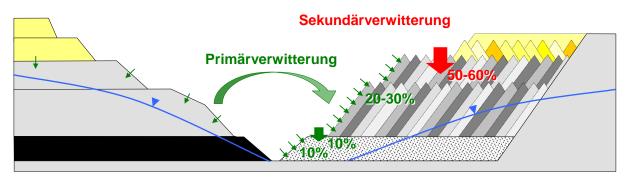


Bild 23: Reaktionsräume und relative Umsätze der Pyritverwitterung in den Lausitzer Braunkohlentagebauen mit Förderbrückentechnologie am Beispiel des Tagebaus Nochten

Im Mitteldeutschen Braunkohlenrevier erfolgt die Abraumgewinnung und -verkippung mittels Absetzer. Im Vergleich zur Förderbrückentechnologie hat diese wesentlich längere Expositionszeiten der Sedimente an den Kippenböschungen zur Folge. Im Unterschied zur Förderbrückentechnologie sind aber die Kippscheiben deutlich mächtiger und damit die Angriffsflächen geringer. Der hohe Anteil bindiger Substrate im Mitteldeutschen Revier im Vergleich zu den überwiegend sandigen Sedimenten des Lausitzer Reviers bremst die Geschwindigkeit der Verwitterung zusätzlich, da die Sauerstoffdiffusion auf Grund des geringeren Luftporenanteils deutlich verzögert ist.

Heterogenitäten

Die Abraumkippen weisen Heterogenitäten auf unterschiedlichen Skalenniveaus auf, die sich auf die räumliche Verteilung der hydraulischen Eigenschaften (rollige und bindige Substrate), der geochemischen Eigenschaften (Pyrit- und Carbonatminerale) und damit auch auf die Pyritverwitterung und den Stofftransport auswirken (Tabelle 13). Die Heterogenitäten sind einerseits durch das Abraummaterial und andererseits durch die Tagebautechnologie bedingt.

Die Strukturmerkmale mit dem größten Skalenniveau stellen die technologisch bedingten Heterogenitäten dar. Im Lausitzer Revier weisen die Innenkippen der Tagebaue beispielsweise einen dreigliedrigen Aufbau auf. Da die Vorkippe im Wesentlichen aus rolligem Material geschüttet wird, kann diese von allen Seiten gut von Wasser und Luft durchströmt werden. Demgegenüber sind die Durchlässigkeiten in der AFB-Kippe auf Grund der Mischung rolliger und bindiger Substrate deutlich geringer und liegen im Allgemeinen deutlich unter denen der Grundwasserleiter im Gewachsenen.

Tabelle 13: Kennzeichnung der Heterogenitäten in Braunkohleabraumkippen

Niveau der Heterogenität	typische Abmessungen in Meter
technologisch (Kippenstruktur: Vorkippe, Abwürfe der Hauptkippe, Absetzerkippen)	10>100
2) lithologisch-makroskalig (rollig vs. bindig vs. kohlig, Quartär vs. Tertiär vs. Mischboden)	10100
3) verkippungstechnisch: Schüttkegel in Vorkippen und Absetzerkippen	1030
4) verkippungstechnisch: Kippscheiben der Direktversturzkippe	0,33,0
5) lithologisch-mesoskalig (Tonbrocken, Kohlebrocken, Pyritknollen)	0,10,3
6) lithologisch-mikroskalig (Schluffbröckchen, Kohlepartikel, Pyritminerale)	< 0,01

In der Vorkippe, Förderbrückenkippe und Absetzerkippe bilden sich bedingt durch die typischen Schüttkegel spezifische Heterogenitäten heraus. An den Flanken der Schüttkegel kommt es durch das Abrollen und Abgleiten von Abraummaterial zu einer Korngrößenfraktionierung. Dadurch werden an der Basis der Kippe vorwiegend grobe Partikel angereichert. Zudem bildet sich innerhalb der Schüttkegel eine Schichtstruktur wodurch bevorzugt Wasserwegsamkeiten geneigte heraus, [Buczko 1999]. Nach [Seiler 2001] der durchschnittliche entstehen beträgt Böschungswinkel der AFB-Kippen der Lausitz 37°.

Die verschiedenen Kippscheiben der Direktversturzkippe stellen die verkippungstechnisch bedingten Heterogenitäten mit dem niedrigsten Skalenniveau dar. [Seiler 2001] führte an AFB-Kippen im Lausitzer Revier Berechnungen zu Schichtdicken einzelner Kippscheiben durch. Dabei wurden im Wesentlichen Schichtdicken im Bereich zwischen 10 und 50 cm ermittelt.

Lithologisch bedingte Heterogenitäten unterschiedlicher Skalenniveaus bilden sich durch die Geologie des Deckgebirges heraus. Makroskalige Heterogenitäten werden im Lausitzer Revier beispielsweise durch die Schüttung vorwiegend rolliger Sedimente in die Vorkippe hervorgerufen. Im Gegensatz dazu besteht die AFB-Kippe aus einem Mischboden, dessen Substratzusammensetzung in weiten Bereichen variieren kann. Im mitteldeutschen Revier treten makroskalige Heterogenitäten im Wesentlichen durch die Verkippung von quartärem Abraum in die Hochschüttung der obersten Absetzerkippe auf. Die Schüttungen der unteren Absetzerkippe bestehen ausschließlich aus tertiärem Material und weisen damit andere Eigenschaften auf.

Meso- und mikroskalige Heterogenitäten in den Kippen können z. B. durch die kleinräumige Verteilung kohliger, schluffiger oder pyrithaltiger Fragmente unterschiedlicher Größe verursacht werden. Diese Fragmente weisen deutlich andere bodenphysikalische und -chemische Eigenschaften auf, als die umgebende sandige Matrix. Die Größe und Verteilung der kohligen Fragmente beeinflussen die Freisetzung und den Transport gelöster Stoffe. Auch die Einarbeitung basischer Meliorationsmittel in den Oberboden führt zu Veränderungen der Eigenschaften gegenüber dem Unterboden [Wecker 2005].

Den Einfluss der ursprünglichen geologischen Verhältnisse in den Abraumsedimenten schätzt [Buczko 1999] für AFB-Kippen als relativ gering ein, da durch die Gewinnung mittels Eimerkettenbaggern eine weitgehend vollständige Durchmischung des Materials angenommen werden kann.

Durchlässigkeiten

Die hydraulische Durchlässigkeit der Kippen ist auf Grund der Durchmischung des Materials von gewachsenen Grundwasserleitern und -stauern (rolliges und bindiges Material) um mindetens eine Zehnerpotenz niedriger als in den gewachsenen Grundwasserleitern. Einen Überblick über die typischen wassergesättigten Durchlässigkeiten in den quartären und tertiären Grundwasserleitern im Vergleich zu den Kippen gibt die <u>Tabelle 14</u>.

Tabelle 14: Typische Durchlässigkeiten gewachsener Grundwasserleiter und Kippen in den Tagebauen (Quellen: LMBV, [Jordan & Weder 1995])

ragebaden (wdenen: Linbv, [Jordan & Weder 1993])				
Tagebau	Gewachsenes der K	ohlefelder	Kippen	der Tagebaue
	Grundwasserleiter	Typische k _f -Werte in m/s	Kippe	Typische k _f -Werte in m/s
Lausitzer Revier	G100	1·10 ⁻⁴ 1·10 ⁻³	DVK	1·10 ⁻⁵ 5·10 ⁻⁴
	G410	1.10-4		
	G500 u. G600	1.10-4		
Mitteldeutsches Rev	ier			
Südraum	G1.5 (Hauptterrassenschotter)	1.10 ⁻³	Absetzer- kippe	1·10 ⁻⁶ 1·10 ⁻⁵
	G2.4/2.2 (Thierbacher Schichten)	39·10 ⁻⁴		
	G2.5 (Pödelwitzer Sande)	1.10 ⁻⁵ 5·10 ⁻⁴		
	G4/5-Komplex	29·10 ⁻⁴		
	G5	4·10 ⁻⁴		
	G6	1·10 ⁻⁴ 1·10 ⁻³		
Nordraum	G5 (Glimmersande)	10 ⁻⁴ 10 ⁻³	Absetzer- kippe	1·10 ⁻⁶ 1·10 ⁻⁵

Untersuchungen an Bohrkernen aus der Direktversturzkippe des Tagebaus Nochten ergaben für Einzelproben im Dezimeterbereich hydraulische Durchlässigkeiten in einer sehr großen Spannbreite zwischen 10⁻⁴ und 10⁻⁹ m/s [IWB 2012]. Die hydraulischen Durchlässigkeiten in den Kippen des mitteldeutschen Reviers sind etwa eine Größenordnung niedriger als im Lausitzer Revier. Dies ist auf den höheren Anteil an bindigerem Material (Geschiebemergel) zurückzuführen.

Die geohydraulischen Modellierungen von [Buczko 1999] zu Kippen des Lausitzer Reviers zeigen, dass im Aufprallbereich der Schüttkegel (Bild 24) höhere Lagerungsdichten und damit zwei- bis fünfmal geringere effektive ungesättigte hydraulische Leitfähigkeiten auftreten, als in den Abrollbereichen. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit bestimmte [Buczko 1999] für die Aufschlagbereiche mit etwa $7 \cdot 10^{-5}$ m/s und für die Abrollbereiche zwischen 1 und $2 \cdot 10^{-4}$ m/s.

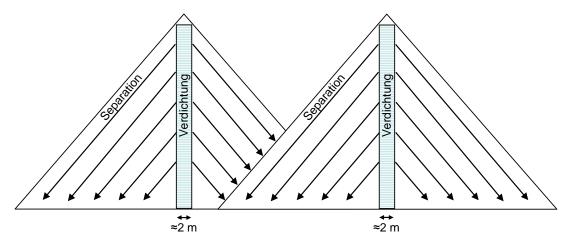


Bild 24: Schema heterogenitätsbildender Prozesse in Schüttkegeln, nach [Buczko 1999]

4.2 **Hydrogeochemie**

4.2.1 Geochemie der Pyritverwitterung

der Braunkohle - Abschlussbericht

Bei der Entwässerung, der Abraumbaggerung und der Verkippung werden die geologischen Substrate im Deckgebirge der Kohleflöze, die sich viele Millionen Jahre unter Luftabschluss befanden, der Atmosphäre ausgesetzt. Durch den Kontakt mit dem atmosphärischen Sauerstoff und bei Gegenwart von Wasser verwittern die Eisendisulfidminerale Markasit und Pyrit.

In den Kippen der Braunkohlentagebaue können bei der Pyritverwitterung zwei Zonen unterschieden werden: eine oberflächennahe oxische Zone und eine tiefe anoxische Zone. In Bereichen, wo die Sauerstoffnachlieferung schneller als der Reaktionsfortschritt der Pyritverwitterung erfolgt, verwittert im Laufe der Zeit der gesamte Pyrit. In dieser Zone des Sauerstoffüberschusses herrscht ein oxisches Milieu. Bei der Verwitterung entstehen unterschiedliche Eisen(III)-Verbindungen und Schwefelsäure. Schwefelsäure ist eine starke Säure und führt bei fehlender Pufferung zur Versauerung. In diesem Falle geht auch Eisen(III) in Lösung:

$$\text{FeS}_2 + \frac{15}{4}\text{O}_2 + \frac{7}{2}\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe(OH)}_3 \downarrow + 2\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ \dots (\text{pH} > 3,5) \dots (\text{Glg. 1})$$

$$\text{FeS}_2 + \frac{15}{4}O_2 + \frac{1}{2}H_2O \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 2SO_4^{2-} + \text{H}^+ \dots (pH < 3,5) \dots (Glg. 2)$$

In tieferen Kippenbereichen, die durch Überdeckung oder durch den Grundwasseranstieg von der Sauerstoffzufuhr abgeschnitten wurden, kommt die Pyritverwitterung nach dem Verbrauch des Sauerstoffs und ggf. weiterer Oxidationsmittel zum Erliegen. Als Oxidationsmittel dient hier auch Eisen(III), das in der oxischen Verwitterungszone gebildet und in der Festphase als Sekundärmineral zwischengespeichert wurde:

$$FeS_2 + 14Fe^{3+} + 8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+ (Glg. 3)$$

$$Fe^{2+} + \frac{1}{4}O_2 + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + \frac{1}{2}H_2O.$$
 (Glg. 4)

Mit dem Verbrauch der Oxidationsmittel und dem Erliegen der Pyritverwitterung bildet sich im Kippenwasser ein anoxisches Milieu mit Dominanz von Eisen(II)-Ionen. Das Kippenwasser wird überwiegend in diesem Zustand angetroffen. Die Pyritverwitterung in der anoxischen Zone kann summarisch wie folgt dargestellt werden:

$$\text{FeS}_2 + \frac{7}{2}O_2 + \text{H}_2O \rightarrow 2\text{SO}_4^{2-} + \text{Fe}^{2+} + 2\text{H}^+$$
 (Glg. 5)

4.2.2 Kinetik der Pyritverwitterung

Das Versauerungspotential von Aufstandshalden des Erz- und Steinkohlenbergbaus wird durch die Bilanz der säurebildenden und alkalisierenden Minerale geschätzt. Erstere sind überwiegend durch disulfidischen Schwefel (Pyrit) und letztere durch Carbonatminerale (Calcit, Dolomit) vertreten. Diese Bilanzmethode ist auf grobstückige und dadurch meist gut durchlüftete Aufstandshalden des Erz- und Steinkohlenbergbaus anwendbar, wo dauerhaft oxische Verhältnisse langfristig zu einer nahezu vollständigen Verwitterung des Pyrits führen.

Auf Braunkohleabraumkippen ist diese Methode nicht übertragbar. Die chemischanalytisch nachgewiesenen Gesamtgehalte an disulfidischem Schwefel liefern keine Aussage zur Verfügbarkeit der Minerale für die atmogene Verwitterung. Die Feinkörnigkeit der Kippensubstrate, mineralogische Besonderheiten des Pyrits (z. B. die Einbettung in kohlig-schluffigen Partikeln oder der Einschluss in toten Zellen), die morphologische Tieflage der Kippen überwiegend unterhalb des Grundwasserspiegels stehen einer Durchlüftung der Kippen und damit einer vollständigen Verwitterung der Sulfidminerale entgegen [LAUBAG 1999].

Die Pyritverwitterung in den Braunkohleabraumkippen beschränkt sich auf einen technologisch definierten Zeitraum, der mit der Vorfeldentwässerung beginnt und mit dem Grundwasserwiederanstieg in der Regel endet. Die Pyritverwitterung muss daher als zeitabhängiger Prozess betrachtet werden. Dabei müssen zwei Teilprozesse unterschieden werden:

- die eigentliche Kinetik der Verwitterungsreaktion des Pyrits sowie
- die Nachlieferung des Oxidationsmittels in die Reaktionszone.

Die chemische Beschreibung der Verwitterungskinetik wird aus den maßgebenden stöchiometrischen Gleichungen, z. B. (Glg. 1) und (Glg. 3), abgeleitet. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist demzufolge direkt von der Konzentration der Ausgangsstoffe abhängig, d. h. vom Pyritgehalt und von der Konzentration der Oxidationsmittel O₂ bzw. Fe(III) [LAUBAG 1999].

Bei pH-Werten pH > 3,5 wird die Pyritoxidation durch die geringe Löslichkeit von Fe(OH)₃ bestimmt. Bei sinkenden pH-Werten bildet sich zunehmend freies Eisen(III) als lösliches Ion, welches als Reaktionsprodukt die Pyritoxidation autokatalysiert [Evangelou 1995]. Die Verfügbarkeit von gelöstem Fe(III) für die Pyritoxidation hängt demnach von der Fe(II)-Konzentration, der Sauerstoffverfügbarkeit und vom pH-Wert ab, so dass diese Faktoren auch die Reaktionsgeschwindigkeit der Pyritverwitterung bestimmen. Gepufferte Verhältnisse lassen folglich eine Verlangsamung der Pyritoxidation erwarten.

Die Oxidationsreaktion nach (Glg. 4) wird bei Anwesenheit von schwefel- und eisenoxidierenden Bakterien (z. B. *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans*) beschleunigt. Als Maß für die Geschwindigkeit, mit der die Oxidation von Eisen(II) zu Eisen(III) abläuft, kann die Halbwertszeit von Eisen(II) betrachtet werden. In abiotischen Systemen liegen die Halbwertszeiten von Eisen(II) bei schwach sauren bis neutralen pH-Werten im Bereich von Tagen und erreichen Jahre unter stark sauren Bedingungen. Bei Anwesenheit von *Thiobacillus ferrooxidans* wird die Halbwertszeit der Oxidationsreaktion deutlich verkürzt [Evangelou 1995].

Neben der Verwitterungskinetik der Pyritoxidation spielt die Sauerstoffnachlieferung in die Kippe eine wesentliche Rolle. Die Sauerstoffnachlieferung erfolgt überwiegend durch molekulare Gasdiffusion in der Bodenluft des aufgelockerten Kippenmaterials. Die Geschwindigkeit der Gasdiffusion ist im Wesentlichen vom luftgefüllten Porenanteil und vom Diffusionsweg abhängig. Die Verwitterungsgeschwindigkeit ist folglich in einer Kippe oberflächennah am höchsten und wird mit zunehmender Tiefe gedämpft. Des Weiteren ist die Verwitterungsgeschwindigkeit des Pyrits auf Grund des Luftporenanteils sedimentspezifisch unterschiedlich. In der Regel versauern pyritarme Sedimente mit sandiger Matrix schneller, als pyritreiche mit schluffiger Matrix. Die Verwitterung in pyritarmen und sandigen Matrizes reicht folglich tiefer, als in pyritreichen und bindigen Matrizes, vgl. [LAUBAG 1999], [Berger 2000] u.a.

Untersuchungen in der Lausitz, z. B. [BTU 1998], zeigen durch Modellrechnungen, dass die Sauerstoffnachlieferung nach relativ kurzer Zeit zum limitierenden Teilprozess des Verwitterungsprozesses wird. Der luftgefüllte Porenanteil der Braunkohlenabraumkippen ist der am meisten sensitive Parameter für die Sauerstoffdiffusion. Die kinetischen Parameter der intrinsischen Verwitterungsreaktion des Pyrits haben nur untergeordnete Bedeutung für die Bilanzierung der Pyritumsetzung. Deshalb ist es aus ingenieurpraktischer Sicht nicht erforderlich, sich mit den komplizierten mathematischen Modellansätzen der Pyritverwitterung, wie z. B. in [Evangelou 1995] und [BTU 1998], im Detail zu befassen.

4.2.3 Pufferung

Die Versauerungswirkung der Pyritverwitterung auf die Grundwasserbeschaffenheit wird durch geochemische Begleitreaktionen gemindert. Prozesse, die der Versauerung entgegen wirken, werden als (Säure-)Pufferreaktionen bezeichnet. Die Pufferprozesse sind danach zu unterscheiden, ob sie eine (nachhaltige) Alkalisierung bewirken oder nur eine temporäre Pufferung des pH-Wertes.

Die **Carbonatverwitterung** ist die natürliche Pufferreaktion mit dem höchsten und einem nachhaltigen Alkalisierungseffekt. Der Alkalisierungseffekt entspricht dem Moläquivalent der gelösten Calciumionen:

$$CaCO_3 + H^+ \rightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$$
 (Glg. 6)



In pleistozänen Geschiebemergeln ist Calciumcarbonat in großen Mengenanteilen enthalten. Die rolligen pleistozänen sowie alle tertiären Ablagerungen enthalten in der Regel keine oder nur sehr geringe Anteile an Carbonatmineralen.

Der Kationenaustausch ist als Pufferprozess auch in den Kippen gegenwärtig. Die Oberflächen von Mineralen und organischen Substraten sind mit austauschbaren Kationen belegt. Der Kationenaustauscher eines unbeeinflussten tertiären Substrates ist überwiegend mit Calcium- und Magnesiumionen belegt. Verändert sich die Zusammensetzung des Kippenwassers, z. B. infolge der Pyritverwitterung, finden Austauschprozesse statt. Dabei stellt sich ein neues Gleichgewicht zwischen dem Porenwasser und der Austauscheroberfläche ein. Für die Pufferung in Braunkohleabraumkippen ist vor allem der Austausch des Eisens(II) gegen die Erdalkalien Calcium und Magnesium von Bedeutung, z. B.:

$$X_2Ca + Fe^{2+} \xrightarrow{K_{Fe/Ca}} Ca^{2+} + X_2Fe$$
 (Glg. 7)

Die **Silikatverwitterung** trägt nur in dem Maße zur Pufferung durch Alkalisierung bei, wie bei diesem Prozess Alkalien (Natrium und Kalium) bzw. Erdalkalien (Calcium und Magnesium) in Lösung gehen. Durch die Silikatverwitterung werden primäre Silikate und Alumosilikate in einfacher strukturierte Tonminerale (Kaolinit), Hydroxide und Oxidhydrate des Aluminiums sowie amorphe Kieselsäure umgewandelt. Als Beispiel für die Silikatverwitterung kann die Verwitterung des Kalifeldspats Albit im sauren Milieu dienen, wobei als neue Phase amorphe Kieselsäure entsteht:

$$NaAlSi_3O_8 + 7H_2O + 4H^+ \rightarrow Na^+ + Al^{3+} + 3H_4SiO_4^0$$
..... (pH < 5)......(Glg. 8)

Hohe Aluminiumkonzentrationen treten im Kippenwasser nur bei starker Versauerung (pH < 5) und damit überwiegend in der oxischen Verwitterungszone auf. Durch seine hydrolytischen Eigenschaften ist Aluminium ein Aciditätsträger.

Durch die erhöhten Calcium- und Sulfatkonzentrationen im Kippenwasser kann das Sättigungsgleichgewicht von **Gips** erreicht werden:

$$Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O \stackrel{K_{gips}}{\longleftrightarrow} CaSO_4 \cdot 2H_2O \downarrow . \tag{Glg. 9}$$

Die Gipsbildung in den Kippen ist aber eher eine Ausnahme. Dafür sind Konzentrationen von > 1.400 mg/L Sulfat und > 500 mg/L Calcium erforderlich. Letzteres wird meist nur in der Gegenwart von Carbonatmineralen (Calcit) erreicht. Die Ausfällung von Gips mindert zwar den Elektrolytgehalt des Kippenwassers, ist aber für die Säurepufferung ohne Bedeutung.

Zur Bewertung der Pufferreaktionen in Kippen ist es erforderlich, dass der Carbonatgehalt und die Austauschereigenschaften (Kationenaustauschkapazität und Austauscherbelegung) der Sedimente bekannt sind. Die Silikatverwitterung ist sehr stark vom örtlichen geochemischen Zustand abhängig und entzieht sich i. d. R. einer exakten Bilanzierung.

4.2.4 Stoffrückhalt und Selbstreinigung

der Braunkohle - Abschlussbericht

Unter dem Gesichtspunkt selbstheilender Prozesse in den Braunkohleabraumkippen sind der respiratorische Kohlenstoffabbau, die Sideritfällung und die heterotrophe Sulfatreduktion von Interesse.

In den gewachsenen tertiären Schichten lagern die kohligen Bestandteile überwiegend stratiform und entziehen sich durch geringe aktive Oberflächen der Verwitterung. Im Zuge der Baggerung und Verkippung werden sie aus ihrem Verband gerissen und in der Kippe fein verteilt. Die deutliche Vergrößerung der reaktiven Oberfläche der Kohlepartikel verbessert die Bedingungen für den **respiratorischen Kohlenstoffabbau** durch Bakterien und Pilze. Der respiratorische Kohlenstoffabbau verdient hinsichtlich des Sauerstoffverbrauchs als Konkurrenzreaktion zur Pyritverwitterung Beachtung:

$$C_{\text{org}} + O_2 \xrightarrow{\text{MO}} CO_2$$
 (Glg. 10)
(MO = Mikroorganismen)

Sowohl im Ergebnis der Carbonatverwitterung nach (Glg. 6) als auch im Ergebnis des respiratorischen Kohlenstoffabbaus nach (Glg. 10) entsteht Kohlensäure. Im anoxischen Kippenwasser erfüllen die hohen Fe(II)- und Kohlensäuregehalte häufig formal die thermodynamischen Bedingungen für die **Sideritfällung**. Auch die hydrochemische Bewertung von Wasseranalysen des Kippenwassers aus dem Tagebau Nochten zeigt für Siderit in vielen Fällen einen Sättigungsindex $SI \ge 0$ an.

$$Fe^{2+} + CO_3^{2-} \xrightarrow{K_{siderit}} FeCO_3 \downarrow \dots$$
 (Glg. 11)

Die Bildung von Siderit würde vor allem zu einer Festlegung des mobilen Eisen(II) führen und damit dem anoxischen Kippenwasser Acidität entziehen. Die Sideritbildung in den Kippen ist deshalb als Pufferreaktion von Interesse. Bislang steht jedoch der mineralogische Nachweis von neugebildetem Siderit in den Braunkohleabraumkippen aus. Es wird vermutet, dass die Aktivierungsenergie für die Bildung von Sideritkristallen so hoch ist, dass der rechnerisch nachgewiesene Übersättigungszustand für eine quantitative Sideritfällung nicht ausreicht.

Die erhöhte respiratorische Aktivität der Mikroorganismen in den Braunkohleabraumkippen schafft formal auch die Bedingungen für die **heterotrophe Sulfatreduktion**. Ein anoxisches Kippenwasser enthält weder Nitrat noch Eisen(III). Damit steht nur Sulfat als Oxidationsmittel für mikrobiologische Stoffwechselprozesse zur Verfügung:

$$SO_4^{2-} + 2C_{org} + 2H_2O \xrightarrow{MO} H_2S + 2HCO_3^-$$
 (Glg. 12)

$$3SO_4^{2-} + 6C_{org} + 2H_2O + 2FeOOH \xrightarrow{MO} FeS_2 + FeS + 6HCO_3^-$$
 (Glg. 13)



Die Sulfatreduktion ist praktisch die Umkehrung der Pyritverwitterung. Sie führt zu einer Festlegung von Schwefel und Eisen als Eisensulfide sowie zur Entstehung von Alkalinität. Sowohl die Sideritfällung als auch die Sulfatreduktion sind in den jungen Kippen des Lausitzer Braunkohlenbergbaus bislang nicht in relevanten Größenordnungen nachweisbar. Fachexperten vertreten die Meinung, dass diese Prozesse erst Jahrzehnte oder Jahrhunderte nach Abschluss des Braunkohlenbergbaus zur Geltung kommen.

Damit werden die maßgebenden säurebildenden und puffernden Prozesse in unterschiedlichen Zeitskalen wirksam (vgl. <u>Bild 25</u>). Ein zuverlässiges Instrumentarium zur Abbildung der gesamten geochemischen Prozesskette fehlt bis dato. Die Betrachtungen zur Pyritverwitterung werden überwiegend bis zum Zeitpunkt der Überdeckung oder des Grundwasserwiederanstiegs geführt. Das natürliche Selbstreinigungspotential bleibt dabei zunächst unberücksichtigt.

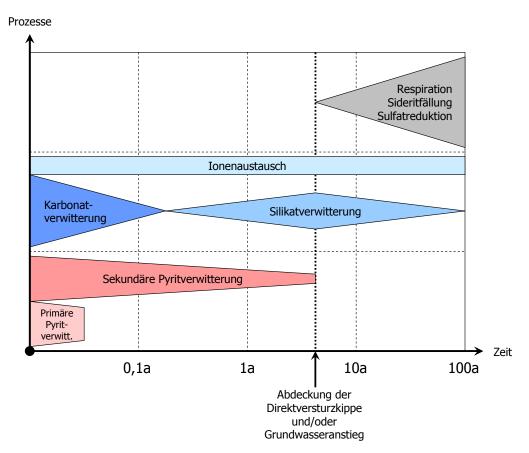


Bild 25: Zeitskalen der geochemischen Prozesse in Braunkohleabraumkippen

4.2.5 Kennzeichnung

4.2.5.1 Versauerungspotential

Im Kippenwasser kommt im Wesentlichen Hydrogencarbonat als Säurepuffer in Frage. Die wichtigsten Säuren im anoxischen Kippenwasser sind Eisen(II) und Aluminium. Zu beachten ist, dass Eisen(II) nur dann säurebildend reagiert, wenn sich die Redoxverhältnisse ändern und Eisen(II) zu Eisen(III) oxidiert wird (Bild 26).

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften

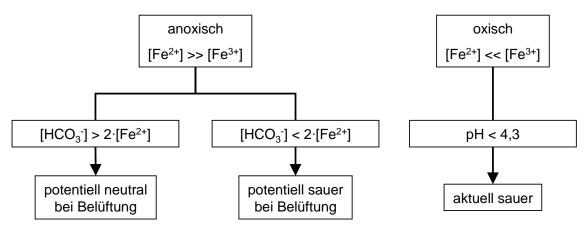


Bild 26: Abschätzung des Versauerungspotentials von Kippenwassern an Hand wesentlicher hydrochemischer Kennwerte

Das ist regelmäßig beim Übertritt des Kippenwassers in die Bergbaufolgeseen oder in die Fließgewässer der Fall. Das Versauerungspotential eines anoxischen Grundwassers lässt sich in erster Näherung aus Analysendaten wie folgt schätzen:

$$Aci_{ox} = -Alk_{ox} \approx 2 \cdot [Fe^{2+}] + 3 \cdot [Al^{3+}] - K_{S4,3}^{anox} \left[\frac{mmol}{L} \right](Glg. 14)$$

Im originalen anoxischen Zustand ist bergbaulich beeinflusstes Grundwasser und Kippenwasser überwiegend nur schwach sauer (pH > 5) und hydrogencarbonatgepuffert ($K_{S4,3} > 0$ mmol/L). Der Hydrogencarbonatpuffer ist im Kippenwasser sogar systematisch höher als im Grundwasser gewachsener Grundwasserleiter (<u>Bild 27 links</u>). Daraus kann jedoch noch keine Aussage zum tatsächlichen Versauerungspotential abgeleitet werden.

Zum Vergleich des Versauerungspotentials bergbaubürtigen Grundwassers unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung werden die Grundwasseranalysen rechnerisch oder analytisch den chemischen Randbedingungen ausgesetzt, die unter oxischen Verhältnissen ohne Sauerstofflimit herrschen. Die Versauerungsneigung bei Belüftung kann bei Vorliegen vollständiger Wasseranalysen mit Hilfe von hydrogeochemischen Modellen, z. B. PHREEQC [Parkhurst & Appelo 1999], berechnet werden. Dazu wird das anoxische Kippenwasser ins Gleichgewicht mit den atmosphärischen Gaspartialdrücken des Sauerstoffs $P_{\rm O2}\approx 0,21$ Vol-% und des Kohlendioxids $P_{\rm CO2}\approx 0,035$ Vol-% gebracht sowie das theoretische Fällungsgleichgewicht für amorphes Eisenhydroxid zugelassen. Neben dem Mineralisationsgrad und der Sulfatkonzentration wird die Versauerungsneigung vor allem durch die berechnete Säure- bzw. Basenkapazität $K_{\rm S4.3}^{\rm ox}$ bzw. $K_{\rm B4.3}^{\rm ox}$ des nunmehr oxischen (belüfteten) Grundwassers gekennzeichnet.

Im <u>Bild 27 rechts</u> ist der Übergang vom zuvor überwiegend anoxischen Zustand des Grundwassers in den (berechneten) oxischen Zustand dargestellt. Die berechneten Werte für den pH_{ox} und den $K_{S4.3}^{ox}$ ordnen sich auf einer typischen Kurve an. Ein großer Teil der Grundwasseranalysen, darunter besonders viele Kippenwässer, zeigt bei Belüftung eine saure Reaktion pH < 4. Das Kippenwasser hat dabei die höheren Säuregrade. Nur ein geringer Teil der Grundwasseranalysen ordnet sich in den schwach gepufferten Bereich zwischen pH = 4 und pH = 7 ein. Ein weiterer großer Teil der Grundwasseranalysen zeigt eine neutral bis schwach alkalische Reaktion. Hier hat das Kippenwasser im Vergleich zum Grundwasser aus den pleistozänen und tertiären Grundwasserleitern die höhere Pufferung.

überwiegend anoxischer Zustand

oxischer Zustand (berechnet)

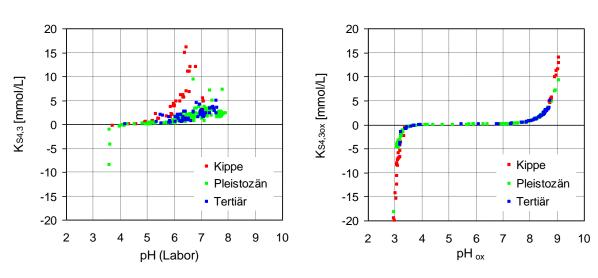


Bild 27: pH-Wert und Alkalinität im originalen, überwiegend anoxischen Zustand des Grundwassers (links) und im oxischen Zustand des Grundwassers nach rechnerischer Belüftung (rechts) (Daten des Grundwassergütemonitorings der VEM von 2009 und 2010)

In der Abhängigkeit von der Lagerstättengeologie und der Tagebautechnologie gibt es deutliche Unterschiede in der Versauerungsneigung der Kippenwässer und des betroffenen Grundwassers gewachsener Grundwasserleiter zwischen den Revieren und in den Revieren auch zwischen den Tagebauen. Im Vorgriff auf die konkreten Betrachtungen zu den Revieren sei auf den Vergleich der Basenkapazitäten des belüfteten Grundwasser in <u>Abschnitt 6.3</u> verwiesen. Aus <u>Bild 57</u> in <u>Abschnitt 6.3</u> geht hervor, dass der überwiegende Teil des Kippenwassers im Lausitzer Braunkohlenrevier bei Belüftung mit Basenkapazitäten $K_{B4.3}^{ox} > 0$ mmol/L reagiert. Das Kippenwasser im mitteldeutschen Braunkohlenrevier ist dagegen überwiegend durch Basenkapazitäten $K_{B4.3}^{ox} < 0$ mmol/L gekennzeichnet. Als Säurepuffer steht im Abraummaterial der mitteldeutschen Braunkohlentagebaue Carbonat aus den quartären Geschiebemergeln zur Verfügung. In den Lausitzer Tagebauen sind die quartären Sedimente weitestgehend carbonatfrei, so dass sich im belüfteten Grundwasser überwiegend stark saure pH-Werte einstellen (<u>Bild 57, oben</u>).



4.2.5.2 Genetische Aspekte

Die Darstellung der Sulfat- gegen die Eisenkonzentrationen in einem doppeltlogarithmischen Diagramm für die Befunde des Grundwassergütemonitorings der Vattenfall Europe Mining AG aus den Jahren 2009 und 2010 zeigt den Einfluss der Pyritverwittterung auf die hydrochemische Genese des Grundwassers (Bild 28). Hohe Sulfatkonzentrationen korrespondieren mit hohen Eisenkonzentrationen und einem entsprechenden Versauerungspotential. Dieser Zusammenhang stellt sich aber nur bei hohen Sulfatkonzentrationen deutlich dar. Für Sulfatkonzentrationen unter 250 mg/L besteht kein erkennbarer Zusammenhang zur Eisenkonzentration.

Aus den Messwerten zur bergbaubeeinflussten Grundwasserbeschaffenheit wurde von den Autoren eine fünfgliedrige Klassifizierung der Belastungsstufen abgeleitet, denen sich entsprechende Bandbreiten der Sulfat- und Eisenkonzentration zuordnen lassen (siehe <u>Tabelle 15</u>).

Tabelle 15: Klassifizierung des bergbaulichen Einflusses auf die Grundwasserbeschaffenheit anhand der Sulfat- und Eisenkonzentration

Vlassa	Sulfat	Eisen(II)	Umfang der	Dufferung
Klasse	[mg/L]	[mg/L]	Pyritverwitterung	Pufferung
V	> 3.000	> 1.000	sehr hoch: überwiegend Kippen	nicht karbonatgepuffert
IV	1.4003.000	2002.000	hoch: überwiegend Kippen	nicht karbonatgepuffert
		50300	mittel:	nicht karbonatgepuffert
III	6001.400	1050	Kippen sowie pleistozäne Grundwasserleiter mit hohen Pyritgehalten	karbonatgepuffert
II	250600	< 100	mäßig: gewachsene Grundwasserleiter in Absenkungstrichtern	ambivalent
	100250	< 60	gering: gewachsene Grundwasserleiter in Absenkungstrichtern	ambivalent
I	20100	< 20	ohne: natürlicher Zustand oberflächennaher Grundwasserleiter	ambivalent
	< 20	< 4	ohne: natürlicher Zustand tiefer und sulfatreduzierender Grundwasserleiter	ambivalent

Für die Sulfatkonzentrationen im mittleren Konzentrationsbereich stellen sich zwei genetische Linien dar. Die längere "obere Linie" mit den höheren Eisenkonzentrationen ist für potentiell saure Kippenwässer charakteristisch. Die kürzere "untere Linie" mit den geringeren Eisenkonzentrationen steht für potentiell neutrales bzw. schwach alkalisches Kippenwasser. In diesem Kippenwasser wird die Sulfatkonzentration durch Gipsfällung limitiert, so dass allein aus der Sulfatkonzentration nicht auf den volumenspezifischen Umfang der Pyritverwitterung geschlossen werden kann.

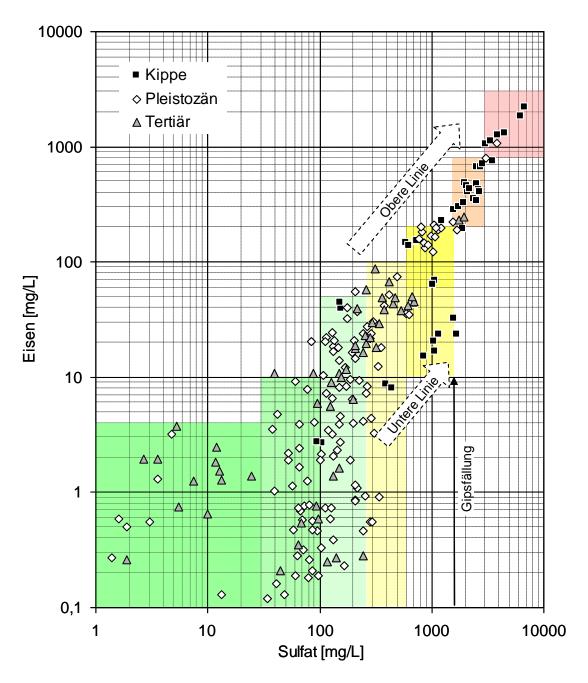


Bild 28: Zusammenhang zwischen der Sulfatkonzentration und Eisenkonzentration im Grundwasser der Bergbauregion (Daten des Grundwassergütemonitorings der VEM von 2009 und 2010)



4.3 Prognose der Kippenversauerung

der Braunkohle - Abschlussbericht

4.3.1 Bilanzierung

Seit Ende der 1980er Jahren wurden durch voneinander unabhängige Arbeiten in den deutschen Braunkohlerevieren Methodiken zur Abschätzung der Pyritverwitterung in den Braunkohleabraumkippen entwickelt (z. B. [Obermann u. a. 1993], [Wisotzky 1994], [Hoth u. a. 2010], [Berger 2000], [Seiler 2001], [IWB 2001a], [IWB 2001b], [Bilek 2004]). Die Arbeiten in den einzelnen Tagebauen wurden von verschiedenen Institutionen ausgeführt. Aus den Besonderheiten der einzelnen Reviere und Tagebaue ergaben sich Unterschiede in der methodischen Herangehensweise.

Die Methoden zur Bewertung der Kippenversauerung lassen sich in vier Stufen gliedern (Tabelle 16). Die erste Bewertungsstufe ist eine Säure-Base-Bilanzierung (das so genannte ABA - acid-base-accounting), bei dem der gesamte Pyritgehalt mit dem gesamten Carbonatgehalt der Kippe ins Verhältnis gesetzt wird. Eine Aussage zur Beschaffenheit des Kippenwassers folgt hieraus jedoch nicht. In der zweiten Bewertungsstufe wird die expositionszeitabhängige Pyritverwitterung berücksichtigt. Sie liefert Prognosen für die Sulfatkonzentration des Kippenwassers. Die Versauerungsneigung und die sonstige Beschaffenheit des Kippenwassers (z. B. Metallkonzentrationen) kann in dieser Stufe noch nicht eingeschätzt werden. Hierzu ist es erforderlich, die Pufferprozesse in die Bewertung (Stufe III) quantitativ einzubeziehen. Nur auf dieser Grundlage kann eine Bemessung von Maßnahmen zur Minderung bzw. Verhinderung der Kippenversauerung und deren betriebswirtschaftliche Bewertung vorgenommen werden. Die Bewertungsstufe IV ist für die Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Kippenwassers, z. B. unter dem Einfluss der Sulfatreduktion, erforderlich. Die Erfahrungen hierzu sind derzeit noch begrenzt.

Tabelle 16: Bewertungsstufen für die Kippenwasserprognose

Stufe	Erläuterung	Bemerkung/Aussagen
I	Verhältnis des gesamten Pyrits zum gesamten Calciumcarbonat: $ABA = \frac{2 \cdot [Pyrit]}{[Calcit]}$	So genanntes ABA (acid-base-accounting = Säure-Base-Bilanzierung). Liefert Aussage zur potentiellen Versauerungsneigung. Ist für Aufstandshalden ohne eigenen Grundwasserspiegel geeignet. Liefert für Braunkohleabraumkippen (Innenkippen) keine verwertbaren Aussagen.
II	Ermittlung des expositionszeitabhängigen, verwitterbaren Pyrits als Anteil (Exp): $ABA = \frac{2 \cdot \left[Pyrit(t_{exp}) \right]}{[Calcit]}$	Liefert nur Aussagen zur Sulfat- konzentration im Kippenwasser.

Seite 62

Stufe	Erläuterung	Bemerkung/Aussagen		
III	wie II zzgl. Berücksichtigung der kippeninternen Pufferreaktionen (Puff): Calciumcarbonat Ionenaustausch Silikatverwitterung $ABA(t_{exp}) = \frac{2 \cdot \left[Pyrit(t_{exp}) \right]}{\left[Calcit \right]} - R_{puff}$	Liefert Aussagen zur Hydrochemie des Kippenwassers, einschließlich der Säuregrade und der Metallkonzen- trationen mit vergleichsweise kurzem Zeithorizont (Abschluss des Tagebaus: t _{Exp})		
IV	wie III zzgl. Stoffrückhalt infolge natürlicher Selbstreinigungsprozesse (NAN) $ABA(t) = \frac{2 \cdot \left[Pyrit(t_{exp}) \right]}{\left[Calcit \right]} - R_{puff} - R_{NAN}(t)$	Liefert Aussagen zur Hydrochemie des Kippenwassers, einschließlich der Säure- grade und der Metallkonzentrationen mit längeren Zeithorizont (t > t _{Exp})		

Die meisten Arbeiten zur Kippenversauerung beschränkten sich auf die Quantifizierung der Pyritverwitterung (Stufe II). Der <u>Übergang von der Bilanzierung der Pyritverwitterung zur Prognose der Kippenwasserbeschaffenheit</u> ist nur partiell erfolgt und konnte in vielen Fällen nicht in Übereinstimmung mit den realen Messwerten der Kippenwasserbeschaffenheit gebracht werden. Hier besteht weiterer Untersuchungsund Entwicklungsbedarf.

Die bisherige vorgenommene Bilanzierung der Pyritverwitterung im Tagebau Nochten in [IWB 2001b] beschränkte sich auf das Kippensegment von 1995 bis 2000 (vgl. Abschnitt 5.2) zu einem bestimmten Stichtag. Die Stoffströme wurden zum Jahresende 2000 ausgewiesen. In anderen Tagebauen wurden die Stofffreisetzungen durch die Pyritverwitterung bis zum Auslaufen der Tagebaue prognostiziert. Der Stoffaustrag während des jahrzehntelangen Tagebaubetriebs wurde dabei i. d. R. nicht berücksichtigt, was zu einer Überschätzung des Stoffvorrates und des Versauerungspotentials zum Zeitpunkt des Übergangs vom aktiven zum Sanierungsbergbau führt. Das Problem kann durch eine dynamische Bilanzierung und Prognose der Stofffeisetzung durch die Pyritverwitterung sowie der Stoffakkumulation und des Stoffaustrages gelöst werden. Sofern es die Datengrundlage ermöglicht, ist die Bilanzierung für die gesamte Laufzeit des Tagebaus durchzuführen.

4.3.2 Bewertung

Die stoffliche Bilanzierung der Pyritverwitterung sowie des Stoffaustrages und der Stoffakkumulation der Verwitterungsprodukte wurde in [IWB 2001b] für die Kippscheiben der Jahre 1995 bis 2000 des Tagebaus Nochten durchgeführt. Mit dem gewählten methodischen Ansatz (Bild 29) konnte eine plausible Stoffstrombilanz der Kippe zum Stichtag der Untersuchungen im Jahr 2000 ausgewiesen werden. Die Daten zur Stofffreisetzung durch die Pyritverwitterung konnten mit den Daten zum Stoffaustrag aus der Kippe und der Stoffakkumulation in der Kippe in Übereinklang gebracht werden.

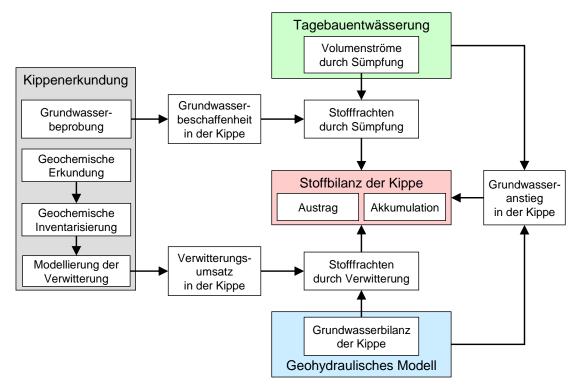


Bild 29: Methodisches Konzept zur Ermittlung der Stoffumsätze und Stofffrachten in Braunkohleabraumkippen, in Anlehnung an [IWB 2001b]

4.3.3 Raum-Zeit-Aspekte

Die Vorbereitung des Aufschlusses einer Braunkohlenlagerstätte beginnt mit der Grundwasserabsenkung. Mit der Grundwasserabsenkung muss je nach den hydrogeologischen Bedingungen des Kohlefeldes mehrere Jahre vor dem Aufschluss begonnen werden. Bereits in dieser Phase beginnt die Pyritverwitterung in den belüfteten Deckgebirgssedimenten, die mit unter der primären Pyritverwitterung subsumiert wird.

Ein Braunkohlentagebau ist ein dynamischer Körper, der sich über die Jahrzehnte der Nutzung in der räumlichen Lage, in seinen Ausdehnungen und in seiner Struktur laufend verändert (Bild 30). Ein Tagebau beginnt mit einer begrenzten Aufschlussstruktur, in der zunächst nur das Deckgebirge bis zum Kohleflöz beräumt wird. Die Deckgebirgssedimente gelangen je nach den umgebenden Bedingungen auf separate Außenhalden auf der Geländeoberfläche außerhalb der Lagerstättenkontur. Befindet sich ein ausgekohlter Tagebau in unmittelbarar Nachbarschaft, können die Aufschlusssedimente ggf. in diesem Tagebau verkippt werden.

Mit der Freilegung der Sedimente an den Baggerböschungen verstärkt sich die primäre Pyritverwitterung im Tagebau. Gleichzeitig setzt die Pyritverwitterung in den Außenhalden ein.

Erst nach der Freilegung des Kohleflözes werden die typischen Tagebautechnologien, wie die Abraumförderbrücke und die Kohlebagger installiert. Mit der Inbetriebnahme der Abraumförderbrücke beginnt die Innenverkippung im Tagebau. In dieser Phase erweitert sich die primäre Pyritverwitterung auf der Kippenseite und setzt die sekundäre Pyritverwitterung auf der Kippenoberfläche ein. Im laufenden Tagebaubetrieb vergrößert sich mit dem auflaufenden Massendefizit die Fläche der offenen Tagebaukontur. Die Angriffsflächen der primären Pyritverwitterung vergrößern sich entsprechend.

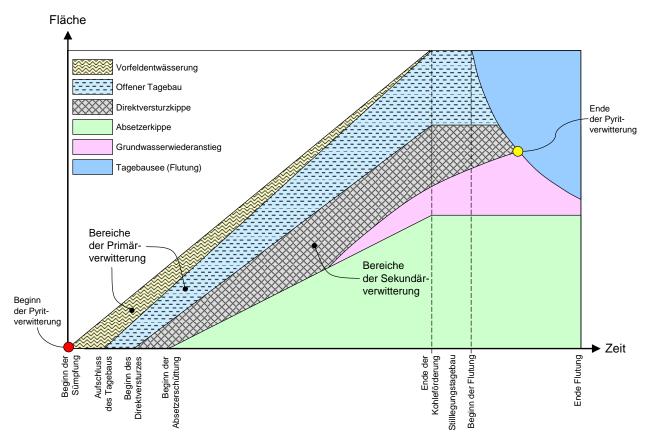


Bild 30: Synoptische Darstellung der Flächenentwicklung eines Tagebaus mit den Bereichen der primären und sekundären Pyritverwitterung

Mit dem Flächenwachstum der Direktversturzkippe vergrößerte sich die Angriffsfläche für die sekundäre Pyritverwitterung. Mit der Dauer des Offenliegens dringt die sekundäre Pyritverwitterung tiefer in die Direktversturzkippe ein. Erst mit Schüttung der Absetzerkippe wird die sekundäre Pyritverwitterung in diesen Bereichen unterbunden. In der Regel liegen zwischen dem Beginn des Dirkektversturzes und der Absetzerschüttung technologisch bedingt mehrere Jahre. In dieser Zeit nimmt die Oberfläche der Direktversturzkippe häufig schon mehrere hundert Hektar ein.

Solange das Flächenwachstum der Direktversturzkippe größer ist, als das Wachstum der Absetzerkippe, nimmt der Umfang der Pyritverwitterung noch zu. Die Kulmination der Pyritverwitterung in einem Tagebau mit Dirketversturzkippe wird erst erreicht, wenn das Flächenwachstum der Absetzerkippe das Flächenwachstum der Direktversturzkippe überholt. Das ist in der Regel erst in fortgeschrittenen Phasen des Lagerstättenabbaus der Fall.

Die Pyritverwitterung kommt außerdem durch den Grundwasserwiederanstieg zum Erliegen. In den Kippen stellt sich in der Regel ein anerobes Kippenwasser ein (vgl. Kapitel 4.2.5). Davon profitieren aber nur die unteren Kippenbereiche. Die Flutung des Bergbaufolgesees mindert schließlich den Verwitterungsfortschritt am effektivsten. Unter den überstauten Kippenflächen kommt die Verwitterung weitgehend zum Erliegen.

Liegen Flächen der Direktversturzkippe auch nach Abschluss der Kohleförderung und Abraumverkippung lange Zeit frei, kann die Pyritverwitterung auch bis weit in den Zeitraum des Sanierungsbergbaus fortschreiten.

5 Versauerungs- und Stofffreisetzungspotential

5.1 Aktiver Bergbau

5.1.1 Lausitzer Revier

Von 1999 bis 2001 wurden im Auftrag der LAUBAG (heute: Vattenfall Europe Mining AG) erste systematische Untersuchungen zum Versauerungspotential der Innenkippe des **Tagebaus Nochten** durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in internen Gutachten [IWB 2000a], [IWB 2000b], [IWB 2001a], und [IWB 2001b] dokumentiert. Die Untersuchungen wurden des Weiteren von einer Diplomarbeit an der TU Bergakademie Freiberg [Seiler 2001] flankiert.

Im Ergebnis der Untersuchungen wurde ein stratigraphisch-geochemisches Leitprofil für das Deckgebirge des Tagebaus Nochten erarbeitet. Die höchsten Disulfidschwefelgehalte wurden in folgenden Stratigraphien gefunden:

- in einer 10 cm m\u00e4chtigen Knollenlage an der Quart\u00e4rbasis (ca. 17 Masse-\u00b8 Pyrit-S)
- im Hangendschluff des 2. LFH (Ø 2,5 Masse-% Pyrit-S)
- im Schluff 2 (Ø 1,6 Masse-% Pyrit-S)
- im Grundwasserleiter G310 (Ø 1,2 Masse-% Pyrit-S)

Mineralogische Untersuchungen haben gezeigt, dass es sich dabei überwiegend um Pyrit handelt. Der Pyrit wurde in unterschiedlichen Erscheinungsformen vorgefunden (<u>Tabelle 17</u>). Der überwiegende Teil des Pyrits (64 %) trat feindispers verteilt in sandigen tertiären Schichten auf. Der Pyrit in Knollenform an der Quartärbasis hatte ungeachtet seiner spektakulären Erscheinungsform nur einen vergleichsweise geringen Anteil von etwa 3 % am gesamten Disulfidgehalt des Deckgebirges.

Tabelle 17: Erscheinungsformen der Eisendisulfide im Deckgebirge des Tagebaus Nochten, Quelle [IWB 2000a]

Typ der Eisendisulfide	Stratigraphische Horizonte	Anteil S-disulfid im Deckgebirge	Konzentrations- bereich S-disulfid	
		[%]	[Masse-%]	
Typ A: feindispers verteilt in tertiären Sanden	G255 G31, G321, G322 G4241, G43	64	0,080,40	
Typ B.1: feindispers verteilt in tertiären Schluffen	MF1.5 LgdU UBGL 1.LF LgdU OBGL 2.LF Schluff 2 HangU 2.LF	29	0,052,50	
Typ B.2: feindispers verteilt in kohligen Schichten	OB OBGL 2.LF UB OBGL 2.LF	4	0,200,50	
Typ C: Konkretionen, Bindemittel, Kluftfüllungen	G122, G13 G255	3	bis 17	

An den Baggerböschungen war im Untersuchungszeitraum der Graben von Nochten aufgeschlossen, der gegenüber der ungestörten Lagerung der tertiären Sedimente etwa 20 bis 30 Meter abgesenkt war. Der mittlere berechnete Disulfidgehalt des Deckgebirges im Tagebau Nochten betrug hier etwa 0,57 Masse-%. Die Untersuchungen an den gewachsenen Böschungen zeigten, dass der Umfang der primären Pyritverwitterung durch die Vorfeldentwässerung und baggerseitige Exposition vergleichsweise gering war. Carbonatische Minerale waren im Zeitraum der Untersuchungen im Deckgebirge des Tagebaus Nochten nicht enthalten.

Durch bevorzugte Verkippung pleistozäner und tertiärer Sande aus dem 1. Brückenschnitt in die Vorkippe ergab sich eine stoffliche Differenzierung der Innenkippe. Im Mittel waren in der Vorkippe mit 0,23 Masse-% und in der Hauptkippe mit 0,65 Masse-% Disulfidschwefel zu rechnen. Der erkundete Gesamtschwefelgehalt der Vorkippe lag zwischen 0,1 und 0,2 Masse-%. Aufgrund der hohen Luftdurchlässigkeit war die Vorkippe in ihrer gesamten Mächtigkeit von der Pyritverwitterung erfasst. Die hohe hydraulische Durchlässigkeit führte außerdem zu einer zügigen Auswaschung der Verwitterungsprodukte mit dem Sickerwasser, woraus sich die Überschätzung der berechneten im Vergleich zu den erkundeten Schwefelgehalten der Vorkippe erklärt.

Auf der Hauptkippenoberfläche wurde die Eindringtiefe der Verwitterungsfront durch oberflächennahe Abreicherung des Gesamt- und Disulfidschwefelgehaltes mit 1 bis 3 Meter abgeleitet. Aus der Sulfatschwefel-Fraktion wurde die Tiefe der Verlagerungsfront der Verwitterungsprodukte mit 2 bis 9 Meter festgestellt. Die mittlere Expositionszeit des erkundeten Areals der Hauptkippe betrug sieben Jahre. Für die Hauptkippe stimmten die erkundeten Schwefelgehalte mit den berechneten Werten nach dem stratigraphisch-geochemischen Leitprofil gut überein.

Für das untersuchte Segment der Innenkippe des Tagebaus Nochten (1995 bis 2000) wurde die Pyritverwitterung, die Stofffreisetzung und der Stoffaustrag bilanziert. Grundlagen hierfür bildeten die Geometrie der Kippe, die Ausgangsgehalte an Pyritschwefel und die Expositionszeiten des Kippenmaterials im Tagebau. Die mittlere Expositionszeit der temporären Böschungen der Vor- und Hauptkippe wurde im Schwenkbetrieb des Tagebaus mit etwa 18 Stunden berechnet [Seiler 2001]. Die Oberfläche der Vorkippe blieb bis zur Überdeckung mit der Hauptkippe im Mittel 134 Tage exponiert. Die Expositionszeit der Hauptkippe bis zur Überdeckung mit der Absetzerkippe variierte in einer großen Spanne von 100 bis über 2.000 Tagen.

Die Bilanzierung ergab, dass an den temporären Böschungen der Hauptkippe durch primäre Pyritverwitterung etwa 1 % bis 2 % vom Ausgangsgehalt des Pyritschwefels (0,4...0,6 Masse-% FeS₂-S) verwittern (<u>Tabelle 18</u>). An den temporären Kippenböschungen der Vorkippe war der Verwitterungsumsatz höher und betrug etwa 12 % des geringeren Ausgangsgehaltes von im Mittel 0,1 Masse-% (<u>Bild 31</u>).

Die sekundäre Pyritverwitterung auf den Oberflächen der Vor- und Hauptkippe wurde mit einem Modell berechnet, um das Zeitspektrum der Expositionszeiten zu berücksichtigen. Bei ausreichend langen Expositionszeiten wird die Sauerstoffnachlieferung zum umsatzlimitierenden Faktor der Pyritverwitterung. Deshalb wurde für die Modellierung ein analytischer Modellansatz für die eindimensionale Sauerstoffdiffusion nach [Gibson u. a. 1994] verwendet. Nach den Modellrechnungen ergab sich für die sekundäre Pyritverwitterung für die konkreten technologischen und geologischen Bedingungen des Tagebaus Nochten ein mittlerer Verwitterungsumsatz von 22 % des Ausgangsgehaltes in der Vorkippe und von 4 % des Ausgangsgehaltes in der Hauptkippe (Bild 31).

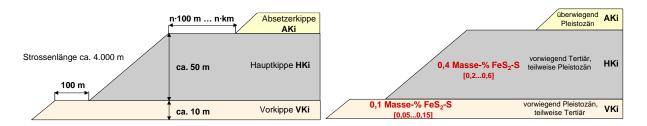
Tabelle 18: Ausgangsgehalte, mittlere Expositionszeiten, mittlere Umsätze und mittlere Stofffreisetzung in der Kippe des Tagebaus Nochten (in Klammern: Spannweite der gemessenen bzw. berechneten Werte) [IWB 2001b]

ac. gemeeed a 200 commeter traits, [2 200 to]								
Umsatzraum		gehalt E	Mittlere Expositions- zeit	Mittlerer Umsatz [% vom Ausgangs- gehalt]	Mittlere Stofffreisetzung		Anteil am Gesamt- umsatz	
					Sulfat [t/d]	Eisen [t/d]	[%]	
Vor- kippe	Böschung	0,10 [0,050,15]	0,8 Tage [0,00130]	12 [618]	15	4	8	
	Oberfläche	0,10 [0,050,15]	134 Tage	22 [1030]	22	6	12	
Haupt- kippe	Böschung	0,40 [0,20,6]	0,8 Tage [0,00130]	1,7 [0,92,6]	48	14	24	
	Oberfläche	0,40 [0,20,6]	36 Jahre	4,0 [2,06,0]	110	31	56	
Summe					195	55	100	

Die Bilanzierung zum Stichtag im Jahr 2000 ergab, dass im untersuchten Segment der Innenkippe des Tagebaus Nochten im Mittel 195 t/d Sulfat und 55 t/d Eisen durch die Pyritverwitterung freigesetzt wurden (Bild 31). Die Stofffreisetzung ging dabei zu ca. 80 % auf die Hauptkippe und zu ca. 20 % auf die Vorkippe zurück. Nahezu ein Drittel des kippenseitigen Verwitterungsumsatzes erfolgte durch die Sauerstoffeinlagerung während der Abtragung, des Transports und der Verkippung sowie durch die kurzzeitige Exposition an den Kippenböschungen (primäre Pyritverwitterung) und etwa zwei Drittel durch die sekundäre Pyritverwitterung. In der Vorkippe erfolgte der höchste prozentuale Umsatz der Ausgangsgehalte. Die ursprünglichen Eisendisulfide wurden dort zu etwa 34 % verwittert. In der Innenkippe des Tagebaus Nochten unterlagen damit im Mittel etwa 7 % des Pyrits im Deckgebirge der primären und sekundären Verwitterung [IWB 2001b].

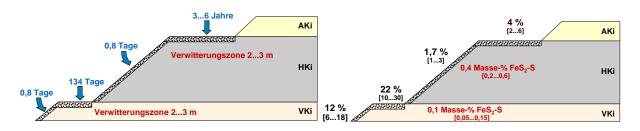


Pyrit-Schwefel-Inventar



mittlere kippenseitige Expositionszeiten

mittlerer Pyritschwefel-Umsatz in Prozent vom Ausgangsgehalt



mittlerer Pyritschwefel-Umsatz als Anteil an der Gesamtfreisetzung

Sulfat- und Eisenfreisetzung

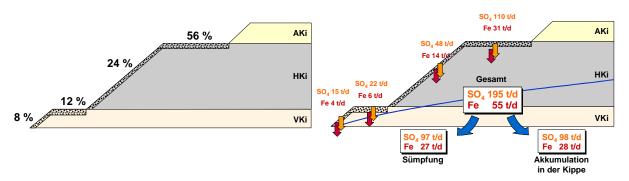


Bild 31: Bilanzierung der kippenseitigen Pyritverwitterung im Tagebau Nochten [IWB 2001b]

Im **Tagebau Reichwalde** erfolgten im Jahr 2001 erste Untersuchungen zu den geochemischen Eigenschaften der Abraummaterialien und zu den hydrochemischen Eigenschaften des Kippenwassers [BTU 2001]. In den Jahren 2009 und 2011 wurden weitere vertiefende Untersuchungen zur Beschaffenheit des Sümpfungswassers [IWB 2009] sowie zu den geochemischen Eigenschaften der Deckgebirgsund Kippensedimente durchgeführt [IWB 2011e].

Die Erkundungsergebnisse zeigen, dass der Pyritschwefel überwiegend in den tertiären Deckgebirgssedimenten enthalten ist. In den bindigen Hangendschluffen des 2. Lausitzer Flözhorizontes und im Hangendschluff des Oberbegleiterkomplexes wurden Gesamtschwefel-Gehalte bis 3,0 Masse-% und Disulfidschwefel-Gehalte bis 2,1 Masse-% gemessen. In den rolligen tertiären Deckgebirgsschichten waren die Gehalte mit 0,1 bis 0,6 Masse-% Gesamtschwefel und maximal 0,4 Masse-% Disulfidschwefel geringer. In den überwiegend rolligen quartären Deckgebirgssedimenten lagen der Gesamtschwefel-Gehalt unter 0,1 Masse-% und der Disulfidschwefel-Gehalt unter 0,05 Masse-% (Bild 32).

Calciumkarbonat wurde nur in geringen Gehalten von meist < 0,1 Masse-% gefunden. Vereinzelt höhere Gehalte bis 0,4 Masse-% wurden in den Sedimenten der Oberen Talsande (G122) und Schmelzwassersedimenten des Saale-Komplexes (G15) gemessen. Höhere Calciumkarbonatgehalte sind in den randlich im südlichen Feldesteil verbreiteten Geschiebemergeln zu vermuten.

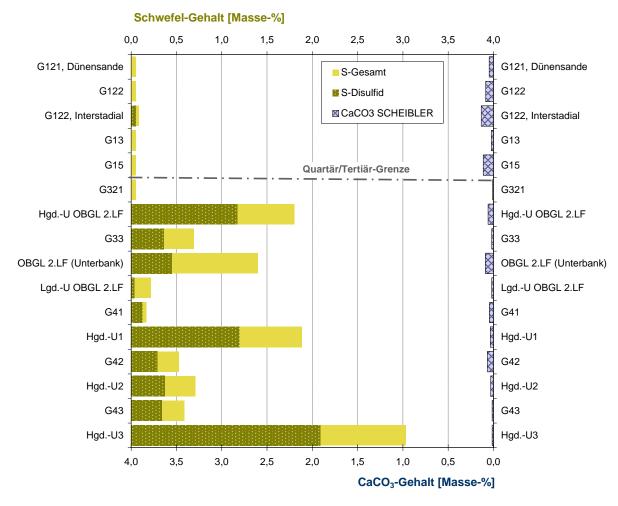


Bild 32: Gewichtete Schwefel- und Calciumkarbonatgehalte der quartären und tertiären Deckgebirgssedimente des Tagebaus Reichwalde



Im Südfeld des Tagebaus Reichwalde beträgt der mittlere Disulfidschwefel-Gehalt des Deckgebirges 0,35 Masse-%. Der Umsatz der primären Pyritverwitterung wurde durch eine Sauerstoffbilanz für den luftgefüllten Porenanteil des entwässerten Gebirges und der bei der Abbagerung und Verkippung belüfteten Kippensedimente ermittelt [IWB 2011e]. Der Umsatz der primären Pyritverwitterung beträgt danach rund 2 % des mittleren Ausgangsgehaltes.

Die Quantifizierung der sekundären Pyritverwitterung erfolgte modellgestützt unter Berücksichtigung der Sauerstoffdiffusion in Abhängigkeit der bodenphysikalischen Eigenschaften der Kippensedimente, dem Ausgangsgehalt an Disulfidschwefel sowie der Expositionszeit der Kippenoberflächen.

Die Expositionszeiten der Abraumsedimente an der Hauptkippenoberfläche wurden durch Überlagerung der geplanten Jahresscheiben des Kippenfortschritts und der Absetzerverkippung ermittelt. Sie liegen technologisch bedingt derzeit zwischen weniger als 2 Jahren und maximal 9 Jahren (Bild 33).

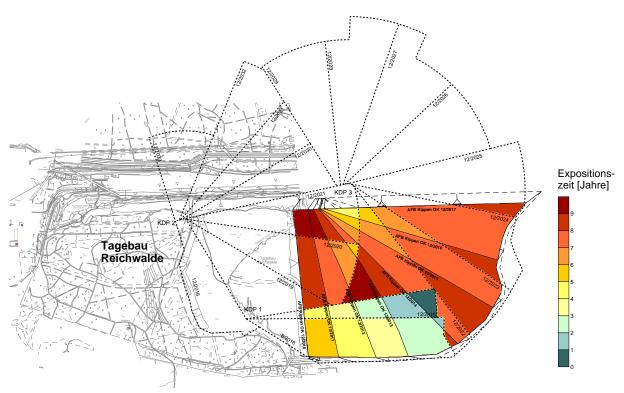


Bild 33: Expositionszeit der Kippensedimente an der Hauptkippenoberfläche des Tagebaus Reichwalde, [IWB 2011e]

Aus der Überlagerung der Expositionszeiten mit den räumlich differenzierten stofflichen und bodenphysikalischen Eigenschaften des Abraums resultiert hieraus ein Umsatz der sekundären Pyritverwitterung von etwa 5 % des Ausgangsgehalts. Die dadurch verursachte Stofffreisetzung liegt im untersuchten Kippenfeld zwischen 10 und 70 kg Sulfat je Quadratmeter Kippenfläche. Im Mittel werden durch die Sekundärverwitterung 37 kg Sulfat je Quadratmeter freigesetzt (Bild 34).

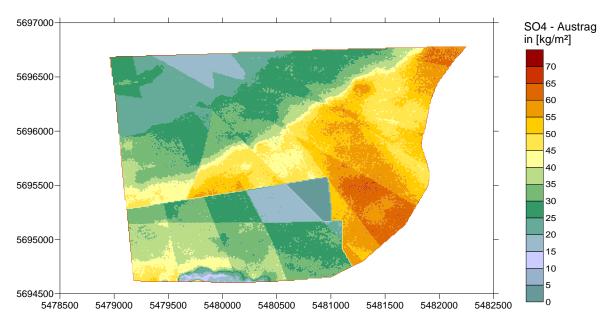


Bild 34: Sekundäre Pyritverwitterung über die unabgedeckte Oberfläche der AFB-Kippe des Tagebaus Reichwalde, berechneter Sulfataustrag in dem bis zum Ende des Jahres 2025 überbaggerten Südfeld (Quelle: [IWB 2011e])

Der mittlere Gesamtumsatz der Pyritverwitterung im Tagebau Reichwalde beträgt 0,026 Masse-% Disulfidschwefel bzw. 7 % vom mittleren Ausgangsgehalt (<u>Bild 35</u>). Der Wert für den relativen Umsatz der Pyritverwitteruing deckt sich mit den Ergebnissen zum Tagebau Nochten (siehe oben).

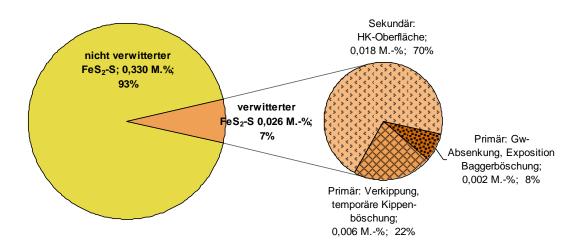


Bild 35: Berechneter Gesamtumsatz an Eisendisulfidschwefel im Tagebau Reichwalde (Quelle: [IWB 2011e])

Für die anderen Lauitzer Braunkohlentagebaue mit Förderbrückentechnologie, eingeschlossen die brandenburgischen Tagebaue Welzow-Süd, Cottbus-Nord und Jänschwalde, wurden vergleichbare Größenordnungen für den mittleren Pyritumsatz ermittelt. Unter Einbeziehung aller Unschärfen bei der Ermittlung des Verwitterungsumsatzes in den aktiven Braunkohlentagebauen lässt sich konservativ eine Spanne von 5 % bis 10 % angeben.



5.1.2 Mitteldeutsches Revier - Kippe Vereinigtes Schleenhain

Die Abraumverkippung erfolgt im Tagebau Schleenhain ausschließlich mit Absetzern. Die Kippe des Tagebaus Schleenhain wird in zwei Ebenen als sogenannte 1. und 2. Kippe geschüttet. Die zwei Kippen setzen sich jeweils aus einer Tiefschüttung und einer Hochschüttung zusammen. Der gesamte Kippenaufbau wird durch eine ca. 3 Meter mächtige Kulturbodenschüttung abgeschlossen (Bild 36).

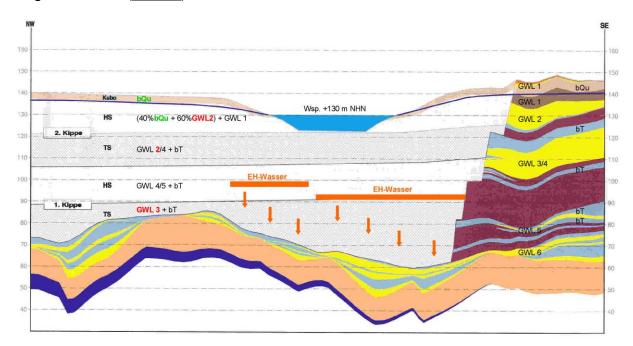


Bild 36: Prinzipieller Aufbau der Innenkippe des Tagebaus Vereinigtes Schleenhain im Bereich der Breunsdorfer Senke (Quelle: MIBRAG)

Von der MIBRAG wurde die Zusammensetzung der Kippe im Bereich des künftigen Neukieritzscher Sees aus der Kenntnis des Aufbaus des Deckgebirges für die Jahresscheiben 2012 bis 2017 im Verschnitt mit der Technologie der Abraumförderung und -verbringung wie folgt abgeleitet ([IWB 2005], siehe <u>Tabelle 19</u>).

Tabelle 19: Kippenzusammensetzung im Bereich des Neukieritzscher Sees [IWB 2005]

Schüttebene der Kippe	Abbauseitige Herkunft	Stratigraphie	FeS ₂ [Masse-%]	CaCO ₃ [Masse-%]	Anteil [%]
2 Kippo	1. Schnitt	Quartär	0,2	4,2	40
2. Kippe (Hochschüttung)	Überwiegend 4. und 5. Schnitt	Tertiär	0,7	0,2	60
2. Kippe (Tiefschüttung)	Überwiegend 4. und 5. Schnitt	Tertiär	0,6	0,1	100
1. Kippe (Hochschüttung)	Überwiegend 2. und 3. Schnitt	Tertiär	0,7	0,2	100
1. Kippe (Tiefschüttung)	Überwiegend 2. und 3. Schnitt	Tertiär	0,7	0,2	100

Aus qualitativen Faktoren und bisherigen Erfahrungswerten wurden für die Kippe Schleenhain im Mittel folgende Verwitterungsanteile vom ursprünglichen Pyritgehalt der Sedimente geschätzt:

- kohlige und bindige tertiäre Substrateca. 5 %
- rollige tertiäre Substrateca. 10 %

Für die Kippe wurden die Säurebildner und das Puffervermögen unter Verwendung der geschätzten Verwitterungsraten und entsprechend der eingebauten Substratanteile bilanziert (<u>Tabelle 20</u>). Die Ergebnisse stellen die Erwartungswerte des Versauerungspotentials für die Innenkippe des Abbaufeldes Schleenhain unter Berücksichtigung der spezifischen Exposition dar. Die Ergebnisse der Säure-Basen-Bilanzierung zeigen, dass die drei unteren Schüttebenen, d. h. die zwei Schüttungen der 1. Kippe und die Tiefschüttung der 2. Kippe, potentiell zur Versauerung neigen. Für die Hochschüttung der 2. Kippe wird aufgrund der hohen Anteile pleistozäner Sedimente, insbesondere von Elstergeschiebemergeln, keine Versauerungsgefahr prognostiziert [IWB 2005].

Tabelle 20: Versauerungspotential der Innenkippe des Abbaufeldes Schleenhain [IWB 2005]

Schüttebene der Kippe	Stratigraphie	Verwitterungsrate [% vom Ausgangsgehalt]	Säure-Base-Bilanz
	Quartär	0	0,05
2. Kippe (Hochschüttung)	Tertiär (bindig)	5	d. h. im Überschuss
(Treeneenation)	Tertiär (rollig)	10	gepuffert
2. Kippe	Tertiär (bindig)	5	> 1,
(Tiefschüttung)	Tertiär (rollig)	10	d. h. versauernd
1. Kippe	Tertiär (bindig)	5	> 1,
(Hochschüttung)	Tertiär (rollig)	10	d. h. versauernd
1. Kippe	Tertiär (bindig)	5	> 1,
(Tiefschüttung)	Tertiär (rollig)	10	d. h. versauernd

Durch neuere Untersuchungen zum Versauerungspotential wurden Unterschiede in der Geochemie des Deckgebirges zwischen den Abbaufeldern Peres und Schleenhain festgestellt [Hoth u. a. 2010]. In den tertiären Sanden des GWL 2 im Abbaufeld Peres wurden deutlich höhere verwitterbare Schwefelgehalte bis 2,8 Masse-% im Vergleich zu den tertiären Sanden des Feldes Schleenhain (hier < 1,3 Masse-%) gefunden. Allerdings sind die Mächtigkeiten des quartären Deckgebirges im Feld Peres höher als im Abbaufeld Schleenhain. Der Anteil puffernder Carbonate im Geschiebemergel der Elsterkaltzeit liegt im Abbaufeld Schleenhain unter 1 Masse-%, im Abbaufeld Peres dagegen über 1 Masse-%.

Zur Verbesserung der gesamten Säure-Basen-Bilanz der Innenkippe des Tagebaus Schleenhain werden die alkalischen Eisenhydroxidschlamme aus der GWRA Neukieritzsch in die Innenkippe eingespült (Bild 36). Inwieweit die lokale Einspülung der Eisenhydroxidschlämme Auswirkungen auf die Formierung der Kippenwasserbeschaffenheit hat, ist durch künftige Untersuchungen nachzuweisen.



5.2 Sanierungsbergbau

der Braunkohle - Abschlussbericht

Die relevanten Stoffquellen im Sanierungsbergbau sind die Innenkippen, Außenhalden sowie die belüfteten Grundwasserleiter im Umfeld der Tagebaue (<u>Bild 37</u>). Die einzelnen Stoffquellen unterscheiden sich hinsichtlich des Pyritgehaltes und der Umsatzraten der Pyritverwitterung (<u>Tabelle 21</u>).

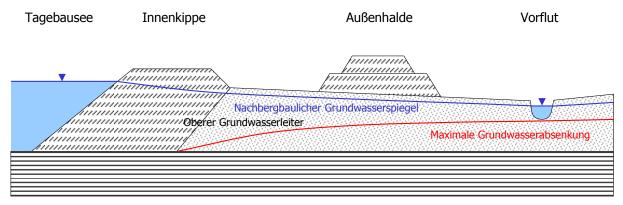


Bild 37: Typische Stoffquellen im Sanierungsbergbau, nach [IWB 2010]

Tabelle 21: Einschätzung des Umfanges der Pyritverwitterung in den Stoffquellen des Sanierungsbergbaus [IWB 2010]

Quelle	Gehalt an Pyritschwefel	Umsatzrate des Pyrits	Zeitdauer der Verwitterung
Grundwasserleiter (belüftete Lamelle)	Gering	Hoch bis vollständig: 50 % 100 %	Praktisch abgeschlossen
Innenkippe	Massenanteilig Quartär und Tertiär	Anteilig: 5 % 10 %	schließt mit dem Grundwasser- wiederanstieg ab
Außenhalde	Massenanteilig Quartär und Tertiär	Hoch bis Vollständig: 50 % 100 %	Langfristig bis zum vollständigen Umsatz

Im Unterschied zu den Innenkippen befinden sich die Außenhalden dauerhaft oberhalb des Grundwasserspiegels. Die Pyritumsetzung erfolgt auf Grund des fehlenden Grundwassers vollständig. Die Verwitterungsprodukte werden mit dem Sickerwasser über einen langen Zeitraum ausgetragen. Auch die pleistozänen Sedimente mit fluviatiler Genese sind nicht frei von Pyrit. Der absolute Verwitterungsumsatz des Pyrits kann bei längerer Entwässerung der pleistozänen Sedimente eine vergleichbare Größenordnung wie in den Mischbodenkippen der Tagebaue erreichen, wo Pyrit aufgrund der Überkippung nur anteilig verwittert (vgl. <u>Kapitel 5.1.1</u>).

Im Unterschied zum aktiven Braunkohlenbergbau kann die Pyritverwitterung in den Sanierungstagebauen praktisch nicht mehr beeinflusst werden. Der Sanierungsbergbau ist mit den Verwitterungsprodukten konfrontiert. Es ist deshalb von Interesse, in welchem Umfang die Verwitterungsprodukte vorliegen, mit welcher Geschwindigkeit und wohin sie ausgetragen werden.

der Braunkohle - Abschlussbericht



Letztlich mündet die Betrachtung in die Fragestellung, ob überhaupt und wenn, dann in welchen Zeiträumen sich das Kippenwasser in einen dem vorbergbaulichen Zustand vergleichbaren hydrochemischen Zustand regeneriert. Die Antwort auf diese fundamentale Frage des Sanierungssbergbaus soll zunächst nur am Auswaschungsprozess am Beispiel des Tagebaus Lohsa II quantitativ angenähert werden.

Der Stoffaustrag aus den Innenkippen erfolgt durch den Grundwasserabstrom, der aus der Grundwasserneubildung, aus dem Zustrom gewachsenener Grundwasserleiter oder aus Bergbaufolgeseen stammt. Unter gesättigten Verhältnissen speist sich der Stoffaustrag durch das während der Pyritoxidation entstandene Stoffinventar, das im Porenwasser und an Feststoffe gebunden vorliegt (Bild 38).

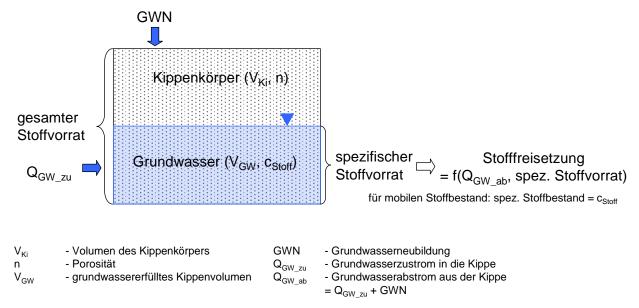


Bild 38: Vereinfachtes Schema des Stoffbestandes in Braunkohlenabraumkippen und Ermittlung der Stofffreisetzung mit dem Grundwasser aus der Kippe

Die tatsächliche Stofffreisetzung aus den Kippen in das Grundwasser ergibt sich aus dem spezifischen Stoffvorrat und seiner Verfügbarkeit [Bilek 2004].

Freisetzung
$$\left[\frac{mol}{m^3}\right] = Stoffvorrat_{spez} \left[\frac{mol}{m^3}\right] \cdot Verfügbarkeit [-]$$
(Glg. 15)

Die aktuelle Stofffreisetzung entspricht der im Grundwasser gemessenen Stoffkonzentration und stellt den mobilisierbaren spezifischen Stoffvorrat dar. Der spezifische Stoffvorrat kann aus dem gesamten Stoffvorrat und dem durchströmten Kippenvolumen bestimmt werden [Bilek 2004]:

$$Stoffvorrat_{spez} \left[\frac{mol}{m^3} \right] = \frac{Gesamter\ Stoffvorrat\ [mol]}{Durchströmtes\ Kippenvolumen\ [m^3]} \qquad ... (Glg.\ 16)$$

Der gesamte Stoffvorrat setzt sich aus dem im Porenwasser gelösten und einen sedimentgebundenen Anteil zusammen. Der gelöste Stoffvorrat ist vollständig verfügbar. Die Verfügbarkeit des sedimentgebundenen Stoffvorrates wird im Wesentlichen durch Ionenaustausch und Sekundärminerale bestimmt [Bilek 2004].

der Braunkohle - Abschlussbericht



Der Stoffvorrat ändert sich durch Stoffaustrag mit dem abströmenden Kippenwasser. Die zeitliche Änderung des Stoffstromes wird durch die tatsächliche Stofffreisetzung und durch den Grundwasserstrom (Q_{GW}) bestimmt [Bilek 2004]:

Stoffstrom
$$\left[\frac{\text{mol}}{\text{s}}\right] = Q_{GW} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$$
 · Freisetzung $\left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}\right]$ (Glg. 17)

Die Bilanzierung des Stofffreisetzungspotentials in den Sanierungstagebauen der LMBV wird beispielhaft für den ehemaligen Tagebau Lohsa II durchgeführt. Für diesen Sanierungstagebau sind der Kippenaufbau und die Grundwasserströmung durch Untersuchungen gut bekannt. Die Daten zur Geometrie der Innenkippe Lohsa, die im Wesentlichen dem Baufeld IV entspricht, sind in <u>Tabelle 22</u> zusammengefasst.

Tabelle 22: Geometrie der Innenkippe Lohsa im Baufeld V, Quelle: [BTU 2005]

Kennwerte	Einheit	Baufeld IV
Kippenoberfläche	Mio. m²	10
Mittlere Kippenmächtigkeit	m	30
Kippenvolumen	Mio. m³	300
Reindichte	kg/m³	2.650
Mittlere Trockenrohdichte	kg/m³	1.600
Mittlere Porosität		0,40
Mittlere grundwassererfüllte Kippenmächtigkeit	m	25
Volumen des Kippenwassers	Mio. m³	100
Maximales Grundwasservolumen	Mio. m³	120

Die Grundwasserneubildung auf der Kippenoberfläche wird in [LMBV 2004] mit etwa 250 mm/a angegeben. Aus dem südlich gelegenen Baufeld III strömt Kippenwasser und aus der Uhyster Rinne Grundwasser aus gewachsenen Grundwasserleitern zu. Abstrom aus der Kippe erfolgt im Wesentlichen nach Nordwesten in die Teilbecken Nordostmarkscheide und Drehpunkt Kolpen. Die mittleren Bilanzströme der Kippe Lohsa sind in der <u>Tabelle 23</u> zusammengefasst. Einen generellen Überblick über die Grundwasserströmungsverhältnisse im Bereich Lohsa gibt <u>Bild 39</u>.

Tabelle 23: Mittlere Wasserbilanz des Baufeldes IV im Tagebau Lohsa, Quellen: [BTU 2003b], [BTU 2005]

Bilanzkomponente		Mittlerer Volumenstrom
		[Mio. m³/a]
Zustrom	Mittlere Grundwasserneubildung auf der Kippenoberfläche	2,5
zur Kippe	Grundwasserzufluss aus dem Baufeld III und der Uhyster Rinne	≥ 1,0
Abstrom aus der Kippe	zum TB Nordostmarkscheide zum TB Drehpunkt Kolpen	3,5

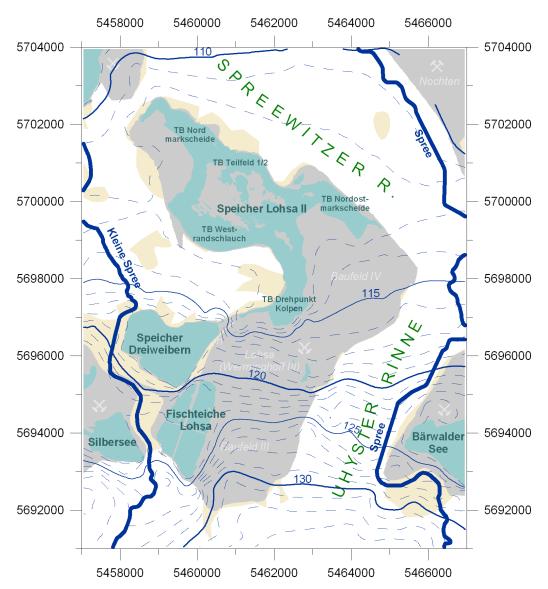


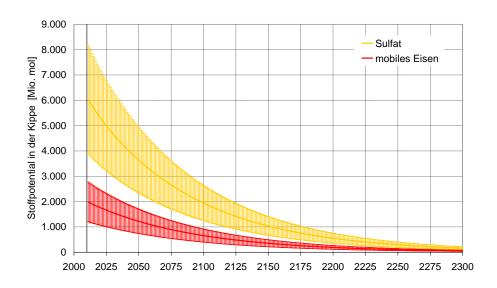
Bild 39: Hydroisohypsenplan von 2011 im Bereich des ehemaligen Tagebaus Lohsa

Basierend auf den Daten zur aktuellen Beschaffenheit des Kippenwassers ergibt sich für die Innenkippe im Baufeld IV des Tagebaus Lohsa II eine mittlere Stofffreisetzung von etwa 24 mmol/L Sulfat und etwa 8 mmol/L gelöstes Eisen (Tabelle 24).

Tabelle 24: Aktuelles Stofffreisetzungspotential der Kippe Lohsa II

Kenngröße Stofffreisetzungspotential	Einheit	Sulfat	Eisen
Mittlere Konzentration im Grundwasser	mg/L	1.5003.200	250650
Aktuelle Stofffreisetzung	mmol/L	1530	510
Mittlerer Grundwasserabstrom	Mio. m³/a	3,5	3,5
Mittlerer Stoffstrom	Mio. mol/a	50120	1540
Mittleres grundwassergefülltes Kippenvolumen	Mio. m³	250	250
Gesamter mobiler Stoffvorrat	Mio. mol	4.0008.300	1.2002.800

Aus dem aktuellen Stoffstrom, dem gesamten mobilen Stoffvorrat und der Wasserbilanz der Innenkippe des Baufeldes IV im Tagebau Lohsa II lässt sich die zeitliche Entwicklung des mobilen Stoffvorrates und der Stofffreisetzung wie folgt abschätzen (Bild 40). Der große Fehlerbereich in der Darstellung geht auf die große Spanne der Daten zur Kippenwasserbeschaffenheit zurück.



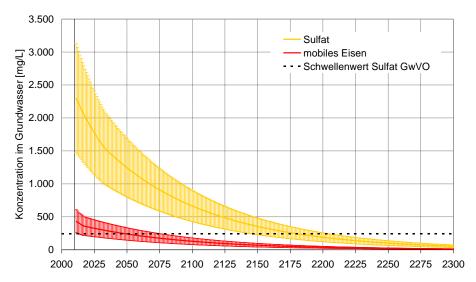


Bild 40: Zeitlicher Verlauf des mobilen Stoffvorrates in der Kippe (oben) und des Austrages an Sulfat und Eisen mit dem Grundwasserabstrom aus der Kippe Lohsa (unten)

Aus den Berechnungen geht hervor, dass sich der Stoffvorrat erst in etwa 60 Jahren halbieren wird (<u>Bild 40 oben</u>). Aus <u>Bild 40 unten</u> lässt sich ableiten, dass eine Sulfatkonzentration unterhalb des Schwellenwertes der Grundwasserverordnung infolge von Auswaschungsprozessen erst in mehr als hundert Jahren erreicht sein wird. Da die Strömungsverhältnisse im Bereich Lohsa II stabil sind (<u>Bild 39</u>), bleibt die Belastung des Speichers Lohsa II und in der Folge auch der Kleinen Spree und der Spree mit den Oxidationsprodukten der Pyritverwitterung, insbesondere Sulfat, über lange Zeit bestehen.

6 Aktuelle Kippenwasserbeschaffenheit

6.1 Lausitzer Revier

6.1.1 Innenkippe des Tagebaus Nochten

Durch die Prozesse der primären und sekundären Pyritverwitterung einschließlich der geochemischen Folgereaktionen (vgl. <u>Abschnitt 4.2</u>) wird das Kippenwasser im Tagebau Nochten gegenüber dem Grundwasser der ehemals gewachsenen Grundwasserleiter mit löslichen Inhaltsstoffen angereichert. Eine Anreicherung erfahren insbesondere Sulfat, Kohlensäure, Calcium, Magnesium, Eisen und Mangan. Da in der Kippe anoxische Bedingungen vorherrschen, liegt Eisen im Kippenwasser überwiegend als zweiwertiges reduziertes Ion vor. Der pH-Wert liegt meist im Bereich zwischen 4 und 6. Im sauren Milieu bei pH < 5 werden zusätzlich Aluminium und spezifische Schwermetalle (insbesondere Kobalt, Nickel und Zink) aus der Gesteinsmatrix gelöst.

Die Beschaffenheit des Kippenwassers im Tagebau Nochten wurde in verschiedenen Arbeiten bereits umfassend untersucht, so dass ein guter Kenntnisstand vorliegt (siehe <u>Tabelle 25</u>). Das Grundwasser in der Kippe des Tagebaus Nochten ist durch eine elektrische Leitfähigkeit von 2.000 bis über 4.000 μS/cm gekennzeichnet. Sie wird durch eine Sulfatkonzentration zwischen 1.500 und über 4.000 mg/L verursacht. Die Eisenkonzentration des Kippenwassers liegt überwiegend zwischen 100 und 1.000 mg/L, mit Ausnahme der randständigen Grundwassermessstellen. Unter unbelüfteten Bedingungen nimmt der pH-Wert vornehmlich moderate Werte zwischen 4 und 6 an. Nach Belüftung stellt sich jedoch ein pH-Wert im stark sauren Bereich zwischen 2,8 und 3,5 ein. Die Acidität des Kippenwassers als K_{B4.3} nimmt dann Werte zwischen 2 und 22 mmol/L an.

Der Grundwasserspiegel in der Kippe Nochten liegt überwiegend noch sehr tief. Er steigt von Südwesten und von Süden langsam an. Seit der Außerbetriebnahme der Randriegel tritt an diesen Flanken Grundwasser aus den pleistozänen Grundwasserleitern der Zentrallausitzer Rinnen und der Nochten-Pecherner Rinne in die Kippe des Tagebaus über, was zu einer Verdünnung des Kippenwassers in den Randbereichen führt. Wegen des tiefen Grundwasserspiegels konnten bislang nur Teilbereiche der Innenkippe mit geeigneten Grundwassermessstellen erschlossen werden. Deshalb werden zum Vergleich auch die hydrochemischen Befunde zu den Entwässerungsanlagen im Kippenbereich mit verwendet.



Tabelle 25: Grundwasserbeschaffenheit in der Kippe Nochten, Quelle: [IWB 2011b]

Bereich		Anzahl der	-Hd	Elektrische Leitfähigkeit	Sulfat	Eisen	Aluminium	K ^{ox} K _{B4.3}	Reaktion
		Proben	Wert	mS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mmol/L	Belüftung
Hochkippenriegel HKR Nord und Hochkippenbrunnen HKBr 1-23	zentral	19	3,85,2	2.2004.200	1.4003.300	260850	< 10	518	stark sauer
Hochkippenriegel HKR Ost	zentral	-	5,2	1.400	800	100	~	2	sauer
Vorkippenriegel VKO und VKNO	zentral	15	4,34,9	2.5004.000	1.6003.100	140640	225	314	stark sauer
Dränagen SWH 1-10	zentral	14	3,14,8	3.0004.400	2.2004.100	4001.000	590	822	stark sauer
Hebergalerie: Sammelschacht 1	zentral	38	3,35,0	2.0004.000	1.6003.200	270730	515	617	stark sauer
Sammelableiter des Kippenwassers zur GWBA Tzschelln, HK-Ableiter-Ost, HK-Ableiter-West	zentral	3	4,74,9	2.5003.000	1.9002.100	280400	< 2	68	stark sauer
Grundwassermessstellen	zentral	8	5,06,0	2.4003.200	1.5002.000	200600	۸ <u>۲</u>	210	sauer bis stark sauer
Grundwassermessstellen	randlich	3	4,66,2	5001.400	200800	40200	۸ ۲	04	schwach sauer bis sauer

Zu einzelnen Grundwassergütemessstellen liegen inzwischen 15-jährige konsistente Datenreihen vor. Aus den Ganglinien können wertvolle Hinweise zur hydrochemischen Genese des Kippenwassers abgeleitet werden. Das soll an einem Beispiel nachfolgend näher erläutert werden.

Die Messstelle 4538(111) repräsentiert ein typisches Kippenwasser der Innenkippe des Tagebaus Nochten. Im Zeitraum des Grundwassergütemonitorings wurde hier ein Grundwasseranstieg um etwa 30 Meter erfasst (Bild 44). In der frühen Phase dominierten die Pyritverwitterung und deren geochemische Begleitreaktionen. Die Kulmination der Stoffkonzentration des Kippenwassers wurde in den Jahren 2001 bis 2004 erreicht. Die Sulfatkonzentration des Kippenwassers erreichte dabei fast 3.000 mg/L und die Eisenkonzentration fast 900 mg/L. Mit dem weiteren Grundwasseranstieg wurde die Stoffkonzentration des Kippenwassers anschließend verdünnt. Die betreffende Grundwassergütemessstelle liegt am Rand der Kippe Nochten in der Nähe zur Spreewitzer Rinne (Bild 41). Die Verdünnung lässt sich auf das Eindringen von Grundwasser aus den pleistozänen Grundwasserleitern der Spreewitzer Rinne zurückführen. Vergleichbare Entwicklungen im Trend lassen sich auch an den anderen randständigen Grundwassermessstellen beobachten. Die Eisenkonzentration und die potentielle Acidität des Kippenwassers in den randständigen Messstellen ist inzwischen deutlich niedriger als in den zentral gelegenen Messstellen (Bild 42 und Bild 43).

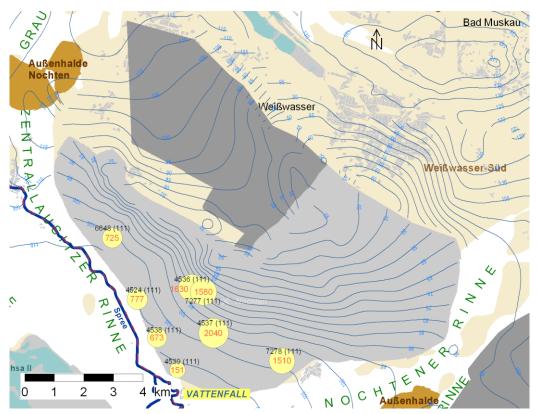


Bild 41: Sulfatkonzentration des Kippenwassers im Tagebau Nochten in Grundwassermessstellen, Quelle: [IWB 2011a] (hellbraun: Kohlenfelder, dunkelgrau: in Anspruch genommene Abbauflächen, hellgrau: genehmigte Abbauflächen, braun: Außenhalden, blau: Bergbaufolgeseen)

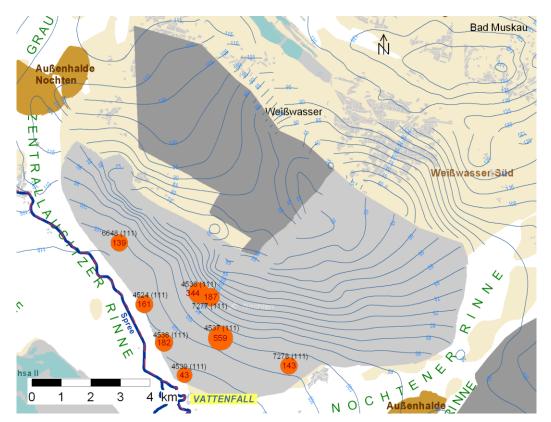


Bild 42: Eisenkonzentration des Kippenwassers im Tagebau Nochten, Quelle: [IWB 2011a] (Legende siehe Bild 41)

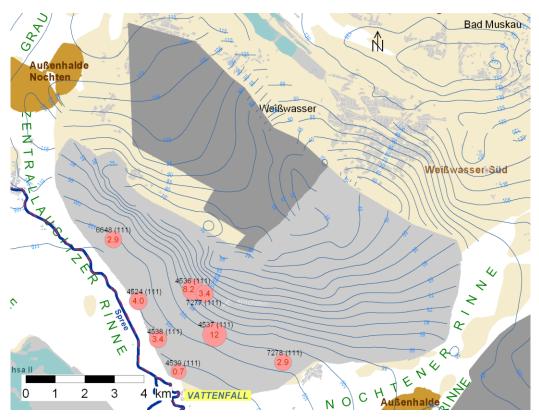


Bild 43: Potentieller Versauerungsgrad als $K_{B4.3}^{ox}$ bei Belüftung des Kippenwassers im Tagebau Nochten, Quelle: [IWB 2011a] (Legende siehe Bild 41)

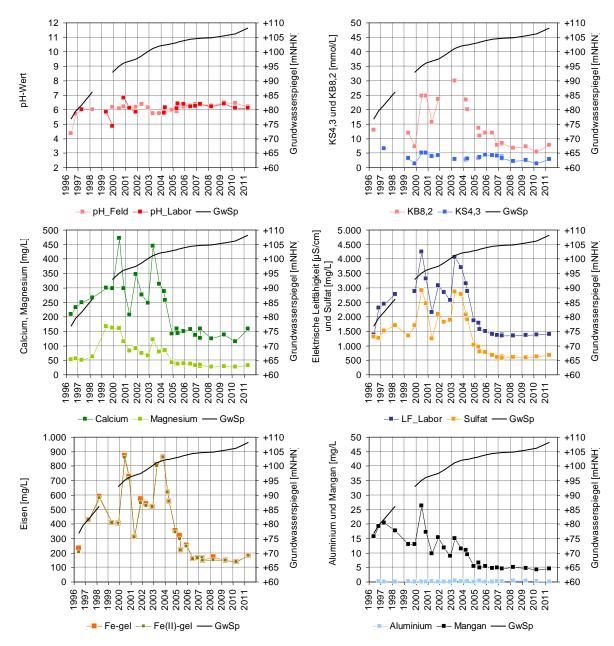


Bild 44: Entwicklung hydrochemischer Kennwerte in der Grundwassermessstelle 4538(111) am westlichen Kippenrand des Tagebaus Nochten, Quelle: [IWB 2011b]

Aufgrund der entwässerungstechnologischen Konstellation und hydrogeologischen Situation des Tagebaus Nochten strömt bislang kein Kippenwasser in die gewachsenen Grundwasserleiter ab. Im Tagebau Nochten liegt aus stofflicher Sicht eine Immissionssituation vor. Das gehobene Kippenwasser wird in der GWBA Tzschelln behandelt. Durch die Wasserbehandlung werden die Säuren neutralisiert sowie die Metalle Eisen, Aluminium und teilweise Mangan ausgefällt. Dabei entsteht ein neutrales, gut gepuffertes und metallarmes Wasser (Tabelle 26). Durch die Wasserbehandlung nach dem Stand der Technik wird aus dem Sümpfungswasser jedoch kein Sulfat abgetrennt. Das gereinigte Sümpfungswasser wird derzeit ausschließlich in die Spree eingeleitet.

der Braunkohle - Abschlussbericht



Tabelle 26: Wasserbeschaffenheit des Rohwassers und des gereinigten Sümpfungswassers der GWBA Tzschelln im Dezember 2005, Quelle: [IWB 2011b]

Kennwert	Maß- einheit	Rohwasser im Zulauf	behandeltes Sümpfungswasser
Temperatur (vor Ort)	°C	+11,2	+12,2
pH-Wert (vor Ort)		4,6	7,9
pH-Wert (Labor)		3,1	8,0
Elektrische Leitfähigkeit 25°C	μS/cm	3.190	2.950
K _{B4,3}	mmol/L	2,6	-
K _{S4,3}	mmol/L	-	3,1
K _{B8,2}	mmol/L	14,0	0,38
TIC	mg/L	67	37
DOC	mg/L	4,8	5,3
Natrium	mg/L	9,9	29,3
Kalium	mg/L	6,3	12,6
Calcium	mg/L	301	656
Magnesium	mg/L	108	115
Chlorid	mg/L	20,8	21,4
Sulfat	mg/L	1.970	2.000
gelöstes Eisen	mg/L	365	0,5
gelöstes Eisen(II)	mg/L	278	0,4
Aluminium	mg/L	1,43	0,03
Mangan	mg/L	5,41	1,44
Zink	mg/L	0,370	0,003
Nickel	mg/L	0,205	0,011
Kobalt	mg/L	0,098	0,003
Arsen	mg/L	< 0,01	< 0,01

Mit der weiteren Laufzeit des Tagebaus Nochten wird sich die Kippenfläche weiter vergrößern. Entsprechend vergrößern sich auch das Volumen des Kippenwassers und der hier akkumulierte Stoffvorrat. In den nächsten Jahren wird auch weiterhin kein Kippenwasser in die gewachsenen Grundwasserleiter übertreten. Damit bleibt die Immissionssituation für die Innenkippe des Tagebaus Nochten erhalten. Das Kippenwasser wird durch die Sümpfungsanlagen innerhalb der Tagebaukontur gefasst und der Wasserbehandlung zugeführt. Der partielle Verdünnungsprozess an den Flanken des Tagebaus Nochten wird weiter fortschreiten.

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften



6.1.2 Innenkippe des Tagebaus Reichwalde

der Braunkohle - Abschlussbericht

Die Wasserhebung im Tagebau Reichwalde beträgt aktuell ca. 120 m³/min. Rund 110 m³/min des Sümpfungswassers stammen aus Rand- und Feldriegeln. Nur rund 10 m³/min entfallen auf die kippenseitigen Entwässerungsanlagen. Rund 7 m³/min Kippenwasser werden über Filterbrunnen der Hoch- und Vorkippenriegel gehoben. Weitere rund 3,0 m³/min Kippenwasser werden über Dränagen am Kippenfuß und Sonderwasserhaltungen im Nordrandschlauch gefasst (Bild 45).

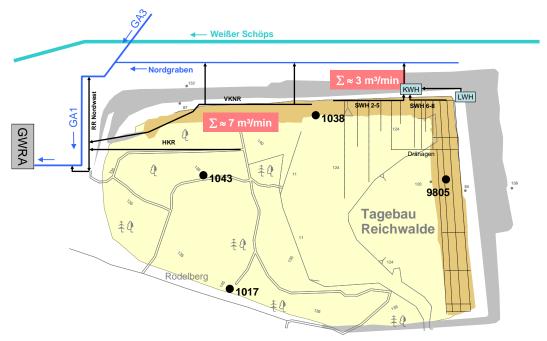


Bild 45: Schematische Übersicht zur kippenseitigen Entwässerung des Tagebaus Reichwalde

Aktuelle Angaben zur Beschaffeneit des Kippenwassers im Tagebau Reichwalde liegen aus dem Grundwassergütemonitoring und aus Sonderuntersuchungen vor. Im Rahmen des Grundwassergütemonitorings der Vattenfall Europe Mining AG wurden bisher vier Grundwassermessstellen auf der Kippe des Tagebaus Reichwalde untersucht (Bild 45). Die Befunde zeigen ein typisches Kippenwasser des Lausitzer Braunkohlereviers. Das anoxische Kippenwasser ist mit pH ≈ 5 bis 6 schwach sauer und infolge einer hohen Kohlensäurekonzentration durch eine Säurekapazität von $K_{S4,3}\approx 2,5$ bis 4,5 mmol/L gekennzeichnet. Die Konzentration von Sulfat und Eisen ist örtlich unterschiedlich. In zwei Messstellen ist das Kippenwasser eher mäßig mit Sulfat (1.000 bis 2.000 mg/L) und Eisen (200 bis 300 mg/L) belastet (Bild 46). In zwei weiteren Messstellen werden deutlich höhere Sulfat- und Eisenkonzentrationen festgestellt. Die Konzentrationen reichen hier bis 4.500 mg/L Sulfat und bis 800 mg/L Eisen. Weiterhin sind im Kippenwasser Mangan von 10 bis 25 mg/L und Ammoniumstickstoff von 3 bis 5 mg/L enthalten.

In den kippenseitigen Dränagen und Sonderwasserhaltungen wird Sulfat bis 3.100 mg/L und Eisen bis 800 mg/L gemessen. Im Unterschied zu den Grundwassermessstellen werden in den Sonderwasserhaltungen bereits niedrigere pH-Werte zwischen 4,5 und 6,0 gemessen. Am Ausguss der Dränagen und in der offenen

Liegendwasserhaltung sinkt der pH-Wert bis pH \approx 3. Hohe Redoxpotentiale zeigen, dass das Kippenwasser hier bereits Kontakt mit Sauerstoff hat. Im sauren Wasser sind Eisen(III)-Konzentrationen bis 20 mg/L nachweisbar.

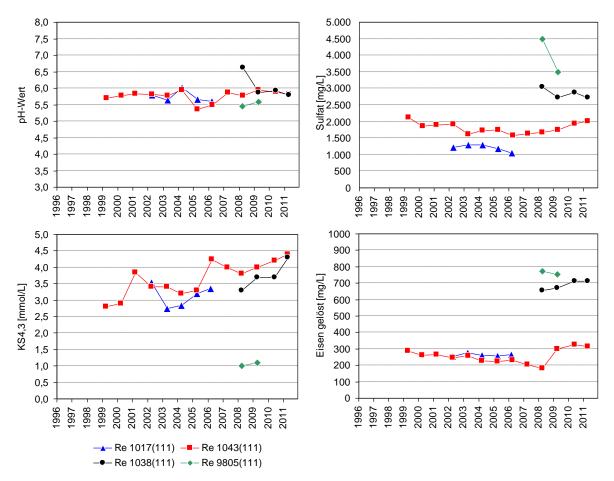


Bild 46: Ganglinien maßgeblicher Kennwerte der Grundwasserbeschaffenheit in der Innenkippe des Tagebaus Reichwalde, Quelle: Daten des Grundwassergütemonitorings der VEM

Aus den Kippenriegeln des Tagebaus wird ein Mischwasser gefasst, dass sich aus "echtem" Kippenwasser und unbeeinflusstem Grundwasser der Liegendgrundwasserleiter zusammensetzt. Die Mengenanteile lassen sich nicht differenzieren. Die Sulfatkonzentration liegt zwischen 1.000 und 2.500 mg/L und die Eisenkonzentration zwischen 130 und 570 mg/L.

Neben Eisen und Sulfat ist das Kippenwasser des Tagebaus Reichwalde mit Calcium, Magnesium, Mangan, Ammonium und, unter sauren Milieubedingungen, auch mit Aluminium angereichert. In <u>Bild 47</u> ist die mittlere stoffliche Anreicherung des Kippenwassers der Sonderwasserhaltungen und Dränagen im Vergleich zum bergbaulich unbeeinflussten Grundwasser der Feldriegel und der südlichen Randriegel des Tagebaus dargestellt.

Die Formierung des Kippenwassers im Tagebau Reichwalde kann am Kontrast zur Grundwasserbeschaffenheit im Vorfeld des Tagebaus aufgrund der hohen Messpunktdichte anschaulich dargestellt werden (Bild 48).

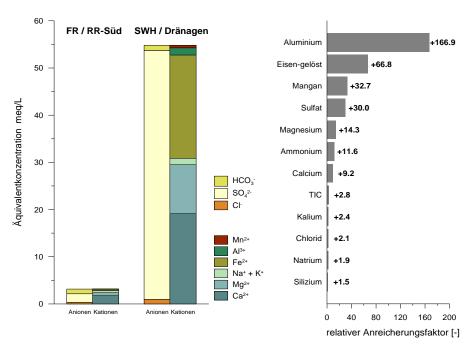


Bild 47: Vergleich der mittleren hydrochemischen Zusammensetzung des unbeeinflussten Grundwassers im Vorfeld des Tagebaus Reichwalde und des Kippenwassers der Sonderwasserhaltungen und Dränagen, Quelle: [IWB 2011e]

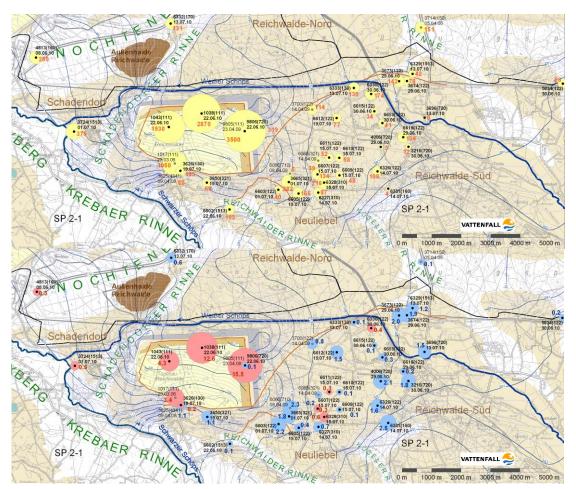


Bild 48: Grundwasserbeschaffenheit als Sulfatkonzentration in mg/L (oben) und potentielle Alkalinität in mmol/L bei Belüftung (unten) im Vorfeld und in der Innenkippe des Tagebaus Reichwalde (Daten: VEM)

6.1.3 Innenkippen des Sanierungsbergbaus der LMBV

Die Innenkippen des Lausitzer Sanierungsbergbaus der LMBV befinden sich überwiegend im Lausitzer Urstromtal. Es ist durch mächtige und gut durchlässige pleistozäne Grundwasserleiter gekennzeichnet. Die Braunkohleabraumkippen im Lausitzer Urstromtal haben mit einem hohen Anteil rolliger quartärer Sedimente eine gute hydraulische Durchlässigkeit im Vergleich zu den Braunkohleabraumkippen im Bereich des Lausitzer Grenzwalls oder in Mitteldeutschland. Die Lagerstätte des Berzdorfer Reviers befindet sich im Berzdorfer Becken mit einer eigenständigen Geologie und Hydrogeologie.

Im Lausitzer Revier ist der Grundwasserwiederanstieg weitgehend abgeschlossen. Defizitgebiete befinden sich noch im nordsächsischen Teil. Der Grundwasserwiederanstieg wird spätestens mit der Flutung der Bergbaufolgeseen Sedlitz und Meuro abgeschlossen sein. In weiten Teilen ist die Grundwasseranbindung an die Vorflut (z. B. Kleine Spree und Spree im Bereich des Tagebaus Lohsa) erreicht. Die Bergbaufolgeseen werden im aktuellen Zustand bereits überwiegend aus dem Grundwasser gespeist. Die Bergbaufolgeseen haben dadurch meist schon eine überschüssige Grundwasserbilanz und müssen in Einzelfällen ausgeleitet werden (z. B. Burghammer). Die Kippenwasserbeschaffenheit wirkt sich damit direkt auf die Wasserbeschaffenheit in Oberflächengewässern aus.

Die Daten zur aktuellen Kippenwasserbeschaffenheit der ehemaligen Braunkohlentagebaue des Sanierungsbergbaus stammen im Wesentlichen aus dem Grundwassergütemonitoring der LMBV und aus den Gutachten zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit in den Lausitzer Bergbaufolgeseen, die von der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus in Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann seit 1995 im Rahmen des Projektes 112 der LMBV bearbeitet werden (vgl. [BTU 1996], [BTU 2003a], [BTU 2005], [BTU 2006a], [BTU 2006b], [BTU 2009], [BTU 2010], [BTU 2012]). Einen Überblick über die Spannweite der Grundwasserbeschaffenheit in den Kippen der Sanierungstagebaue der LMBV gibt die <u>Tabelle 27.</u>

Tabelle 27: Kippenwasserbeschaffenheit in den ostsächsischen Sanierungstagebauen (Daten: LMBV)

Sanierungs- tagebau	Anzahl Mess-	Sulfat	gelöstes Eisen	K _{B4.3}	рН	рН _{ох}
tagebau	stellen	mg/L	mg/L	mmol/L		
Bärwalde	2	1.2003.400	400900	620	5,45,8	3,03,1
Lohsa II (Baufeld III)	6	2303.400	80350	-88	4,96,4	3,06,0
Lohsa II (Baufeld IV)	2	1.1004.300	260950	522	5,05,5	3,03,1
Dreiweibern	0					
Burghammer	0					
Werminghoff I	1	700	170	3	5,6	3,2
Werminghoff II	0					
Scheibe	4	9002.400	210520	012	4,15,5	3,05,0
Spreetal-NO	3	1.5004.800	3201.800	642	3,55,7	2,93,2

Sanierungs-	Anzahl Mess-	Sulfat	gelöstes Eisen	K _{B4.3}	pН	рН _{ох}
tagebau	stellen	mg/L	mg/L	mmol/L		
Spreetal	4	2.8004.800	3201.800	642	4,05,7	2,93,2
Bluno	3	2.0003.000	300700	617	4,35,8	3,03,2
Lugteich/Laubusch	3	1403.600	30780	017	4,05,8	3,03,8
Skado	1	970	200	4	5,7	3,1
Koschen	2	1.3002.300	300600	612	4,34,6	2,93,1
Berzdorf	7	4401.700	0100	-122	6,38,1	6,17,9

Das Kippenwasser des ehem. Tagebaus **Bärwalde** ist deutlich stärker mit Sulfat und gelöstem Eisen angereichert, als das Grundwasser der gewachsenen Grundwasser-leiter (<u>Anlage 1</u>). Das Kippenwasser hat geringen Einfluss auf den Bergbaufolgesee Bärwalde, weil die Kippen überwiegend abstromig liegen. Dagegen wird mittelfristig eine Gefährdung der Trinkwasserfassung Bärwalde durch das Kippenwasser befürchtet [DGFZ 2006].

Die Beschaffenheit des Kippenwassers im ehem. Tagebau **Lohsa** zeigt in den einzelnen Baufeldern erhebliche Unterschiede. Das Kippenwasser des Baufeldes III weist gegenüber dem Baufeld IV eine große Spannweite der Wasserbeschaffenheit auf. Das Kippenwasser im Baufeldes IV ist stärker sauer (<u>Anlage 1</u>). In zwei Messstellen wird keine saure Reaktion des belüfteten Kippenwassers gemessen. Die Ursachen können im Zustrom unbeeinflussten Grundwassers aus der pleistozänen Uhyster Rinne oder in der lokalen Verkippung von Geschiebemergeln liegen. Zur Innenkippe des Baufeldes V liegen keine Daten aus Grundwassermessstellen vor. Durch Untersuchungen in den Teilbecken des Speicherbeckens Lohsa II, die aus der Innenkippe des Baufeldes V angeströmt wurden, zeigte sich bis 2001 eine starke Versauerung mit hohen Basenkapazitäten K_{B4,3} von 15 bis 20 mmol/L und Sulfatkonzentrationen über 3.000 mg/L [BTU 2005].

Für die Innenkippe des ehem. Tagebaus **Dreiweibern** liegen zum Kippenwasser keine Beschaffenheitsdaten vor. Die Innenkippe ist bereits vollständig überstaut. Aus der Entwicklung der initialen Wasserbeschaffenheit im Speicherbecken Dreiweibern bis zum Beginn der Fremdflutung aus der Kleinen Spree lässt sich die Beschaffenheit des Kippenwassers abschätzen. Zu Beginn stellte sich die Wasserbeschaffenheit im Bergbaufolgesee Dreiweibern mit pH \approx 3 und einer Basenkapazität $K_{B4,3}$ von etwa 2 mmol/L als mäßig sauer dar. Die initiale Sulfatkonzentration lag bei 1.400 mg/L [BTU 2005]. Die Wasserbeschaffenheit des initialen Bergbaufolgesees Dreiweibern passt sich in das Muster der regionalen Kippenwasserbeschaffenheit des Lausitzer Reviers ein. Durch Flutung wurde der Bergbaufolgesee neutralisiert.

Die Beschaffenheit des Kippenwassers im ehem. Tagebau **Burghammer** ist bislang nicht durch Messstellen belegt. Die einzige Information zum Kippenwasser stammt aus einer Untersuchung aus dem Jahr 1995 [BTU 2012]. Die Sulfatkonzentration betrug 1.350 mg/L. Gelöstes Eisen war mit 260 mg/L enthalten. Infolge der hohen Eisen(II)-Konzentration war das Kippenwasser bei Belüftung durch ein Versauerungspotential von $K_{B4.3}^{ox} \approx 5$ mmol/L gekennzeichnet. Das hohe Versauerungspotential des Kippenwassers zeigt sich an der Entwicklung der Wasserbeschaffenheit im Bernsteinsee. Vor der Kalkung des Sees im Jahr 2009 wurde ein pH-Wert von 3 und eine Basenkapazität $K_{B4,3}$ von etwa 3 mmol/L gemessen. Durch Kalkung stellten sich neutrale bis schwach alkalische Verhältnisse mit einer schwachen Pufferung ein. Die schnelle Wiederversauerung des Bernsteinsees nach Abschluss der Kalkung belegt den Zustrom potentiell sauren Kippenwassers aus der Innenkippe Burghammer.

Zur Kennzeichnung des Kippenwassers im ehemaligen Tagebau **Werminghoff I (Knappenrode)** liegt nur eine Messstelle vor. Diese kennzeichnet das Kippenwasser als potentiell sauer mit einer moderaten Sulfatkonzentration von 700 mg/L und einer Eisenkonzentration von 170 mg/L. Obwohl dem aus dem Restloch D/F hervorgegangenen Graureihersee Kippenwasser zuströmt, ist der See mit $K_{S4,3} \approx 4$ mmol/L gut gepuffert. Der pH-Wert liegt bei 7,5. Die Pufferung des Seewassers wird auf eine Aschespülkippe zurückgeführt, die südwestlich des Restlochs F liegt. Die bisherige Entwicklung des Graureihersees unterscheidet sich damit von der Mehrzahl der Lausitzer Bergbaufolgeseen, für die zumindest in den frühen Phasen des Grundwassereigenaufgangs ein saures, sulfat- und eisenreiches Wasser typisch ist [BTU 2006b]. Für den Tagebau **Werminghoff II** liegen keine Informationen zur Kippe und zum See vor.

Auf Grund des fortgeschrittenen Grundwasserwiederanstieges im Bergbaufolgesee **Scheibe** kann das Grundwasser nur noch im Umfeld des ehem. Tagebaus Scheibe überwacht werden. Die Innenkippe ist inzwischen vollständig überflutet. In [BTU 2006a] liegen Informationen zum Kippenwasser aus älteren Untersuchungen vor. Demnach ist die Wasserbeschaffenheit in der Kippe räumlich sehr heterogen. Sowohl die Sulfat- als auch Eisenkonzentrationen zeigen eine sehr große Streuung von 160 bis 5.000 mg/L bzw. 10 bis 1.250 mg/L. Da Eisen(II) der wesentliche Aciditätsträger ist, reagiert das Kippenwasser bei Belüftung mit bis $K_{B4.3}^{ox} \approx 27$ mmol/l stark sauer [BTU 2006a]. Das Versauerungspotential des Kippenwassers in der Innenkippe Scheibe zeigt sich auch im Bergbaufolgesee. Die stoffliche Belastung durch das Kippenwasser führt zu niedrigen pH-Werten pH \approx 3 und Basenkapazitäten $K_{B4.3}$ von etwa 3 mmol/L.

Im Kippenwasser der ehemaligen Tagebaue **Spreetal, Bluno und Spreetal-Nordost** ist stark mineralisiert (<u>Bild 49 bis Bild 50</u>). Das Kippenwasser im Bereich des Lausitzer Urstromtales ist durch Sulfatkonzentrationen bis über 4.000 mg/L gekennzeichnet. Die Eisenkonzentration liegt im Bereich mehrerer Hundert mg/L und reicht lokal über 1.000 mg/L. Das führt bei Belüftung zu einer stark sauren Reaktion des Kippenwassers mit rechnerischen $K_{B4.3}^{ox}$ -Werten bis 40 mmol/L [BTU 2003a]. Bei Belüftung stellen sich pH-Werte zwischen 2,8 und 3,5 ein. Das Grundwasser zeigt damit ein sehr hohes Versauerungspotential (Bild 51).

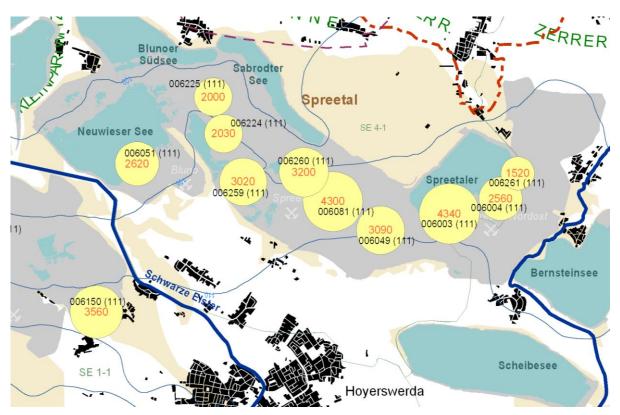


Bild 49: Sulfatkonzentration im Kippenwasser im Raum Spreetal, Werte von 2011, Daten: LMBV

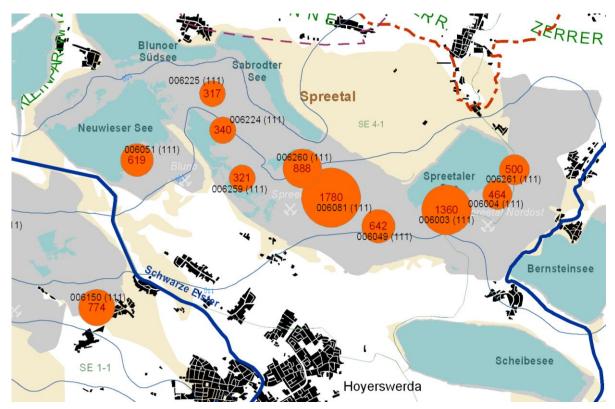


Bild 50: Eisenkonzentration im Kippenwasser im Bereich der ehemaligen Tagebaue Spreetal, Spreetal-Nordost und Laubusch, Werte von 2011, Daten: LMBV

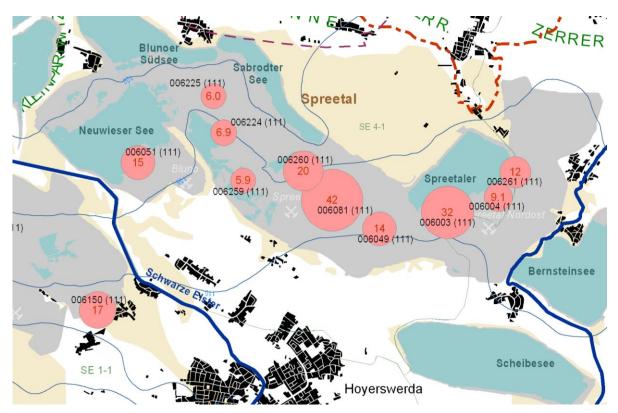


Bild 51: Berechnete Säurekapazität K_{S4,3ox} (blau) und Basenkapazität K^{ox}_{B4.3} (rot) im Kippenwasser im Raum Spreetal, Werte von 2011, Daten: LMBV

Die drei Messstellen im ehem. Tagebau **Laubusch** weisen unterschiedliche Sulfatund Eisen(II)-Konzentrationen im Kippenwasser nach. Das am stärksten zur Versauerung neigende Kippenwasser wird im Südosten der Kippe Laubusch im Bereich des Lugteiches gefunden. Der Lugteich zeigt die höchste Belastung durch Kippenwasser im gesamten Lausitzer Braunkohlerevier.

Das Grundwasser der Kippe **Bluno** weist eine ähnliche Beschaffenheit wie das Kippenwasser in Spreetal auf. Auf Grund der geringeren Eisen(II)-Konzentrationen ist die rechnerische Basenkapazität $K_{B4.3}^{ox}$ geringer im Vergleich zur Kippe Spreetal. Dennoch hat das Kippenwasser ein bedeutendes Versauerungspotential. Im Neuwieser See, der Zustrom aus der Kippe Bluno und aus der Kippe Spreetal erhält, lässt sich eine deutliche bergbauliche Beeinflussung erkennen. Die Sulfatkonzentration ist mit 800 mg/L geringer als im Grundwasser der Kippe Bluno.

Das Kippenwasser des Tagebaus **Skado** im Bereich des Koschendamms ist im originalen Zustand durch hohe Säurekapazitäten von $K_{S4,3}\approx 5$ bis 14 mmol/L gekennzeichnet, was auf Carbonatverwitterung in der Kippe hinweist. Die Eisen(II)-Konzentrationen sind mit 80 bis 200 mg/l niedriger als im Koschendamm. Bei Belüftung reagiert das Kippenwasser schwach sauer bis schwach alkalisch [BTU 2003a]. Der Partwitzer See zeigt jedoch eine deutliche Beeinflussung durch potentiell stark saures Kippenwasser. Er befindet sich derzeit mit pH < 3 und $K_{B4,3}\approx 5$ mmol/L in einem stark sauren Zustand. Die verfügbaren Messstellen sind damit offensichtlich nicht repräsentativ für die hydrochemische Kennzeichnung des Grundwasserherkunftsraumes

Das Kippenwasser im ehem. Tagebau **Koschen** wird aktuell durch keine Messstelle erfasst. In [BTU 2003a] wird das Grundwasser der Innenkippe Koschen als potentiell sauer bis stark sauer gekennzeichnet. Die berechneten Basenkapazitäten bei Belüftung liegen zwischen $K_{B4.3}^{ox} \approx 0,3$ und 12 mmol/L. Der Bergbaufolgesee Koschen (Geierswalder See) wird im Wesentlichen aus den gewachsenen Grundwasserleitern aus der Tätzschwitzer Rinne angeströmt. Ein Grundwasserzutritt aus der Kippe Koschen erfolgt auf Grund des hohen Wasserstandes kaum. Dadurch weist der Geierswalder See schwach gepufferte neutrale Verhältnisse auf.

Das Kippenwasser im ehem. Tagebau **Berzdorf** hat eine deutlich geringere Mineralisation im Vergleich zum Kippenwasser der Tagebaue im Lausitzer Urstromtal. Die Sulfatkonzentration liegt zwischen 500 und 1.700 mg/L (<u>Anlage 2</u>). Sie ist in den carbonathaltigen Kippensedimenten durch die Gipsfällung limitiert. Die Eisenkonzentration erreicht Werte bis maximal 80 mg/L. Das Kippenwasser liegt als gut gepuffertes Wasser vor. Bei Belüftung stellt sich eine Säurekapazität K_{S4,30x} zwischen 2 und 10 mmol/L ein. Der pH-Wert liegt überwiegend im neutralen Bereich. Die Beschaffenheit des Kippenwassers spiegelt sich auch in der günstigen Beschaffenheit des Berzdorfer Sees wider.

6.2 Mitteldeutsches Revier

6.2.1 Tagebau Vereinigtes Schleenhain

Im Tagebau Vereinigtes Schleenhain wurde im Rahmen der Untersuchungen zum Versauerungspotential in den Tagebaukippen ein Grundwassergütemonitoring durchgeführt, siehe [Hoth u. a. 2010]. Der pH-Wert in den Kippen des Tagebaus Vereinigtes Schleenhain ist im Wesentlichen durch schwach saure bis neutrale Werte gekennzeichnet. Zwei Messstellen zeigen auffällig hohe pH-Werte pH > 8 (Anlage 3). Diese befinden sich im Bereich einer industriellen Absetzanlage, in die Asche verspült wurde. Generell sind die pH-Werte im Baufeld Schleenhain etwas niedriger als im Baufeld Peres. Die elektrische Leitfähigkeit des Kippenwassers von Sulfatkonzentrationen 3000 µS/cm wird durch verursacht. weitestgehend zwischen 500 und 3.000 mg/L liegen. Die Eisen(II)-Konzentrationen variieren zwischen < 1 und 1.000 mg/L. Hinsichtlich der Säurepufferkapazität stellen [Hoth u. a. 2010] deutliche Unterschiede zwischen den Abbaufeldern Peres und Schleenhain fest. Der K_{S4,3} des Kippenwassers liegt überwiegend zwischen 8 und 15 mmol/L im Abbaufeld Peres und zwischen 2 und 5 mmol/L im Abbaufeld Schleenhain. Das ist im Wesentlichen auf den höheren Anteil an pufferndem Karbonat im Geschiebemergel und auf die größere Mächtigkeit der guartären Deckschichten im Abbaufeld Peres zurückzuführen.

Die MIBRAG verfügt nur über eine Kippenwassermessstelle im Baufeld Peres. Daraus lässt sich aktuell keine höhere Säurepufferkapazität gegenüber dem Abbaufeld Schleenhain feststellen.

6.2.2 Innenkippen des Sanierungsbergbaus der LMBV

Südraum Leipzig

Für den Südraum von Leipzig lagen vollständige hydrochemische Analysen nur für Kippenwassermessstellen der Sanierungstagebaue Cospuden und Espenhain vor. Für die Tagebaue um Borna standen die Sulfatkonzentrationen im Kippenwasser zur Verfügung (vgl. Anlage 3). Die Sulfatkonzentration des Kippenwassers im Südraum von Leipzig ist mit der Sulfatrkonzentration in den Kippen des Lausitzer Reviers vergleichbar und hat eine Spanne zwischen 300 und 5.000 mg/L (Bild 52). Demgegenüber weist die Eisenkonzentration eine sehr große Spanne zwischen 0,1 und 1.500 mg/L auf (Bild 53). Ein Kippenwasser mit einer Eisenkonzentration über 150 mg/L reagiert bei Belüftung gewöhnlich stark sauer (Bild 54). Die rechnerische Basenkonzentration erreicht dann Werte bis $K_{B4.3}^{ox} \approx 40 \text{ mmol/L.}$ Das Kippenwasser der übrigen Messstellen befindet sich in einem schwach bis gut gepufferten Zustand mit Säurekapazitäten K_{S4,3ox} von 0,3 bis 15 mmol/L. Im Unterschied zu den Kippen des Lausitzer Urstromtals stellt sich das Kippenwasser im Südraum von Leipzig überwiegend als gepuffert dar. Die Ursache hierfür ist der unterschiedliche geologische Aufbau des Deckgebirges. Im Mitteldeutschen Revier liegt mit den karbonatreichen Geschiebemergeln ein natürlicher Puffer vor.



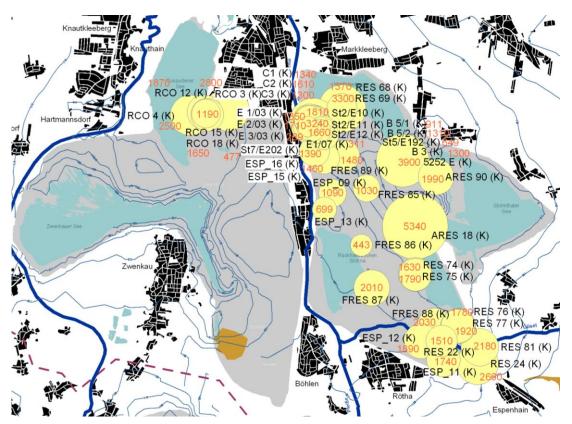


Bild 52: Sulfatkonzentration im Kippenwasser in den Tagebauen Espenhain und Cospuden, Daten: LMBV

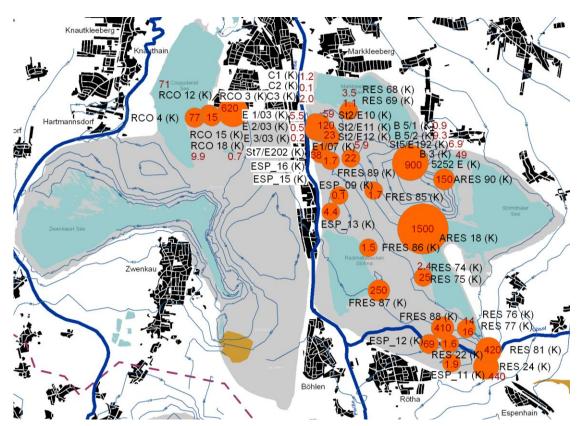


Bild 53: Konzentration von gelöstem Eisen im Kippenwasser in den Tagebauen Espenhain und Cospuden, Daten: LMBV

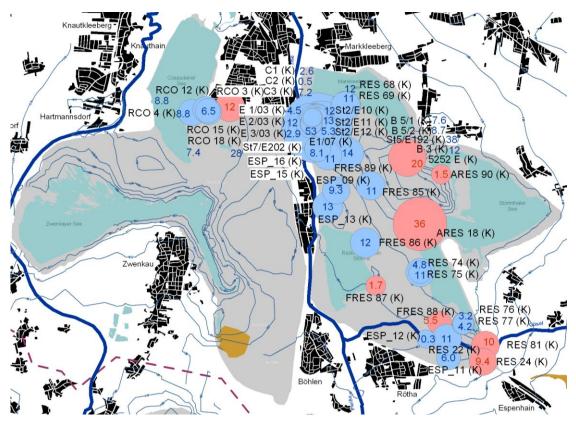


Bild 54: Berechnete Säurekapazität K_{S4,3ox} (blau) und Basenkapazität K^{ox}_{B4.3} (rot) im Kippenwasser der Tagebaue Espenhain und Cospuden, Daten: LMBV

Nordraum Leipzig

Im Nordraum von Leipzig liegt die Sulfatkonzentration des Kippenwassers überwiegend zwischen 900 und 2.000 mg/L (<u>Anlage 4</u>). Im Delitzsch-Breitenfelder Revier finden sich im Kippenwasser auffällig niedrige Eisenkonzentrationen unter 3 mg/L. Im Sanierungsbergbau Holzweißig/Goitsche weist das Grundwasser überwiegend hohe Eisenkonzentrationen über 100 mg/L auf. Analog zu den Bedingungen im Südraum von Leipzig reagiert das Grundwasser mit einer Eisenkonzentration größer 150 mg/L bei Belüftung stark sauer. Die rechnerisch ermittelte Basenkapazität K^{ox}_{B4.3} erreicht hier Werte bis 30 mmol/L. Kippenwasser mit einer Eisenkonzentration kleiner 150 mg/L weisen rechnerische Säurekapazitäten bis etwa 10 mmol/L auf.

Das Kippenwasser im Nordraum von Leipzig zeigt im Vergleich zum Südraum Leipzig generell niedrigere Eisenkonzentrationen. Bei Belüftung zeigt sich das Kippenwasser gut gepuffert. Im Bereich des Tagebaus Holzweißig liegen die Eisenkonzentrationen aktuell zwischen 10 und 150 mg/L. Bei Belüftung führt dies zu höheren rechnerischen $K_{B4.3}^{ox}$ -Werten im Vergleich zum Delitzsch-Breitenfelder Raum. Das Kippenwasser verbleibt bei Belüftung dennoch in einem gepufferten Zustand.

6.3 Vergleich der Tagebaue und Reviere

Nachfolgend werden die Bandbreiten der hydrochemischen Befunde zum Kippenwasser im Vergleich der sächsischen Braunkohlentagebaue (linke Spalte), der Lausitzer Sanierungstagebaue, gegliedert nach Sanierungsbereichen (mittlere Spalte), und der mitteldeutschen Sanierungstagebaue für den Leipziger Nord- und Südraum (rechte Spalte) im direkten Vergleich dargestellt (Bild 55 bis Bild 57). Die Darstellungen erfolgen für die Sulfatkonzentration, die Eisenkonzentration, den originalen pH-Wert, die Aluminiumkonzentration, den pH-Wert nach Belüftung (pH_{ox}) sowie die Acidität nach Belüftung als K^{ox}_{B4.3}.

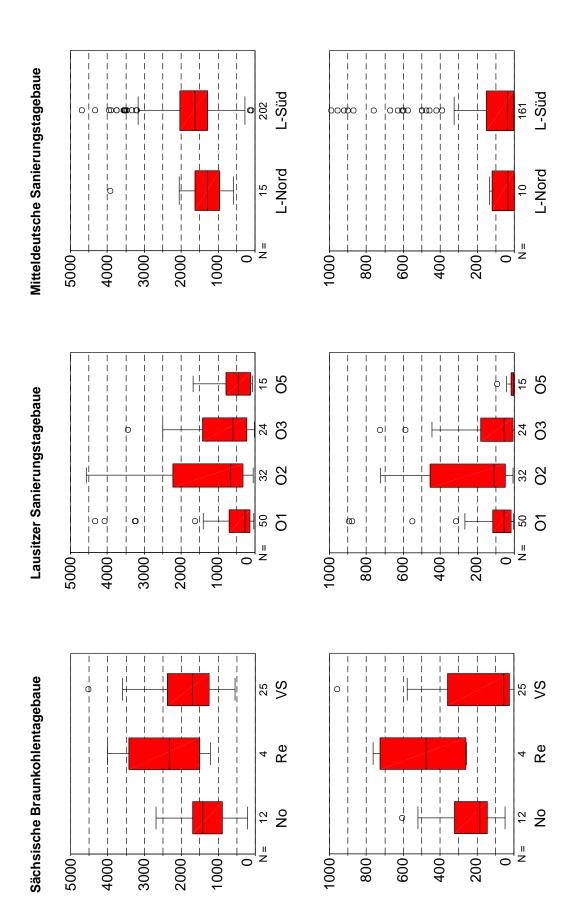
Im Vergleich mit den Sanierungstagebauen der Lausitz ist das Versauerungspotential im mitteldeutschen Revier geringer, insbesondere durch die niedrigeren Eisenkonzentrationen im Kippenwasser. Die Sulfatkonzentration des Kippenwassers ist in beiden Braunkohlerevieren etwa vergleichbar hoch und weist im Wesentlichen eine große Spannweite zwischen wenigen 100 mg/L und etwa 5.000 mg/L auf.

Eine große Spannweite weist auch die Eisenkonzentration im Kippenwasser auf. In den aktiven Tagebauen liegt die Eisenkonzentration im Wesentlichen unter 500 mg/L. Im Tagebau Vereinigtes Schleenhain sind die Eisenkonzentrationen des Kippenwassers etwas geringer als in den Lausitzer Tagebauen. Die höchsten Eisenkonzentrationen werden in den Kippen der Lausitzer Sanierungstagebaue gemessen. Die geringste Eisenbelastung weist das Kippenwasser des Berzdorfer Reviers auf. Die Konzentration von gelöstem Eisen liegt hier unter 50 mg/L.

Das Kippenwasser weist unter anoxischen Bedingungen überwiegend schwach saure bis neutrale pH-Verhältnisse auf. Sowohl im aktiven als auch in den Sanierungstagebauen des mitteldeutschen Reviers ist der pH-Wert um eine pH-Einheit höher als im Lausitzer Revier.

Auf Grund verbreiteter Geschiebemergel im Deckgebirge stellt sich das Kippenwasser im mitteldeutschen Revier und im Berzdorfer Revier überwiegend als gut gepuffert dar. Das Kippenwasser in den Sanierungstagebauen des mitteldeutschen Reviers weist bei Belüftung überwiegend pH_{ox}-Werte zwischen 5 und 7 auf.

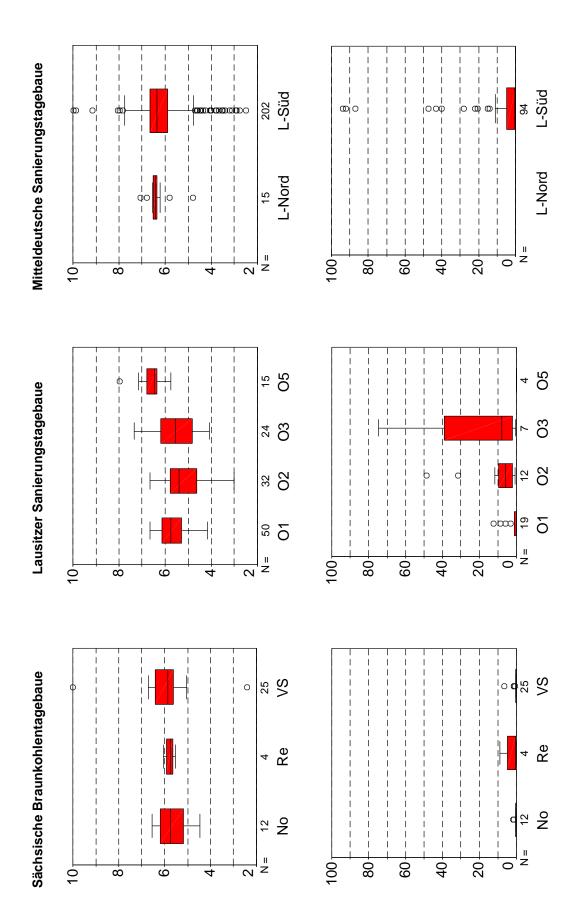
In den Lausitzer Sanierungstagebauen der Monitoringbereiche O1 bis O3 tritt neben Eisen auch Aluminium als Aciditätsträger auf. Die Aluminiumkonzentration erreicht Werte bis etwa 100 mg/L. Im Kippenwasser der aktiven Tagebaue und in den mitteldeutschen Sanierungstagebauen spielt Aluminium keine Rolle.



(No: Nochten, Re: Reichwalde, VS: Vereinigtes Schleenhain), b) sächsischen Sanierungstagebauen des Lausitzer Reviers und c) sächsischen Sanierungstagebauen des Mitteldeutschen Reviers (L-Nord: Nordraum Leipzig, L-Süd: Südraum Leipzig) Konzentrationsbereiche von Sulfat und Eisen im Kippenwasser in den a) aktiven sächsischen Tagebauen

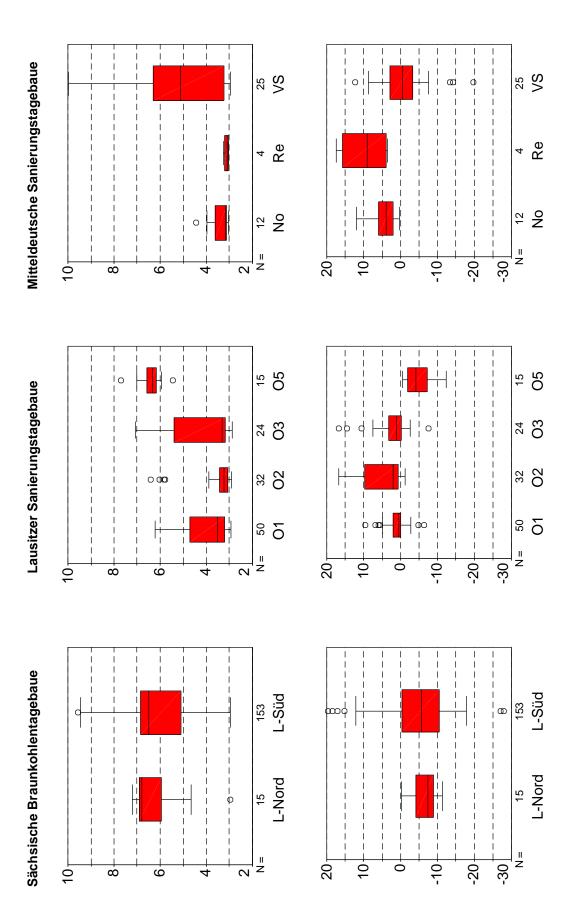
Bild 55:





Vereinigtes Schleenhain), b) sächsischen Sanierungstagebauen des Lausitzer Reviers und c) sächsischen Sanierungstagebauen des Mitteldeutschen Reviers (L-Nord: Nordraum Leipzig, L-Süd: Südraum Leipzig) pH-Wert und Aluminium im Kippenwasser in den a) aktiven sächsischen Tagebauen (No: Nochten, Re: Reichwalde, VS:

Bild 56:



pH-Wert und Basenkapazität K_{B4,3} der Kippengrundwässer für oxische Bedingungen in den a) aktiven sächsischen Tagebauen (No: Nochten, Re: Reichwalde, VS: Vereinigtes Schleenhain), b) sächsischen Sanierungstagebauen des Lausitzer Reviers und c) sächsischen Sanierungstagebauen des Mitteldeutschen Reviers (L-Nord: Nordraum Leipzig, L-Süd: Südraum Leipzig)

Bild 57:



7 Maßnahmen im Braunkohlenbergbau

7.1 Bewertungskriterien und Maßstäbe

der Braunkohle - Abschlussbericht

Die im Folgenden vorgeschlagenen Maßnahmen zur Verhinderung/Minderung der Pyritverwitterung und der Kippenversauerung werden vergleichend bewertet. Die Bewertung erfolgt auf der Grundlage des Kriterienkatalogs in der <u>Tabelle 28</u>.

Tabelle 28: Zusammenstellung der Bewertungskriterien

Kriterium	Erläuterung
Technologisches Prinzip	Grundlegendes physikalisches, chemisches oder biologisches Prinzip der Maßnahme zur Beeinflussung räumlicher, zeitlicher und/oder stofflicher Faktoren der Pyritverwitterung und/oder der Kippenversauerung.
Varianten der Umsetzung	Varianten zur Umsetzung des technologischen Prinzips in bautechnischen Begriffen.
erforderliche technische Bauwerke	Ergibt sich aus der Variante der technologischen Umsetzung. Benennung der wesentlichen Elemente.
erforderliche Einsatzstoffe	Erdstoffe, Chemikalien, Wasser, Energie
Einsatzgrenzen: natürliche technologische	Die natürlichen Einsatzgrenzen ergeben sich aus geologischen, bodenmechanischen, hydraulischen chemischen und sonstigen naturwissenschaftlichen Gründen. Die technologischen Einsatzgrenzen werden im Wesentlichen nach dem Stand der Technik bewertet.
Wirkungen und Wirkungsgrad: primäre Pyritverwitterung sekundäre Pyritverwitterung Kippenversauerung	Bewertung des Grades der Minderung der Verwitterung bzw. des Grades der Kompensation der Versauerung
Raumwirkung der Maßnahme	in Bezug auf die Oberfläche und in Relation zu den räumlichen Dimensionen eines Tagebaus
erforderliche Maßnahmendauer	Notwendige Dauer der Maßnahme im Verhältnis zur Laufzeit des Tagebaus.
Wirkungsdauer	Zeitdauer der Wirkung der Maßnahme im Verhältnis zur erforderlichen Maßnahmendauer.
Synergien	Vorteilhafte Nebenwirkungen und sinnvolle Kombinationen mit anderen Maßnahmen.
Möglicher Einsatzbereich im Tagebau	Vorfeld, Baggerböschungen und -bermen, Kippen- böschungen und -bermen, Kippenoberfläche, Bandanlagen, andere technische Anlagen
Entwicklungsstand	Graduierung nach: SdT BBStand der Technik im Braunkohlenbergbau SdTStand der Technik, allgemein GTGroßtechnisches Versuchsstadium KTKleintechnisches Versuchsstadium EEntwurfsstadium

Kriterium	Erläuterung
Forschungs- und Entwicklungsbedarf	Wird aus dem aktuellen Entwicklungsstand der Maßnahme hergeleitet.
Eingriff in die Tagebautechnologie	Autarkie der Maßnahme oder Grad der Einfluß- nahme der Maßnahme auf die praktizierte Tage- bautechnologie sowie Bewertung des logistischen Aufwandes in verbaler Abstufung.
Kosten: Investitionen Betrieb	Die Investitionskosten berücksichtigen die dauerhaft zusätzlich erforderlichen Techniken und Technologien zur Durchführung der Maßnahmen. Die Betriebskosten berücksichtigten Einsatzstoffe, Energie, Wasser, Arbeitskräfte Wiederkehrende Maßnahmen, wie z. B. eine Bodenabdeckung, werden auch als Betriebskosten berücksichtigt.
Technische Umsetzbarkeit	Integrale verbale Einschätzung zur Machbarkeit der Maßnahme nach technologischem, finanziellem und organisatorischem Aufwand.
Entsorgung / Abprodukte	Synergien durch Nutzung von Reststoffen aus anderen Branchen. Entstehung von Abprodukten und Bewertung ihrer Schädlichkeit bei Durchführung der Maßnahmen.
Genehmigungsfähigkeit	Bewertung der Erreichbarkeit einer Genehmigung für die Maßnahme vornehmlich aus berg- und wasserrechtlicher Sicht auf der Grundlage vorliegender Erfahrungen.

Die Bewertung der Maßnahmen und Verfahren erfolgt nach Möglichkeit quantitativ. Der Anspruch an die Allgemeingültigkeit der Aussagen - einerseits - und im Kontext zur Individualität der Braunkohlentagebaue - andererseits - gestattet das aber nur für wenige Kriterien. Deshalb werden überwiegend semiquantitative Bewertungsskalen eingeführt. Dabei werden fünfgliedrige Bewertungsskalen bevorzugt. Die Bewertungsskalen der einzelnen Kriterien werden in der Anlage 5 näher erläutert.

Aus naturwissenschaftlicher Sicht ist sehr wesentlich, ob die Maßnahmen auf die Verhinderung der primären oder sekundären Pyritverwitterung oder auf die Verhinderung beider oder auf die Minderung der Folgen der Pyritverwitterung: die Versauerung zielen. Die Bewertung erfolgt unter dem Kriterium "Wirkungen und Wirkungsgrad".

Die Einführung monetärer Bewertungsskalen für die Investitionskosten und Betriebskosten ist besonders streitbar (Anlage 5). Zu den meisten Maßnahmen liegen weder Kostenschätzungen aus Planungen noch Kostenerhebungen von Bergbauunternehmen vor. Um dennoch Größenordnungen der Kosten annähernd zu veranschaulichen, wurde lediglich eine dreigliedrige Skalierung der Kosten in einem "logarithmischen" Maßstab gewählt, die sich mehr an allgemeinen Befindlichkeitsschwellen orientiert.



der Braunkohle - Abschlussbericht

7.2.1 Maßnahmen der Quellenbehandlung (Kategorie A im aktiven Bergbau)

7.2.1.1 Übersicht

Die tagebaubegleitenden Maßnahmen zur Quellenbehandlung im aktiven Braunkohlenbergbau (Kategorie A) können nach bergbautechnologischen, bodenmechanischen, kulturtechnischen, hydraulischen sowie chemischen und biologischen Wirkprinzipien unterschieden werden (<u>Tabelle 29</u>). In der nachfolgenden Tabelle werden mögliche Maßnahmen im Rahmen des aktiven Braunkohlenbergbaus zur Verhinderung bzw. Verringerung der Pyritverwitterung und der Kippenversauerung entsprechend zugeordnet.

Tabelle 29: Tagebaubegleitende Maßnahmen zur Verminderung bzw. Verringerung der Pyritverwitterung und Kippenversauerung im Quellbereich (Kategorie A)

2 / Add / Ad			
Ort Wirkprinzip	A1 Vorfeld	A2 Tagebau	A3 Innenkippe und Außenhalde
1) bergbau- technologisch		Selektive Abraumgewinnung	in Verbindung mit: Selektiver Verkippung
		gewinnungsseitige	kippenseitige
		Verringerung der Expositionsoberflächen	
		gewinnungsseitige	kippenseitige
		Verringerung der E	Expositionszeiten
2) boden- mechanisch			Oberflächen- verdichtung
3) kultur- technisch		temporäre Bodenabdeckung mit Zwischenbegrünung	abschließende Bodenabdeckung mit Bepflanzung
4) hydraulisch	Schutzgasinjektion		Beregnung/Einstau Schutzgasinjektion
5) chemisch und/oder biologisch			Einbau alkalischer Stoffe (Neutralisations- mittel)
			Einbau respiratorisch wirkender Stoffe (Zehrstoffe)
			Einbau chemisch inertisierender Stoffe
	Eintrag von Bakteriziden (z. B. Tenside)		

Die Wahl der Darstellung von Maßnahmen und Bewertungen in der Tabellenform verfolgt das Ziel, eine höchstmögliche Übersichtlichkeit und weitgehende Vollständigkeit herzustellen.

In die <u>Tabelle 29</u> wurden überwiegend Maßnahmen aufgenommen, die dem Stand der Technik entsprechen. Außerdem wurden Maßnahmen auf dem Niveau der Forschung und Entwicklung berücksichtigt, die aus der Sicht der Autoren über das Potential für eine Überführung in den Stand der Technik verfügen und damit als Varianten für die zu installierenden Versuche im Teil 2 des Projektes von Interesse sind.

Die einzelnen Maßnahmen der Quellenbehandlung gemäß der <u>Tabelle 29</u> zielen unterschiedlich auf die Pyritverwitterung bzw. auf die Kippenversauerung (<u>Bild 58</u>).

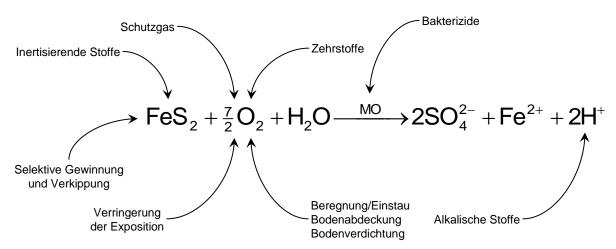


Bild 58: Zielorientierung der tagebaubegleitenden Maßnahmen zur Verminderung bzw. Verringerung der Pyritverwitterung und der Kippenversauerung (Kategorie A)

7.2.1.2 Verfahrensprinzipien

Die selektive Gewinnung und Verkippung von Abraum kann nach zwei unterschiedlichen Strategien erfolgen. Eine Strategie verfolgt die Separation von pyritreichen Sedimenten und die andere Strategie die Separation von pyritarmen bzw. pyritfreien Sedimenten. Die erste Strategie empfiehlt sich insbesondere dann, wenn im geologischen Profil des Deckgebirges wenige geringmächtige Schichten mit hohen Pyritgehalten verbreitet sind. Die zweite Strategie empfiehlt sich besonders dann, wenn im geologischen Profil des Deckgebirges nur wenige geringmächtige Schichten ohne Pyrit enthalten sind und ansonsten der Pyrit mehr oder weniger gleichmäßig auf die geologischen Schichten verteilt ist. Beide Strategien können auch miteinander kombiniert werden. Die Maßnahme kann nur dann sinnvoll eingesetzt werden, wenn auch eine relevante stoffliche Selektivität erreichbar ist.

Die Wahl der Methode und ihre Wirkungen sind von den geologischen und geochemischen Faktoren sowie von der Förder- und Verkipptechnologie abhängig (<u>Tabelle 30</u>). Die pyritreichen Sedimente werden im Rahmen der technologischen Möglichkeiten des Tagebaus bevorzugt in die unteren Kippscheiben und die pyritarmen/pyritfreien bzw. karbonathaltigen in die oberen Kippscheiben verbracht. Die Maßnahme zielt vor allem auf die Eindämmung der sekundären Pyritverwitterung. Mit der "Ausdünnung" der Pyritgehalte in den oberflächennahen Schichten steht weniger Material für die Pyritoxidation zur Verfügung.

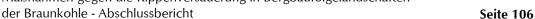


Tabelle 30: Abhängigkeit der Selektivität der Abraumgewinnung und -verkippung von anderen Faktoren

Faktor	Selektivität der Abraumgewinnung und -verkippung		
	niedrig	hoch	
Geologie des Deckgebirges	geochemisch gering differenzierte Stratigraphien	geochemisch stark differenzierte Stratigraphien	
Geochemie des Deckgebirges	heterogene Verteilung des Pyrits (z. B. in Knollenlagen)	homogene Verteilung des Pyrits in den Schichten	
Tagebautechnologie	Eimerkettenbagger	Schaufelradbagger	
Verkipptechnologie	Förderbrücke	Absetzer	

Die selektive Gewinnung und Verkippung lässt sich entsprechend der konkreten geologischen und geochemischen Bedingungen auch auf karbonatreiche Sedimente anwenden.

Die Verringerung der technologisch bedingten Expositionsflächen und -zeiten dient dazu, einerseits den Flächenanteil der versauerungsempfindlichen Sedimente im offenen Tagebau und andererseits die Zeit des Luftkontaktes (der so genannten Exposition) zu verringern. Abbauseitig können dazu Arbeitsebenen und Bermen gezielt in pyritfreie bzw. pyritarme Schichten gelegt werden. Dieser Maßnahme sind in der Regel jedoch enge technologische Grenzen gesetzt. Insbesondere bei der Förderbrückentechnologie lassen sich die Bermen und Arbeitsebenen nicht beliebig verlegen. Die Verringerung der technologisch bedingten Expositionsflächen und Expositionszeiten ist für Tagebaue und für Tagebaubereiche mit autarkem Schaufelradbaggerbetrieb besser geeignet, weil hier die Schnittführung flexibler geplant werden kann. In Anbetracht der vergleichsweise kurzen Expositionszeiten der Arbeitsebenen und Bermen auf der gewachsenen Seite sind durch diese Maßnahme jedoch keine großen Effekte zu erwarten.

Eine substantielle Verringerung der kippenseitigen Expositionsoberflächen kann zum Beispiel durch ein zeitnahes Verfüllen von Randschläuchen erreicht werden.

Kippenseitig besteht die Möglichkeit, die aus pyritreichem Material bestehende Hauptkippe mit einer Absetzerkippe aus pyritfreiem Material bzw. aus pyritarmem Material zeitnah zu überdecken. Insbesondere in Tagebauen mit Förderbrückentechnologie, in denen die Expositionszeiten der Hauptkippenoberfläche meist sehr lang sind, verspricht diese Maßnahme eine gute Wirkung.

Durch **Abdeckung** mit undurchlässigem oder mit pyritfreiem Material soll der Zutritt von Sauerstoff in den Untergrund gemindert werden. Als Materialien kommen im Wesentlichen Vorschnittmaterial aus den pyritfreien Deckgebirgsschichten des Tagebaus, mineralischer Boden, Kunststofffolien oder auch Montanwachs in Frage. Um eine deutliche Verringerung der Pyritverwitterung zu erreichen, müssen möglichst viele offen liegende Tagebau- und Kippenflächen abgedeckt werden bzw. bevorzugt die Flächen mit besonders langen Expositionszeiten.

Durch eine **Oberflächenverdichtung** kann die Lagerungsdichte des Bodens erhöht und damit das luftgefüllte Porenvolumen verringert werden. Damit lassen sich sowohl der Zutritt von Sauerstoff als auch Wasser verringern. Voraussetzung für diese Maßnahme ist das Vorliegen verdichtungsfähiger Substrate. Für die Dimensionen des Bergbaus kommen nur Verfahren in Frage, mit denen hohe Flächenleistungen erreicht werden können, wie z. B. der Einsatz von Walzen.

Durch das **Bepflanzen** der Oberflächen wird die Verdunstung erhöht und damit die Durchsickerung des Untergrundes verringert. Der Sauerstoffzutritt wird durch die Bepflanzung nicht verringert, sondern durch die Vergrößerung des Luftporenanteils eher verstärkt. Erst über einen längeren Zeitraum, wenn im Boden genügend organisches Material angereichert ist, das der Respiration unterliegt, etabliert sich ein substantieller Zehrprozess in Konkurrenz zur Pyritverwitterung. Im Tagebaubereich kann auf Expositionsoberflächen, die über einen langen Zeitraum vorhanden sind, eine Zwischenbegrünung erfolgen. Vorteile sind die Minderung der Erosion und Verringerung der Staubbelastung.

Die Beregnung bzw. der Einstau von Oberflächen verfolgt das Ziel, den luftgefüllten Porenanteil zumindest oberflächennah zu verringern und damit den diffusiven Sauerstofftransport in die Kippe zu hemmen. Das höhere Wasserangebot ist für die Pyritverwitterung unschädlich, weil das Wasser im Boden nicht den limitierenden Faktor für die Pyritverwitterung darstellt.

Einen interessanten Forschungsansatz liefert die Anwendung von **Kohlendioxid als Schutzgas**. Das Kohlendioxid kann sowohl im Vorfeld als auch in der Kippe in den Untergrund infiltriert werden. Die höhere Dichte des Kohlendioxides im Vergleich zur Atmosphärenluft ist dem Prozess sehr förderlich. Das Kohlendioxid dient in der vorgesehenen Anwendung ausschließlich dazu, den Sauerstoff im ungesättigten Porenraum zu verdrängen. Chemische Reaktionen spielen keine Rolle. Aufgrund des vergleichsweise geringen Bedarfs hat diese Anwendung auch als Verfahren zur CO₂-Sequestration keine Bedeutung.

Der Pyritverwitterung und der Kippenversauerung kann auch durch eine Reihe chemischer oder biologischer Maßnahmen begegnet werden. Der Eintrag chemischer und biologischer Stoffe kann dabei oberflächennah oder räumlich erfolgen. Der Eintrag alkalischer Substrate in die Kippe, wie Kalkstein, Kraftwerksasche, alkalische Eisenhydroxidschlämme und vergleichbare zielt vor allem auf die Erhöhung des Pufferpotentials der Kippensedimente. Das Verfahren verhindert nicht die Pyritverwitterung, sondern zielt darauf, die Kippenversauerung vollständig oder zumindest teilweise chemisch zu kompensieren.

Der Einbau respiratorisch wirkender Substrate (Zehrstoffe) verfolgt das Ziel, eine Konkurrenzreaktion zur Pyritverwitterung zu etablieren und dadurch den diffusiven Sauerstoffeintrag in die Kippe zu verringern. Anforderungen an die organischen Substrate sind einerseits eine leichte Abbaubarkeit, damit die notwendigen Umsatzraten erreicht werden, und andererseits ein ausreichend großer Stoffvorrat, damit der Prozess entsprechend lange anhält. Hierfür kommen insbesondere Klärschlämme aus der Wasserbehandlung, organische Reststoffe aus der Landwirtschaft oder aus der Biogasgewinnung, Faulschlämme aus der Gewässersanierung und vergleichbare in Betracht. Bei ausreichender Sauerstoffzehrung durch respiratorisch wirkende

Substrate kann sich auch die heterotrophe Sulfatreduktion etablieren, die zu einer Umkehrung der Pyritverwitterung führen würde.

Der **Einsatz bakterizider Stoffe** zielt darauf ab, das Wachstum und die Vermehrung speziell von eisen- und sulfatoxidierenden Bakterien und damit den biotischen Anteil der Pyritoxidation zu hemmen. Der Eintrag bakterizider Stoffe ist sowohl im Vorfeld, im Tagebau als auch auf der Kippe denkbar.

Das Einbringen inertisierender Stoffe zielt auf eine chemische Einkapselung der Pyritminerale. Hierzu sind nach [Evangelou 1995] besonders Phosphate geeignet. Die Zugabe kann in Form von flüssigen Phosphatdüngern oder als granulares Gesteinsphosphat erfolgen. [Kalin & Wheeler 2011] gehen davon aus, dass die Verringerung der Pyritoxidation durch Phosphate nicht allein chemisch sondern auch biologisch bedingt ist. Die chemische Wirkung beruht auf der Bindung von gelöstem Eisen in Form von Eisenphosphat. Der Prozess ist vergleichbar mit der technischen Phosphatierung von Eisenwerkstoffen. Die sich auf den Pyritaggregaten bildenden Eisenphosphatüberzüge verhindern die weitere Oxidation des Pyrits. [Kalin & Wheeler 2011] nehmen an, dass Gesteinsphosphat zusätzlich als Dünger für heterotrophe Organismen dient, wodurch die chemolithotrophen Bakterien unterdrückt werden. Die biologische Pyritoxidation wird damit gehemmt.

7.2.1.3 Entwicklungsstand und Beispiele

Die selektive Gewinnung und Verkippung ist Stand der Technik im Braunkohlenbergbau. Sie zielt bislang vornehmlich auf die Separation kulturfähiger Substrate für die Abschlussschüttungen sowie auf bodenmechanische Aspekte in der Tagebautechnologie. Im Förderbrückenbetrieb muss die Vorkippe aus rolligem Material geschüttet werden, um die Entwässerbarkeit und Standsicherheit zu gewährleisten. Für die Absetzerschüttung werden gezielt pleistozäne und pyritarme tertiäre Massen aus dem Vorschnitt verwendet. Diese Maßnahmen führen zu einer geochemischen Differenzierung der Kippen. Im Absetzerbetrieb in den Rheinischen Braunkohlentagebauen werden spezielle Strukturen geschüttet, um rutschungsgefährdete Massen in der Kippe sicher einzubauen. Die genannten Technologien werden bereits seit langem durchgeführt.

Neben den genannten Aspekten spielte eine gezielte geochemische Differenzierung der Kippensubstrate bis Anfang der 1990er Jahre keine Rolle. Erst im Ergebnis der detaillierten geochemischen Untersuchungen in den Rheinischen Braunkohlentagebauen [Obermann u. a. 1993] fand die selektive Gewinnung an der Baggerseite und die selektive Verkippung pyrithaltiger Massen Eingang in die Tagebaupraxis. Diese Maßnahme lässt sich im Absetzerbetrieb in bestimmten technologischen Grenzen umsetzen. Dem Förderbrückenbetrieb sind hier deutlich engere technologische Grenzen gesetzt. Hier kann eine Materialselektion abbauseitig nur zwischen den verschiedenen Vorschnitten und den Brückenschnitten sowie kippenseitig zwischen der Vorkippe, der Hauptkippe und den verschiedenen Absetzerschüttungen erfolgen.

Eine selektive Verkippung muss nicht zwangsläufig zu günstigeren geochemischen Zuständen führen. Die Untersuchungen zum Tagebau Jänschwalde in [BTU 1998] und [TUBAF 1998] zeigen, dass eine selektive Verkippung der pyritreichen Substrate in die unteren Kippscheiben unter den konkreten Bedingungen eher zu Nachteilen führt, weil dadurch erst eine Versauerung eintritt, die in der Mischkippe aufgrund des günstigen Karbonatanteils ansonsten nicht droht.

Maßnahmen zur abbau- und kippenseitigen **Abdichtung und Abdeckung** von pyritreichem Material wurden von [Rheinbraun 1991] bereits Ende der 1980er bzw. Anfang der 1990er Jahre hinsichtlich der verfahrenstechnischen Umsetzung und Realisierbarkeit untersucht. Für den Tagebau Garzweiler kam [Rheinbraun 1991] zu dem Schluss, dass abbauseitig jährlich etwa 1.000 ha und kippenseitig weitere 1.800 ha Fläche versiegelt werden müssten. Demgegenüber stehen etwa 50 ha Versiegelungsleistung (z. B. Verlegung von Kunststofffolien, Einbau von Tondichtungen) pro Jahr. Die Versiegelung der Gesamtfläche des pyritreichen Materials ist daher technisch nicht umsetzbar. Eine adäquate Verdichtung des Bodens erwies sich nach den Untersuchungen in [Rheinbraun 1991] im Tagebau Garzweiler ebenfalls als nicht durchführbar, da die pyritreichen Sedimente im Wesentlichen aus gleichförmigen, nicht verdichtungsfähigen Sanden bestehen. Eine vergleichbare Konstellation ist auch in den Lausitzer Tagebauen gegeben.

[Obermann & Kringel 1995] haben Laboruntersuchungen zu bodenmechanischen Maßnahmen (z. B. mechanische Verdichtung, Einbringung verdichtender Zuschlagstoffe, Befeuchtung) mit pyritreichen Sanden aus dem Tagebau Garzweiler durchgeführt. Aus bodenmechanischer Sicht erwies sich eine zusätzliche **Befeuchtung** des Planums zur Verringerung des Sauerstoffeintrages als nahezu unwirksam. Die Maßnahme ist im Braunkohlenbergbau ungeeignet. Zum einen können die Mengen Wasser für die ausgedehnten Kippen nicht zur Verfügung gestellt werden. Andererseits würde die großflächige Beregnung von Kippen zu bodenmechanischen und entwässerungstechnischen Problemen führen.

Gemäß dem Braunkohlenplan von 1995 wird im Tagebau Garzweiler II im Rahmen der so genannten A6-Maßnahme seit 2001 **Kalk in Teilbereiche der Kippe** eingebaut [Kwasny 2011]. Der Abraum wird auf der Bandanlage mit Kalksteinmehl beaufschlagt. Die Kalkdosierung erfolgt in Abhängigkeit vom Pyrit- und Karbonatgehalt des Abraummaterials. Jährlich werden etwa 150.000 bis 200.000 t Kalk dem Abraum zudosiert. Bei einem Abraumvolumen von etwa 140 Mio. m³ pro Jahr entspricht dies einem Kalk-Abraum-Verhältnis von etwa 1,0 bis 1,5 kg/m³.

Die technische Umsetzbarkeit der Maßnahme im Tagebaubetrieb mit Förderbrückentechnologie wurde bislang noch nicht geprüft.

Im Mitteldeutschen Revier fallen beim Betrieb der Grubenwasserreinigungsanlage Neukieritzsch jährlich etwa 0,3 Mio. m³ Eisenhydroxidrückstände an. Diese Rückstände enthalten etwa 7 Masse-% Feststoff. Durch Einsatz eines Eindickers im Aufbereitungsprozess werden damit höhere Feststoffgehalte gegenüber herkömmlichen Grubenwasserreinigungsanlagen erzielt. Auf Grund des Säureneutralisationspotentials von rund 3 mmol/L werden die Eisenhydroxidrückstände in die Absetzerkippen des Tagebaus Vereinigtes Schleenhain (MIBRAG) eingebaut (Kapitel 8.2.2). Die Einbringung der Rückstände in die Kippe erfolgt über eine mobile Spülleitung in die untere Absetzerkippe zur Neutralisation des Materials des versauerungsempfindlichen Grundwasserleiters 3.

Der Einbau respiratorisch wirkender Substrate in Kippen mit ausschließlich geochemischer Zielstellung wurde bislang noch nicht praktiziert. Die Erstbegrünung von Kippenoberflächen erfolgt aus kulturtechnischen Gründen häufig mit Leguminosen. Nach der Wachstumsperiode werden die Leguminosen umgebrochen, um den Oberboden mit Humus anzureichen. Vom Prinzip her entspricht diese Form der Kultivierung der o. g. Maßnahme. Der organische Stoffgehalt und die Abbauraten einer Erstbegrünung sind jedoch zu gering, um den Sauerstoffhaushalt des ungesättigten Bodens maßgeblich zu beeinflussen.

Zur gezielten **Sulfatreduktion** gibt es Erfahrungen aus Pilotprojekten im Bereich des Sanierungsbergbaus der LMBV (vgl. hierzu Abschnitt 7.3).

In Säulenversuchen konnte durch den **Einsatz von Bakteriziden** (Tensiden) das Wachstum von eisen- und schwefeloxidierenden Bakterien zeitweilig deutlich gehemmt werden. Im großtechnischen Maßstab wurde diese Maßnahme bisher aber noch nicht getestet.

7.2.1.4 Eignung

Die Einzelbewertung der Maßnahmen erfolgt nach den in <u>Abschnitt 0</u> zusammengestellten Bewertungskriterien. Zur besseren Übersicht werden die Maßnahmenkomplexe auf der Grundlage des Wirkprinzips miteinander verglichen. In der <u>Anlage 6.1</u> erfolgt ein Vergleich der Maßnahmen in Gruppen nach:

- bergbautechnologischen
- bodenmechanischen, kulturtechnischen und hydraulischen sowie
- chemischen und biologischen Maßnahmen.

Die Wirkung der bergbautechnologischen Maßnahmen ist allgemein gering. Die selektive Gewinnung und Verkippung besitzt das höchste Potential, die sekundäre Verwitterung zu minimieren. Im mitteldeutschen Revier wird dies bereits praktiziert. Für die Tagebautechnologie des Lausitzer Reviers (Eimerkettenbagger mit AFB-Verkippung) ist die Selektivität zu niedrig, um eine ausreichende Wirkung auf die Verringerung der sekundären Pyritverwitterung zu erreichen, vgl. [BTU 1998].

Die hydraulischen, bodenmechanischen und kulturtechnischen Maßnahmen sind als Einzelmaßnahmen zur Verhinderung bzw. Minderung der Pyritverwitterung und der Kippenversauerung für die Dimensionen des Braunkohlenbergbaus überwiegend nicht geeignet (Anlage 6.1). Sie sind nur im Zusammenhang mit anderen Zielstellungen, wie z. B. die Verhinderung von Staubemissionen, auch von Interesse für eine geochemische Anwendung. Darüber hinaus sind lokale Anwendungen im Tagebau denkbar. Den höchsten Gewinn verspricht eine zeitnahe Abdeckung der in der Regel pyritreichen Hauptkippen des Förderbrückenbetriebes mit Absetzerkippen.

Von den chemischen und biologischen Verfahren entspricht bislang ausschließlich die Zugabe alkalischer Stoffe dem Stand der Technik im Braunkohlenbergbau (Anlage 6.1). Diese Maßnahme wird bislang nur in Tagebauen mit Absetzerbetrieb angewendet, wo der Kalk ohne Eingriffe in die Bergbautechnologie auf Bandanlagen dosiert werden kann. Die anderen Maßnahmen bzw. Verfahren haben überwiegend einen niedrigen Entwicklungstand und einen entsprechend hohen Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Limitierend dürfte hier vor allem die Rohstoffverfügbarkeit sein.

Die recherchierten sowie vorgeschlagenen Verfahren und Maßnahmen werden vergleichend in der <u>Anlage 6.2</u> hinsichtlich der Wirkungsfaktoren sowie der technologischen und wirtschaftlichen Faktoren bewertet. Der besseren Lesbarkeit halber wurden den Farben zusätzlich "Noten" zugeordnet. Zur Verringerung der primären Pyritverwitterung kommen überwiegend bergbautechnologische Maßnahmen in Frage. Diese entsprechen bereits dem Stand der Technik im Braunkohlenbergbau. Die Investitionskosten sind für die bergbautechnologischen Maßnahmen gering und im Rahmen der üblichen Bergbautätigkeit sind keine gesonderten Genehmigungen erforderlich.

Das höchste Potential, die sekundäre Pyritverwitterung zu minimieren, wird für den Einbau von respiratorisch wirkenden Stoffen erwartet. Der Einsatz chemischer und biologischer Maßnahmen erfordert gegenüber den technischen Maßnahmen höhere wirtschaftliche Aufwendungen. Dies betrifft sowohl die Investitions- als auch die Betriebskosten. Insbesondere der Einsatz von Bakteriziden zur Verringerung der Pyritverwitterung befindet sich noch im Versuchsstadium. Die technische Umsetzbarkeit und die Genehmigungsfähigkeit sind daher noch nicht abschätzbar.

Der Einbau von alkalisch wirkenden Stoffen ist die einzige Maßnahme, die eine Kompensation der Versauerung bewirkt. Im Braunkohlenbergbau mit Absetzertechnologie gehört die Einbringung von alkalisch wirkenden Stoffen in stark versauernd wirkendes Abraummaterial zum Stand der Technik (Kapitel 8.2.3).

7.2.2 Maßnahmen zur Eindämmung der räumlichen Ausdehnung der Quelle (Kategorie B)

7.2.2.1 Übersicht

Die jüngsten Erfahrungen insbesondere im Sanierungsbergbau belegen, dass sich die Pyritverwitterung im Braunkohlenbergbau nicht auf den ehemaligen Tagebau und auf die Kippen beschränkt. Durch die Sümpfung wird je nach hydrogeologischer Konstellation das Grundwasser auch in den gewachsenen Grundwasserleitern im Umfeld der Tagebaue abgesenkt. Im Absenkungstrichter findet, zumindest im Bereich der Absenkungslamelle, eine Belüftung des Grundwasserleiters statt. Sofern der gewachsene Grundwasserleiter Pyrit enthält, erfolgt auch hier eine Pyritverwitterung mit der möglichen Folge einer Grundwasserversauerung. Als Maßnahmen zur Eindämmung der räumlichen Ausdehnung der Quelle im aktiven Bergbau (Kategorie B) kommen daher im Wesentlichen nur hydraulische Maßnahmen in Frage (Tabelle 29).

7.2.2.2 Verfahrensprinzipien

Mit einer **Dichtwand** wird der Grundwasserzufluss zu einem Tagebau abgeriegelt und damit die Wasserhebung im Tagebau verringert. Gleichzeitig sichert sie den Erhalt von Grund- und Oberflächenwasser im unmittelbaren Umfeld der Tagebaue. Mit Dichtwänden wird die horizontale Durchlässigkeit von Grundwasserleitern lokal deutlich verringert. Dichtwände können sowohl in gewachsenen Grundwasserleitern als auch in Kippen errichtet werden. Die Technologien hierfür unterscheiden sich grundlegend.

In gewachsenen Grundwasserleitern kommen das Schlitzfräsverfahren oder das Schlitzgreiferverfahren zur Anwendung. Der aufgeschlossene Schlitz wird mit einem dichtenden Material (in der Regel Tonsuspension) verfüllt. Zur Errichtung von Dichtwänden in Kippen bzw. am Rand von Kippen ist das BULinject®-Verfahren geeignet. Es stellt eine Kombination aus Rütteldruckverdichtung und Dichtwandbau dar.

Sind die geologischen Bedingungen für den Einsatz von Dichtwänden nicht gegeben oder handelt es sich bei dem in Anspruch zu nehmenden Gebiet um kleinräumig begrenzte Biotope, können Schutzinfiltrationen mit Infiltrationselementen die Reichweite des Absenkungstrichters verringern. Dabei wird dem Untergrund über Brunnen, Sickerschlitze oder Gräben Wasser zugeführt. Die Wahl der Technologie richtet sich nach den hydrogeologischen Gegebenheiten, insbesondere nach der Lage von Grundwasserstauern und von zu beaufschlagenden Grundwasserleitern im geologischen Profil. Bei der Infiltration in den Untergrund im Allgemeinen und bei der Infiltration in Brunnen im Besonderen sind strenge Kriterien hinsichtlich der Wasserbeschaffenheit zu beachten. Vorraussetzung für den Betrieb von Infiltrationselementen ist das Vorhandensein geeigneter Rohwasserguellen, die den Bedarf sowohl mengenseitig als auch beschaffenheitsseitig decken. Das kann ggf. eine Wasseraufbereitung erfordern. Der Einsatz von im Vorfeld gehobenen Wässern lässt wirtschaftliche Vorteile erwarten. Die Infiltrationselemente müssen häufig über die Zeit des aktiven Tagebaus hinaus bis zum Abschluss des Grundwasserwiederanstiegs in Betrieb sein.



7.2.2.3 Entwicklungsstand und Beispiele

der Braunkohle - Abschlussbericht

Von der Vattenfall Europe Mining AG werden im Lausitzer Braunkohlerevier verstärkt Dichtwände eingesetzt, wenn sich damit die Ziele des Grundwasserschutzes sicher und nachhaltig gewährleisten lassen. Die Schlitzwandtechnologie ist in der Lausitz sehr weit entwickelt. Derzeit wird die Schlitzwandtechnik der 3. Generation eingeführt. Damit können Schlitze bis 130 Meter Tiefe hergestellt werden. Voraussetzung für die Anwendung der Schlitzwandtechnologie ist das Vorhandensein eines bindigen Einbindehorizontes im Liegenden der Dichtwand. Durch die deutliche Verringerung der Sümpfungsmengen entsteht hierbei auch ein wirtschaftlicher Vorteil für das Bergbauunternehmen. Die <u>Tabelle 31</u> gibt einen Überblick über die in der Lausitz bereits gebauten und die derzeit geplanten Dichtwände.

Tabelle 31: Übersicht der ausgeführten und geplanten Dichtwände der VATTENFALL Europe Mining AG, Quelle: [Koch u. a. 2011]

Europe Minnig AO, Quene. [Noch u. a. 2011]							
Tagebau Bundes-	Tagebau Jänschwalde	Tagebau Cottbus-Nord	Tagebau Welzow-Süd	Tagebau Reichwalde			
land Kriterium	Brandenburg	Brandenburg	Brandenburg/ Sachsen	Sachsen			
Länge	9.981 m fertig gestellt 12/2008 10.770 m geplant	7.100 m fertig gestellt 05/2007	10.700 m geplant	4.200 m genehmigt ca. 7.500 m geplant			
Tiefen	52 85 m	51 72 m	90 110 m	37 47 m			
Technologie	ie Schlitzfräs- verfahren 1.500 m im Schlitzgreifer- verfahren 5.500 m im Schlitzfräs- verfahren		Schlitzfräs- verfahren	Schlitzfräs- verfahren			
Zweck	Schutz des Neißetales und der Republik Polen	Schutz der Spreeaue, von Cottbus und des Peitzer Teich- gebietes	Schutz der Erweiterten Restlochkette	Schutz der FFH- Gebiete "Raklitza und Teiche bei Rietschen"			

Die Maßnahme der Schutzinfiltration wird beispielsweise bei der RWE Power AG zur Stützung von Feuchtgebieten im Schwalm-Nette-Gebiet angewendet. Die Stützung der Feuchtgebiete erfolgt durch Versickerung bzw. durch Direkteinleitung. Der überwiegende Teil des Infiltrationswassers besteht aus Sümpfungswasser des Tagebaus Garzweiler. Dieses Wasser wird vor der Versickerung bzw. Einleitung mittels Kiesfilter gereinigt. Hier erfolgt eine Abreicherung von Eisen und Mangan. Das Versickerungssystem besteht aus Sickerschlitzen und Sickerbrunnen. Sickerbrunnen verlaufen etwa in 2 km Entfernung von den Feuchtgebieten und sind meist 40 Meter lang, einen Meter breit und etwa 6 Meter tief. Die Sickerschlitze sind mit Filterkies gefüllt. Die Sickerbrunnen sind in der Regel 10 bis 30 Meter tief und mit einem kiesgefüllten Vorfilter ausgestattet [RWE 2006].

Neben der Dichtwandtechnologie werden von der Vattenfall Europe Mining AG in schützenswerten Feuchtgebieten ebenfalls Schutzinfiltrationen (z. B. Jänschwalder Laßzinswiesen, Tagebau Cottbus) angewendet. Die Infiltration erfolgt mit Sümpfungswasser über Sickerschlitze, Infiltrationsbrunnen und Infiltrationslanzen sowie durch Direkteinleitung in Fließgewässer und Feuchtgebiete [LfULG 2009].

7.2.2.4 Eignung

Beide Maßnahmen, der Bau von Dichtwänden und die Schutzinfiltration mit Infiltrationselementen, zählen zum fortgeschrittenen Stand der Technik und haben für die entsprechenden Einsatzbedingungen ihren festen Platz in der Technologie des Braunkohlenbergbaus gefunden. Die nachteiligen höheren Investitionskosten für den Bau einer Dichtwand wirken sich durch deutlich geringere Betriebskosten vorteilhaft gegenüber der Schutzinfiltration aus. Die Schutzinfiltration stellt sich im Wesentlichen in Gebieten mit ungünstigen geologischen Bedingungen (z. B. Fehlen eines Stauers in erreichbarer Tiefe) als Alternative zur Dichtwand dar. Ansonsten haben beide Technologien ihre spezifischen Einsatzbereiche.

7.2.3 Maßnahmen zur Verhinderung der Stoffausbreitung (Kategorie C)

7.2.3.1 Übersicht

Maßnahmen zur Verhinderung der Stoffausbreitung (Kategorie C) im aktiven Braunkohlenbergbau konzentrieren sich im Wesentlichen darauf, Sümpfungswasser chemisch aufzubereiten (Anlage 6.4). Im Lausitzer und Mitteldeutschen Braunkohlenrevier ist die Behandlung von Sümpfungswasser in Grubenwasserbehandlungsanlagen Stand der Technik. Das behandelte Sümpfungswasser wird in die Vorflut eingeleitet. Als behördliche Grenzwerte bei der Einleitung von Sümpfungswasser in die öffentliche Vorflut gelten überwiegend folgende Werte:

•	pH-Wert:	$6,5 \le pH \le 8,5$
•	<u> </u>	•
•	Eisen-gelöst:	< 1 mg/L
•	Abfiltrierbare Stoffe:	< 2030 mg/L

Andere chemische Kennwerte werden in den wasserrechtlichen Erlaubnissen zur Einleitung von Sümpfungswasser in die öffentliche Vorflut überwiegend nicht mit Grenzwerten belegt. Im Zusammenhang mit zunehmenden Ausleitmengen aus den gefluteten Bergbaufolgeseen des Sanierungsbergbaus hat sich in den zurückliegenden 10 Jahren in einigen regionalen Fließgewässern, z. B. in der Spree (Lausitzer Revier) und in der Pleiße (Mitteldeutsches Revier südlich von Leipzig), die Sulfatkonzentration merklich erhöht. Der Grenzwert der TwVO für Sulfat von 250 mg/L wird hier bereits dauerhaft und deutlich überschritten. Die Wasserbehörden sind bemüht, die Sulfatkonzentration in den Fließgewässern als Immissionswert zu begrenzen. In der Lausitz wurde vom länderübergreifenden Arbeitskreis "Wasserbehörden auch die Bergbauunternehmen ständig vertreten sind, ein Strategiepapier zur Minderung der Sulfatkonzentration in den Fließgewässern verabschiedet. Darin verpflichtet sich auch der aktive Bergbau zur Minderung der Sulfatbelastung in den Fließgewässern.

Die Ursache für die hohe Sulfatbelastung des Sümpfungswassers und folglich auch der Fließgewässer ist die Pyritverwitterung. Die Versauerung des Kippenwassers wird durch die Grubenwasserbehandlung nach dem Stand der Technik vollständig kompensiert. Die Sulfatkonzentration kann damit jedoch nicht verringert werden. Alle Maßnahmen zur Verhinderung bzw. Minderung der Pyritverwitterung und Kippenversauerung dienen folglich mittelbar auch der Minderung der Sulfatbelastung in den Fließgewässern.

Sümpfungswasser der Tagebaue wird auch als so genanntes "Ökowasser" zur Stützung von grundwasserbeeinflussten Landökosystemen (z. B. Moorgebiete, Feuchtbiotope) und zur Flutung von Bergbaufolgeseen verwendet. Da diese Anwendungen häufig dezentral erfolgen, wird hierfür meist unbehandeltes Wasser verwendet. Zur Vermeidung hoher Belastungen wird dafür überwiegend kein Kippenwasser genutzt. Da aber auch das Grundwasser in den Absenkungstrichtern der Tagebaue stellenweise von der Pyritverwitterung und von der Versauerung betroffen ist, genügen die Eisenkonzentration und der pH-Wert stellenweise nicht den wassergütewirtschaftlichen Anforderungen. In Fällen mit moderater Belastung und bei vergleichsweise geringen Volumenströmen bieten sich naturnahe Verfahren der Wasserbehandlung an.

7.2.3.2 Verfahrensprinzipien

Die technische Wasserbehandlung im Braunkohlenbergbau erfolgt in kompakten Anlagen mit Entsäuerungs- und Flockungstechnologien. Das Sümpfungswasser wird den GWBA bzw. GWRA über Sammelrohrleitungen zugeführt. Die vorhandenen Anlagen verfügen über ein bis drei Reinigungsstrecken, die einzeln oder parallel betrieben werden. Das Rohwasser wird im Einlauf der Anlagenstrecken über Gebläse belüftet und damit teilweise entgast. Anschließend wird Kalkmilch als Suspension oder Kalkhydrat trocken dosiert. Kalkmilch wird vor Ort durch Ablöschen von Branntkalk hergestellt. Vor den Absetzbecken wird ein Flockungshilfsmittel dosiert. Als Flockungshilfsmittel dienen bevorzugt anionische Polyacrylamide. Die Absetzbecken sind in den älteren Anlagen meist als Rechteckbecken und in den neuen Anlagen (GWBA Tzschelln, GWBA Neukieritzsch) bevorzugt als Rundbecken ausgebildet. Der Eisenhydroxidschlamm wird in den Rechteckbecken mit Schlammpumpen und in den Rundbecken mit Schlammschiebeschildern periodisch abgezogen und in einen Pumpenvorlagebehälter geleitet. Von hier aus erfolgt die Schlammentsorgung in gesonderte Stapelbecken oder in geeignete Bergbaufolgeseen. Beim Reinigungsprozess in den Grubenwasserbehandlungsanlagen entstehen Dünnschlämme mit einem geringen Trockenrückstand zwischen 0,5 und 2,0 Masse-%. Das Reinwasser der Grubenwasserbehandlungsanlagen wird überwiegend auf kurzem Weg in die regionalen Fließgewässer abgeschlagen oder für weitere Nutzungen zur Verfügung gestellt.

Eine <u>technische Wasserbehandlung</u> mit Entsäuerungs- und Filtrationstechnologien wird im Bergbau überwiegend nicht angewendet. Ihre Eignung ist auf vergleichsweise niedrige Eisenkonzentrationen und geringe Volumenströme beschränkt.

Die <u>elektrochemische Wasserbehandlung</u> stellt eine interessante Alternative dar, weil durch das Verfahren mehrere chemische Behandlungseffekte gleichzeitig erzielt werden können. Das Wasser wird chemisch neutralisiert, die Metalle (Eisen, Aluminium und Mangan) werden vollständig eliminiert, im Wasser kann eine Pufferkapazität erzeugt werden, die deutlich über sonstigen Behandlungsverfahren liegt, und außerdem können gezielt Anionen, wie z. B. Sulfat, abgereichert werden.

Unter <u>naturräumlicher Wasserbehandlung</u> versteht man die Behandlung von Wässern überwiegend direkt im betroffenen Ökosystem (in situ), in dem die Belastung auftritt. Die naturräumliche Wasserbehandlung nutzt überwiegend natürliche physikalische, chemische und biologische Potentiale zur Behandlung belasteter Gewässer bei einem minimalen technischen Energieaufwand. Für die naturräumliche Wasserbehandlung gibt es einen breiten Gestaltungsspielraum. Die naturräumliche Wasserbehandlung kann in Standgewässern, Fließgewässern und im Grundwasser etabliert werden. Den typischen Anwendungsfall für die naturräumliche Wasserbehandlung im Braunkohlenbergbau stellen die so genannten Flusskläranlagen dar. Auch die Verwendung von unbehandeltem Sümpfungswasser zur Flutung von Bergbaufolgeseen stellt im Grunde genommen ein naturräumliches Verfahren der Wasserbehandlung dar.

Der Regelfall der naturräumlichen Wasserbehandlung ist die Behandlung neutraler und nicht säuregenerierender Sümpfungswässer, der mit den Verfahrensschritten Belüftung und Absetzen auskommt. Die Behandlung saurer und potentiell säuregenerierender Sümpfungswässer erfordert eine aufwendige Verfahrensführung mit den zusätzlichen Verfahrensschritten der Alkalinitätsproduktion, der Sulfatreduktion und/oder der chemischen Neutralisation. Solche naturräumlichen Wasserbehandlungsanlagen zählen auch international noch nicht zum Stand der Technik.

Ein entscheidender Vorteil der naturräumlichen Wasserbehandlung gegenüber einer technischen Wasserbehandlung sind die geringen Betriebskosten, jedoch ist der Flächen- und Raumbedarf in der Regel deutlich größer. Das schränkt insbesondere die Volumenströme ein, die auf diesem Weg behandelt werden können.

Eine technische Möglichkeit zur Kompensation von stofflichen Belastungen des Sümpfungswassers besteht im <u>Wassermanagement</u> nach dem Verdünnungsprinzip. Das Verdünnungsprinzip kann nur angewendet werden, wenn ausreichend Wasser zur Verfügung steht, um die stofflichen Belastungen des Sümpfungswassers im Zuge der Einmischung auf gewässerökologisch akzeptable Werte zu verdünnen. Die hydrologische Situation sowohl in der Lausitz als auch in Mitteldeutschland schließt dieses Verfahren zur Behandlung von Sümpfungswässern des Braunkohlenbergbaus in der Regel aus.

7.2.3.3 Entwicklungsstand und Beispiele

Beispiele für technische Wasserbehandlungsanlagen des Braunkohlenbergbaus mit Entsäuerungs- und Flockungstechnologien auf dem Gebiet des Freistaates Sachsen sind die GWBA Kringelsdorf, die GWBA Tzschelln und die GWRA Neukieritzsch. Die wesentlichen technologischen Eckdaten dieser Wasserbehandlungsanlagen sind in der <u>Tabelle 32</u> zusammengetragen. Die genannten Grubenwasserbehandlungsanlagen funktionieren zuverlässig.

Tabelle 32: Grubenwasserreinigungsanlagen im sächsischen Braunkohlenbergbau

	GWBA Kringelsdorf	GWBA Tzschelln	GWRA Neukieritzsch
Betreiber	VEM	VEM	MIBRAG
Tagebau	Reichwalde	Nochten	Vereinigtes Schleenhain
Fließgewässer	Weißer Schöps	Spree	Pleiße
Anlagenkapazität	3,0 m³/s	1,0 m³/s	1,0 m³/s
Flockungsmittel	Trockendosierung Kalkhydrat	Kalkmilch aus Branntkalk	Kalksteinmehl
Flockungshilfsmittel	ja	ja	ja
Absetzbecken	3 Rechteckbecken	3 Rundbecken	3 Rundbecken + Eindickung (Krählwerk)
mittlere Eingangswerte:			
pH-Wert	5 7	4 6	5 7
Eisen in mg/L	30 50	300 400	20 70
Sulfat in mg/L	300 400	1.800 2.000	800 1.300

7.2.3.4 Eignung

Zur Behandlung von versauertem Kippenwasser sind die Wasserbehandlung in technischen Anlagen und ein gut funktionierendes Wassermanagement die wirkungsvollsten Maßnahmen. Die Wassergütesteuerung stellt keine tatsächliche Wasserbehandlung dar, vielmehr kommt dabei das Verdünnungsprinzip zur Anwendung. Die Wasserbehandlung in Grubenwasserbehandlungsanlagen mit Entsäuerungs- und Flockungstechnologie gehört sowohl im aktiven als auch im Sanierungstagebau zum Stand der Technik. Dabei erfolgt jedoch keine Wasserbehandlung hinsichtlich des Sulfates. Die Wasserbehandlung in technischen Anlagen mit elektrochemischer Sulfatabtrennung befindet sich noch im Entwicklungsstadium und ist technisch wesentlich aufwendiger als die üblichen Grubenwasserbehandlungsanlagen. Die Wasserbehandlung in technischen Anlagen ist auf Grund des technischen Prozesses gut beherrschbar, aber mit hohen Investitions- und Betriebskosten verbunden.

Die wirtschaftlichen Aufwendungen sind für eine naturräumliche Wasserbehandlung deutlich geringer. Allerdings besteht insbesondere für die Wasserbehandlung in Fließgewässern und im Grundwasserleiter noch erheblicher Forschungsbedarf. Die naturräumliche Behandlung von Bergbaufolgeseen mittels In-lake-Technologie ist im Sanierungsbergbau inzwischen Stand der Technik und kann vom Ufer aus über Pumpleitungen oder durch den Einsatz mobiler Schiffstechnik erfolgen (Kapitel 7.3).

7.3 Nachsorgende Maßnahmen

7.3.1 Übersicht

Im Folgenden sind Maßnahmen zusammengestellt, die geeignet sind, die nachteiligen Wirkungen der Pyritverwitterung und Versauerung im Rahmen des Sanierungsbergbaus abzuwenden (<u>Tabelle 33</u>).

Die Maßnahmen haben einen unterschiedlichen Entwicklungsstand. Ein Teil der Maßnahmen ist übliche Sanierungspraxis, entspricht also dem Stand der Technik im Sanierungsbergbau. Ein anderer Teil der Maßnahmen entspricht dem Stand der Technik, hat jedoch im Sanierungsbergbau noch keine Anwendung gefunden. Ein weiterer Teil der Maßnahmen entspricht dem Stand der Forschung und wurde im Rahmen von Pilotvorhaben großtechnisch getestet. Auf die Darstellung von Maßnahmen auf dem Entwicklungsstand kleintechnischer Versuche und im Entwurfsstadium wurde verzichtet. Auf ggf. interessante Forschungsansätze wird im Text eingegangen.

Die Art der anzuwendenden Maßnahmen im Sanierungsbergbau unterscheidet sich im Wesentlichen in Abhängigkeit von der Art der zu behandelnden Quelle, des Transportpfades und des Schutzgutes. Die Definition von Quellen, Transportpfaden und Schutzgütern ist im Sanierungsbergbau nicht immer eindeutig, da die betroffenen Kompartimente mehrere Funktionen gleichzeitig erfüllen können. Als relevante Kompartimente mit dieser Mehrfachfunktion werden im Folgenden betrachtet:

- Fließgewässer
- Bestehende Standgewässer: Talsperren und (natürliche) Seen
- Neu entstehende Standgewässer: Bergbaufolgeseen
- Das Grundwasser in den Innenkippen
- Das Grundwasser in den gewachsenen Grundwasserleitern
- Das Grundwasser im Einflussbereich von Außenhalden
- Der Boden als land- und forstwirtschaftliches Produktionsmittel sowie als ökologisches Gut
- Der Boden als Baugrund





	Kompartiment (Quelle,								
Maßn	Transportpfad, Schutzgut)	Fließ- gewässer	Talsperren, Seen	Bergbaufolge- seen	Innenkippen	Grundwasser- leiter	Außenhalde	Boden	Baugrund
[1]	Wassermanagement im Flussgebiet	•	-						
[2]	Wasser <u>fassung</u> und externe Wasserbehandlung	•							
[3]	Naturräumliche Wasserbehandlung (z.B. Flusskläranlage)	•							
[4]	Veränderte Stauhaltung (Einstau, Absenkung)		•	•					
[5]	Spülungsflutung			•					
[6]	Wasser <u>haltung</u> und externe Wasserbehandlung		-	•					
[7]	In-lake-Wasserbehandlung		-	•					
[8]	Auslaufwasserbehandlung								
[9]	Untergrundverdichtung				•				
[10]	Dichtwand				•				
[11]	Hydraulische Barriere (Schutzinfiltration)				•	•			
[12]	Wasser <u>hebung</u> und externe Wasserbehandlung				•	•			
[13]	Untergrundwasserbehandlung (z. B. reaktive Wand)				•	•			
[14]	Ersatzmaßnahme (z.B. Wasserfassung)					•			
[15]	Bepflanzung und Nutzungsänderung						•	•	
[16]	Melioration (Dränage, Kalkung)							•	
[17]	Chemischer Schleier (z. B. Infiltration alkalischer Stoffe)						•		-
[18]	Materialwahl, Oberflächenvergütung								-
[19]	Lokale Baugrundverdichtung, Verpressen								•
[20]	Lokale Wasserhaltung								•
[21]	Kellerverfüllung, Gebäudeanhebung								-
[22]	Ersatzneubau								•

[■] Maßnahme geeignet; □ Maßnahme bedingt geeignet

7.3.2 Verfahrensprinzipien

[1] Wassermanagement im Flussgebiet: Durch gezielte Steuerung der Ausleitmengen aus Bergbaufolgeseen, Talsperren und Speicherbecken kann die Gewässerversauerung von Fließgewässern und natürlichen Seen, insbesondere in Zeiten mit Niedrigwasser, verringert werden. Dabei erfolgt keine direkte Behandlung von sauren Wässern, sondern vielmehr eine Verringerung der Belastung von Fließund Oberflächengewässern durch das Verdünnungsprinzip.

Zur gezielten chemischen Behandlung von Fließgewässern bieten sich zwei Möglichkeiten an:

- [2] einmal die Entnahme von Wasser und seine Behandlung in einer externen Wasserbehandlungsanlage und
- [3] zum anderen die Förderung von Selbstreinigungsprozessen durch naturräumliche Gestaltung von Fließgewässern.
- [4] Durch dauerhafte Absenkung des Stauniveaus kann der Abstrom aus Bergbaufolgeseen in die tangierenden Grundwasserleiter substantiell verringert werden. Die Möglichkeit zur Absenkung des Stauniveaus ist von den konkreten hydraulischen und geotechnischen Randbedingungen abhängig. Da die Zielwasserstände und die Staulamellen in den Bergbaufolgeseen meist in frühen Planungsphasen festgelegt und die morphometrische Gestaltung der Seen (Ufergestaltung, Böschungen, Wasserbau) darauf abgestimmt sind, sind die Freiheitsgrade hierfür oft sehr gering.

Zur Wasserbehandlung von Bergbaufolgeseen im Sanierungsbergbau bieten sich grundsätzlich drei Strategien an:

- [5] die Spülungsflutung,
- [6] die Entnahme von Wasser und seine Behandlung in einer externen Wasserbehandlungsanlage sowie
- [7] die Verfahren der In-lake-Wasserbehandlung.

Die erste Strategie verfolgt das Verdünnungsprinzip, die zweite Strategie das Prinzip des Stoffexportes und dessen Eliminierung aus dem Wasserkreislauf und die dritte das Prinzip der chemischen Kompensation im See. Im Unterschied zum Grundwasser sind die Bergbaufolgeseen für Maßnahmen der Wasserbehandlung gut zugänglich. Auch die homogenisierende Wirkung der limnologischen Mischungsprozesse in den Bergbaufolgeseen macht die Wasserbehandlung kalkulierbar.

[8] Um Schäden von Oberflächenwässern durch Ausleitung aus sauren Bergbaufolgeseen abzuwenden, bietet sich in der einfachsten Variante die Behandlung des Wassers am Auslauf der Seen an. Sie stellt im Vergleich zur In-lake-Wasserbehandlung (<u>Tabelle 34</u>) eine Minimalvariante dar, weil nur der bilanzüberschüssige Volumenstrom behandelt werden muss.

- [9] Aufgrund der verringerten Lagerungsdichten der Böden in den Innenkippen kann durch eine Verdichtung ggf. unter Anwendung von bindigen oder stabilisierenden Zusatzstoffen (Kraftwerksasche, Kalkstein) gleichzeitig auch eine substantielle Verringerung der Durchlässigkeit erreicht werden. Im Unterschied zur Herstellung von Dichtwänden müsste die Verdichtung für diese Zwecke flächenhaft oder in systematischen Rastern erfolgen, um die gewünschte Wirkung zu erzielen. Ziel der Maßnahme ist eine Verringerung des Stoffaustrages aus der Quelle (Kippe).
- [10] Mit einer Dichtwand kann der Abstrom aus Bergbaufolgeseen, der Grundwasserabstrom aus Innenkippen und der Grundwasserabstrom unter Außenhalden in die umgebenden gewachsenen Grundwasserleiter konsequent unterbunden werden.
- [11] Eine hydraulische Barriere dient im Prinzip dem gleichen Ziel, den Grundwasserabstrom und damit den Stoffaustrag aus der Quelle zu verringern bzw. zu verhindern. Das erfolgt durch gezielte Veränderung der hydraulischen Verhältnisse im Übergangsbereich. Die hydraulische Barriere kann je nach den hydrogeologischen Gegebenheiten als Graben-, Rigolen- oder Brunneninfiltration ausgeführt werden.
- [12] Die Quellenbehandlung stofflich belasteter Grundwasserleiter und grundwassergefüllter Innenkippen kann konventionell durch Wasserhebung mittels Brunnen in Verbindung mit einer externen Wasserbehandlung erfolgen. Das Verfahren ist in der Altlastenbehandlung unter dem englischen Fachterminus "pump and treat" verbreitet. Im Braunkohlenbergbau ist es bislang nicht üblich. Es würde eine Fortsetzung der Sümpfungsmaßnahmen mit veränderter Zielstellung bedeuten.

Das gleiche Prinzip lässt sich auf die Außenhalden übertragen, nur dass hier die Wasserfassung im gewachsenen Grundwasserleiter erfolgen muss. Die Maßnahmen entsprechen dem Prinzip der Randriegel des aktiven Bergbaus. Unterschiedlich und besonders problematisch ist die dauerhaft hohe Belastung des Grundwassers mit Eisen, was zur Brunnenverockerung und zur Verockerung der Rohrleitungen führt.

[13] Auch Maßnahmen der Untergrundwasserbehandlung versprechen im Braunkohlenbergbau Erfolg. Bei der Untergrundwasserbehandlung werden bevorzugt die natürlichen Reinigungsprozesse im Grundwasserleiter durch Einbringen von ausgewählten reaktiven Stoffen stimuliert und das Grundwasser vor Ort (in situ) behandelt. Die Varianten der Untergrundwasserbehandlung sind vielfältig.

Eine reaktive Wand stellt einen Spezialfall der Wasserbehandlung im Untergrund dar. Die Installation von reaktiven Wänden zielt auf eine weitgehend passive Wasserbehandlung mit Hilfe von reaktiven Stoffen im Untergrund. Die Durchlässigkeit einer reaktiven Wand muss mindestens der Durchlässigkeit des umgebenden Grundwasserleiters entsprechen, um ein Umströmen zu verhindern.

[14] Ersatzmaßnahmen bieten sich im Wesentlichen nur für Grundwasserleiter an. Trinkwasserfassungen, die in Grundwasserleitern verfiltert wurden, die von der Versauerung betroffen sind, können durch Grundwasserfassungen aus tieferen Grundwasserleitern ersetzt werden.

[15] Eine Nutzungsänderung im Sinne der Quellenbehandlung zielt darauf, durch einen Wechsel der Nutzungsart eine höhere Transpiration zu erzeugen und damit die Grundwasserneubildung dauerhaft zu verringern. Dadurch wird der Stoffaustrag aus der Quelle verringert. Eine Verringerung der Grundwasserneubildung kann z. B. durch eine Umwandlung von Offenland in Forst, von extensiv bewirtschaftetem Weideland in intensiv bewirtschaftetes Land usw. erzielt werden. Das Verfahren verspricht vor allem guten Erfolg bei der Dominanz von bindigen Böden (Mitteldeutsches Revier) und weniger Erfolg bei sandigen Böden (Lausitzer Revier).

[17] Auf Grund der ungesättigten Verhältnisse in den Außenhalden beschränken sich die möglichen Maßnahmen zur Quellenbehandlung auf das Einbringen von alkalischen Stoffen zur Neutralisation des versauerten Haldensickerwassers. Das Einbringen muss über Schluckbrunnen oder Lanzen erfolgen.

Saure und sulfatreiche Wässer können Beton korrodieren. Bauwerke in Braunkohlegebieten sind daher nicht nur durch den generellen Grundwasseranstieg nach dem Bergbau gefährdet, sondern auch in besonderem Maße durch saures Grundwasser. Zum Schutz von Bauwerken vor Betonkorrosion bieten sich, neben den Maßnahmen zur Verringerung der Grundwasserversauerung, folgende Maßnahmen an:

- [18] Durch die Verwendung von Beton mit hohem Sulfat- bzw. Säurewiderstand oder durch die Verwendung einer Schutzschicht kann die Korrosion verringert werden. Durch Berücksichtigung einer sog. Opferbetonschicht, d. h. die Erhöhung der Betondicke, wird die Lebensdauer eines Bauwerkes erhöht [Siebert 2010].
- [19] Die lokale Baugrundverdichtung verfolgt das Ziel, den Grundwasserstrom zum Bauwerk zu verringern und damit die Betonkorrosion zu verzögern.
- [20] Insbesondere in Gebieten, in denen der nachbergbauliche Grundwasserspiegel eine besondere Gefährdung von Bauwerken darstellt, spielt die lokale Absenkung eine relevante Maßnahme dar. Diese bietet dann gleichzeitig auch Schutz vor der Betonkorrosion von Bauwerken.
- [21] Die Verfüllung von Kellern bzw. das Anheben des gesamtem Bauwerkes führt zu einer Verhinderung des Kontaktes zwischen Grundwasser und Bausubstanz und damit zu einer Verringerung der Betonkorrosion.
- [22] Der Ersatzneubau von Bauwerken zielt darauf, private oder öffentliche Gebäude vornehmlich in Gebieten mit größeren Grundwasserflurabständen zu errichten.

7.3.3 Entwicklungsstand und Beispiele

- [1] Die Steuerung der Sulfatlast in der Spree wird bereits durch das Gütesteuermodell Spree praktiziert [IWB 2011c]. Prinzipiell ist bei ausreichender Datenlage
 auch die Einbeziehung des Säureneutralisationspotentials denkbar. Für die untere
 Pleiße wurden 2011 Vorplanungen zur Installation einer Bewirtschaftungs- und
 Steuerzentrale der Sulfatlast erarbeitet [IWB 2011f]. Auf Grund der hohen Mobilität
 von Sulfat kommt der Steuerung der Sulfatlast in Vorflutern eine große Bedeutung
 zu. Auch der Eintrag anderer Stoffe (z. B. Eisen) kann mit Hilfe von Stoffstrommodellen abgeschätzt werden und mit entsprechenden Steuerungssystemen angepasst werden [Benthaus 2012].
- [2] Die Aufbereitung von sauren Grubenwässern in zentralen Wasserbehandlungsanlagen ist Stand der Technik. Konkrete Beispiele für die Fassung von Fließgewässern und die Aufbereitung in einer externen Wasserbehandlungsanlage sind den Bearbeitern derzeit nicht bekannt. Solche Maßnahmen sind im Rahmen der Minderung der Eisenbelastung in der Spree im Gespräch.
- [3] Insbesondere zur Feinreinigung von verschmutzten Fließgewässern werden künstlich angelegte Seen als Flusskläranlagen betrieben. Im Lausitzer Revier diente der ehemalige Tagebau Laubusch lange Zeit als Flusskläranlage. Aktuelle Beispiele für die naturräumliche Wasserbehandlung von Fließgewässern in Braunkohlengebieten, z. B. in einer Flusskläranlage, sind den Bearbeitern nicht bekannt. Unfreiwillig hat die Talsperre Spremberg derzeit die Funktion einer Flusskläranlage für bergbaulich belastetes Grundwasser übernommen. Im Sanierungsgebiet Lohsa tritt bei fortgeschrittenem Grundwasserwiederanstieg ein stark eisenbelastetes Grundwasser in die Spree und in die Kleine Spree diffus ein und verursacht hier hohe Eisenbelastungen und Trübungen. Die Eisenbelastung wird in der Talsperre Spremberg derzeit noch vollständig zurückgehalten.
- [4] Die unmittelbaren Zusammenhänge zwischen der Stauwasserhaltung in den Bergbaufolgeseen und dem Abstrom ins Grundwasser sind insbesondere aus dem Bereich Lohsa/Burghammer bekannt und haben hier vielfältige Auswirkungen auf das abströmende Grundwasser in der Spreewitzer Rinne (siehe [3]). Nicht zuletzt die hohe Eisenbelastung in der Kleinen Spree ist diesem Zusammenhang geschuldet. Aufgrund der Nutzungen der Bergbaufolgeseen als Speicher kommt eine dauerhafte Limitierung der Stauwasserhaltung in den Bergbaufolgeseen jedoch nicht in Betracht. Im konkreten Fall müssen andere Lösungen gefunden werden.
- [5] Beispiele für die Anwendung und den Erfolg der Spülungsflutung im Lausitzer Braunkohlerevier sind der Senftenberger See (Speicher Niemtsch) und der Bergbaufolgesee Bärwalde. Der Senftenberger See wurde bereits in den 1970er Jahren aus der Schwarzen Elster geflutet. Da die Immission von Verwitterungsprodukten und Säuren aus der Innenkippe und dem ehemaligen Absenkungstrichter des Tagebaus Niemtsch bis heute anhält, wird neben der beabsichtigten Speicherbewirtschaftung weiterhin Wasser aus der Schwarzen Elster durch den Senftenberger See geleitet. Um den Säureeintrag zu kompensieren, ist bis auf Weiteres eine mittlere Durchleitmenge von 0,6 m³/s Flusswasser durch den Senftenberger See erforderlich.

Der Speicher Bärwalde wurde in den zurückliegenden 10 Jahren durch ein konsequentes Flutungsmanagement aus der Spree und den direkt einmündenden örtlichen Fließgewässern geflutet. Der hohe Anteil von Flusswasser an der Flutung des in der Initialphase stark sauren Bergbaufolgesees hatte bis zum Erreichen der Ausleitfähigkeit zu einer vollständigen Kompensation der Säuren bis in den schwach sauren Zustand pH \approx 5 geführt. Bereits durch kurze Zyklen der Spülungsflutung konnte der hydrochemische Zustand des Sees in den neutralen Bereich verschoben und hier stabilisiert werden.

Für den Bergbaufolgesee Burghammer ist ebenfalls eine Spülungsflutung zur Stabilisierung des hydrochemischen Zustandes geplant. Da sich der Bergbaufolgesee Burghammer bereits im ausleitfähigen Zustand befindet, ist zunächst eine Kompensation der Säuren durch chemische Maßnahmen, wie bei der In-lake-Wasserbehandlung (siehe Maßnahme [7]) erforderlich.

Der Bergbaufolgesee Zwenkau wird mit chemisch konditioniertem Flutungswasser gespeist. Das aus dem Tagebau Profen stammende Sümpfungswasser wird in einer stationären Behandlungsanlage am Einlauf in den Zwenkauer See mit etwa 0,7 kg/m³ Branntkalk chemisch konditioniert [Benthaus 2012].

[6] Das Abpumpen aus Bergbaufolgeseen in Verbindung mit einer Wasserbehandlung wird häufig aus geotechnischen und weniger aus hydrochemischen Gründen betrieben. Der Wasserstand im Bergbaufolgesee Sedlitz (Brandenburg) wird durch die Pumpstation Bahnsdorf auf einem Niveau gehalten, das die gefahrlose bergtechnische Sanierung der Böschungen des Tagebaurestloches Sedlitz und des benachbarten Tagebaurestloches Meuro gestattet. Das aus dem Bergbaufolgesee Sedlitz gehobene Wasser wird in der GWRA Rainitza (LMBV) behandelt. Das behandelte Wasser wird anderen Nutzern im Sanierungsbergbau zur Verfügung gestellt, wie z. B. zur Flutung der Bergbaufolgeseen Greifenhain und Meuro, für die Ökowasserversorgung im Absenkungsbereich des ehem. Tagebaus Greifenhain und zur Sicherung des Mindestabflusses in der Rainitza.

Am Standort der GWRA Rainitza wird derzeit in einer Pilotanlage die elektrochemische Sulfatabtrennung mit zusätzlicher CO₂-Injektion untersucht. Die bisherigen Ergebnisse zeigen eine Verringerung der Sulfatkonzentration bis 40 % bei gleichzeitiger vollständiger Neutralisation der Wässer. Als Problematisch für die Anwendung der elektrochemischen Sulfatabtrennung erweist sich die deutliche Erhöhung der Ammoniumkonzentration etwa um den Faktor 10 bei einer Ammoniumkonzentration zwischen 2 und 10 mg/L im Rohwasser [IWB 2011d].

[7] Seit Ende der 1990er Jahre werden im Sanierungsbergbau der LMBV In-lake-Wasserbehandlungen als chemische Dosierverfahren getestet. In die Tests waren Bergbaufolgeseen unterschiedlicher Volumina und mit unterschiedlichen hydrochemischen Ausgangsbedingungen einbezogen. Geprüft wurden unterschiedliche Neutralisationsmittel, wie abgelagerte Kalkschlämme (Bergbaufolgesee Koschen), Eisenhydroxidschlämme und Aschen (Bergbaufolgesee Burghammer) sowie chemische Reinprodukte wie Kalksuspensionen aus Branntkalk (Hainer See und Haubitzer See), Kalkhydrat (Bergbaufolgesee Witznitz) und Kalksteinmehl, ferner Soda (Bergbaufolgesee Bockwitz) und Natronlauge. Ein wesentlicher Prüfgegenstand war des Weiteren die Eintragstechnologie, wie der Direkteintrag aus Silo-

fahrzeugen, der Eintrag über pontongelagerte Kreisregner, der Eintrag durch Schiffe mit Sprühstrahl (<u>Bild 70 links</u> in Kapitel 8.2.1) oder Schiffe mit Verteillanzen, der Eintrag über getauchte Rohrleitungen und andere Technologien. Zurzeit wird im Auftrag der LMBV am Scheibesee ein Pilotvorhaben zum Test alternativer Eintragsverfahren von chemischen Neutralisationsmitteln durchgeführt. Die Kalksuspension wird hierbei durch Düsenstrahlinjektion unter dem Wasserspiegel in den See eingetragen [GMB 2009] (<u>Bild 70 rechts</u> und <u>Bild 71</u> in Kapitel 8.2.1).

Ein weiteres Pilotvorhaben der LMBV sieht den zusätzlichen Einsatz von Kohlendioxid im Lichtenauer See (Lichtenauer See im ehemaligen Tagebau Schlabendorf-Nord) zum Aufbau eines Hydrogenkarbonatpuffers vor. Damit soll einer schnellen Wiederversauerung des Sees infolge starker Säurenachlieferung aus dem Kippenwasser und aus dem Absenkungstrichter entgegen gewirkt werden. Zielstellung ist die Verlängerung der Zeitabstände zwischen den zyklisch erforderlichen chemischen Nachbehandlungen.

[8] Planungen auf dem Stand der Entwurfs- und Genehmigungsplanung zur Wasserbehandlung am Auslauf aus dem Bergbaufolgesee Burghammer in die Kleine Spree in Form einer Kompaktanlage liegen bei der LMBV vor. Die Auslaufwasserbehandlung am Bergbaufolgesee Burghammer wurde aber zugunsten einer In-lake-Wasserbehandlung zurückgezogen. Bei einer Wasserbehandlung am Auslauf fällt Eisenhydroxidschlamm an, der im günstigsten Fall im Bergbaufolgesee verbracht werden kann, ansonsten gesondert entsorgt werden muss.

Ein Pilotvorhaben zur biologischen Sulfatreduktion am Auslauf des Hainer Sees wird im Auftrag der LMBV durchgeführt. Dabei wird in einem Teil des Ablaufwassers Sulfat in einem dreistufigen Prozess reduziert. Durch Melasse-Zugabe erfolgt die Sauerstoffzehrung. In einem nachgeschalteten Biofilterreaktor wird Sulfat reduziert und als Sulfid immobilisiert. Vor der Wiedereinleitung erfolgt in der dritten Stufe ein Kohlenstoffabbau [Benthaus 2012].

- [9] In einem Pilotvorhaben der LMBV wurde in der Innenkippe am Skadodamm zwischen den Bergbaufolgeseen Skado und Sedlitz die Rütteldruckverdichtung mit dem Einsatz einer grobkörnigen Kalksuspension kombiniert. Neben der beabsichtigten chemischen Wirkung wurde durch den Kalk eine deutliche Verdichtung des Kippenmischbodens erreicht. Die so erzeugte Struktur konnte als Dichtwand für ein nachfolgendes Pilotvorhaben genutzt werden.
- [10] Der Bau von Dichtwänden wird im Lausitzer Braunkohlerevier als Stand der Technik praktiziert (vgl. <u>Abschnitt 7.2.2</u>). Im Sanierungsbergbau wird die Dichtwandtechnik bislang nicht angewendet. Geeignete Anwendungsfälle und erfolgversprechende Einsatzorte für die Dichtwandtechnik im Sanierungsbau sind durchaus vorhanden.
- [11] Die hydraulische Barriere ist Stand der Technik im aktiven Braunkohlenbergbau (vgl. <u>Abschnitt 7.2.2</u>). Anwendungen dieser Technologie im Sanierungsbergbau sind bislang nicht bekannt. Das liegt vor allem daran, weil sich der Sanierungsbergbau infolge des Grundwasserwiederanstiegs überwiegend mit zu hohen nachbergbaulichen Grundwasserständen auseinandersetzen muss. Die hydraulische Barriere würde hier kontraproduktiv wirken.

[12] Die Grundwasserhebung in Verbindung mit einer Wasserbehandlung ist Stand der Technik bei der Sümpfung im Braunkohlenbergbau. Ein konkreter Anwendungsfall für diese Technologie im Sanierungsbergbau ist jedoch nicht bekannt.

[13] Seit vielen Jahren werden Forschungsvorhaben bei öffentlichen Trägern und Pilotvorhaben im Auftrag der LMBV zur Untergrundwasserbehandlung in den Braunkohlenbergbaugebieten durchgeführt. Durch das FIB wurde in der Nähe von Lauchhammer der Eintrag alkalischer Stoffe (Kalksuspension) mittels Lanzen in die Kippe getestet. Neben der chemischen Neutralisation sollten die Milieubedingungen für die natürliche Sulfatreduktion verbessert werden. Chemische und mikrobiologische Effekte konnten nachgewiesen werden. Die Technologie erwies sich jedoch als störanfällig.

Von der BTUC und dem DGFZ wurde im Rahmen eines BMBF-Forschungsvorhabens durch Dosierung von Methanol und Nährstoffen (N, P) in einem gewachsenen Grundwasserleiter im Anstrom zum Senftenberger See die Sulfatreduktion induziert. Für die Versuche wurde das Grundwasser aus einem Förderbrunnen entnommen, Methanol und Nährstoffe zudosiert und über einen zweiten Brunnen wieder in den Grundwasserleiter infiltriert. Beide Brunnen waren auf einer Linie quer zur Grundwasserströmungsrichtung angeordnet. Die Nährstoffzugabe führte in dem Pilotversuch zu einer nachweisbaren Steigerung der Sulfatreduktion [Koch u. a. 2006].

Vom FIB und der BTUC wurde im Rahmen eines Pilotvorhabens der LMBV durch Dosierung von Glycerin und Kalkmilch in den Kippenwasserleiter am Skadodamm die Sulfatreduktion induziert. Die durch ein anderes Forschungsprojekt entstandenen Dichtwände wurden als sogen. "funnel and gate"-System (Trichterprinzip) genutzt. Das Grundwasser wurde im unmittelbaren Abstrom der Dichtwand entnommen und konditioniert. Der Eintrag des konditionierten Wassers in den Grundwasserstrom erfolgte anschließend über vier Injektionslanzen [LMBV 2008d]. Im Ergebnis der Versuche konnte die Sulfatreduktion nachgewiesen werden. Dabei wurde das Kippenwasser neutralisiert und Eisen in der Kippe als Eisenmonosulfid in einem bedeutenden Umfang festgelegt [FIB 2011].

Im Rahmen eines von der BIUG Freiberg (Beratende Ingenieure für Umweltgeotechnik und Grundbau GmbH) durchgeführten Demonstrationsversuches wurde die Einbringung von Kalkmilch in die Kippe Lohsa II mit geotechnischen Sanierungsarbeiten verbunden. Während Saugspülbaggerarbeiten zur Wiederherstellung von Schutzgräben im Speicherbecken Lohsa II wurde der Grundwasserzustrom bzw. Grundwasserabstrom mit Kalkprodukten konditioniert. Auch der Eintrag von Kalkprodukten im Zuge von geotechnischen Stabilisierungsarbeiten (z. B. Rütteldruckverdichtung) ist denkbar und verspricht Synergieeffekte [LMBV 2008d].

Aus den aufgeführten Beispielen geht eine Vielzahl an Pilotprojekten zur Untergrundbehandlung hervor. Ein großtechnischer Einsatz von reaktiven Wänden findet im Sanierungsbergbau bislang noch nicht statt. Hemmnisse sind meistens die unsichere Übertragbarkeit vom Versuchsstandort auf großräumige Anwendungen, die ungenügende Prozesskontrolle in den heterogenen Grundwasserleitern und hohe Kosten.

der Braunkohle - Abschlussbericht



- [15] Durch entsprechende Dimensionierung einer Wasserhaushaltsschicht auf der Kippe Witznitz soll eine Verringerung der Grundwasserneubildung erreicht werden. Verstärkt wird die Wirkung der Wasserhaushaltsschicht durch Kultivierung der Flächen mit ganzjährig wachsenden Energiepflanzen. Ziel dieses Vorhabens ist die Minimierung der Exfiltration von eisenbelastetem Grundwasser in die Pleiße [Beims 2011]. Hierzu wird im Auftrag der LMBV ein Pilotvorhaben mit Hilfe von Lysimetern durchgeführt.
- [16] Meliorationsmaßnahmen sind Stand der Technik bei der Rekultivierung von Braunkohlekippen. Wobei mit Melioration hier die Kalkung und Düngung der oberen Bodenschicht gemeint sind. Bis zur politischen Wende wurden zur chemischen Melioration Kraftwerksaschen eingesetzt. Eine wasserhaushaltliche Melioration der Kippenoberflächen z. B. durch Rohrdränagen wird überwiegend nicht praktiziert. Aufgrund der ungleichmäßigen Setzungen und Sackungen werden dafür Grabenlösungen bevorzugt. Sie sind korrigierbar.
- [17] Das Einbringen von alkalischen Stoffen in das Volumen ungesättigter Halden wurde bislang noch nicht praktiziert. Zur Gefahrenabwehr an Gebäuden und Infrastruktur durch den Grundwasserwiederanstieg in Bergbaufolgelandschaften und die damit verbundene Zerstörung der Bausubstanz infolge des Wasserandrangs mit ungünstiger Wasserbeschaffenheit werden bevorzugt Maßnahmen durchgeführt, die eine großflächige Wirkung erzielen können (so genannte Komplexmaßnahmen). In Einzelfällen können auch Maßnahmen an Einzelobjekten erfolgen.
- [18] Maßnahmen der Oberflächenversiegelung an Bauwerken können von innen oder von außen durchgeführt werden. Die Innenabdichtung in Form einer Hautabdichtung auch als sog. "Weiße Wanne" bezeichnet, besteht aus einer wasserundurchlässigen Betonschicht. Ein Beispiel für die Außenabdichtung einer Bausubstanz ist die Schleiervergelung [Tienz 2012]. Dabei wird das Bauwerk von innen in rasterförmig angelegten Bohrkanälen durchbohrt. Durch diese Kanäle wird ein Gel zwischen Erdreich und Bausubstanz injiziert, das durch Wasserkontakt eine zusammenhängende Dichtungsschicht bildet.
- [19] Die lokale Baugrundverdichtung gehört zum Stand der Technik in der Baugrundsicherung.
- [20] Komplexmaßnahmen zum Schutz der Bausubstanz sind insbesondere Maßnahmen mit dem Ziel der Grundwasserabsenkung und Ableitung des Grundwassers. Dies können die Ertüchtigung vorhandener oder die Herstellung neuer Gräben, der Bau und der Betrieb von Dränagen, vertikalen sowie horizontalen Filterbrunnen sein. Die Wasserableitung erfolgt entweder im freien Gefälle oder durch den Einsatz von Pumpen [Tienz 2012]. Ein Beispiel für eine erfolgreiche Komplexmaßnahme ist die Horizontalfilterbrunnenanlage der Stadt Hoyerswerda. Die aus drei Horizontalfilterbrunnen bestehende Anlage sichert die dauerhafte Grundwasserspiegelabsenkung im Stadtgebiet [Scholz u. a. 2011]. Die Grundwasserabsenkung und Ableitung mittels Dränagen wird in der Stadt Gräfenhainichen durch Installation einer Ringdränage in etwa 2 Meter Tiefe praktiziert. Eine Sammelleitung führt das Grundwasser im freien Gefälle zum Vorfluter (Gräfenhainicher Mühlgraben) ab [Tienz 2012].

[21] In Gebieten, in denen die Anwendung von Komplexmaßnahmen nicht möglich ist (z. B. auf Grund der hydrogeologischen Gegebenheiten) müssen bautechnische Maßnahmen zum Schutz der Bausubstanz erwogen werden. Neben der Abdichtung können Nutzungsänderungen (z. B. Kellerverfüllung bzw. -teilverfüllung) eine mögliche Lösung sein [Tienz 2012]. Im Theater der Stadt Senftenberg wurde mit der Verfüllung der Tiefkeller eine Einzelobjektmaßnahme erfolgreich durchgeführt [Scholz u. a. 2011]. Eine weitere praktizierte technische Maßnahme ist das hydraulische Anheben von Gebäuden über den Grundwasserspiegel.

[22] In Einzelfällen kann die Erhaltung der Bausubstanz wirtschaftlich unrentabel sein, dann muss ggf. der Abriss der Bausubstanz in Erwägung gezogen werden.

Zum Schutz von Bauwerken vor dem Grundwasseranstieg sind darüber hinaus Kombinationen zwischen Komplex- und Einzelmaßnahmen möglich. Im mitteldeutschen Braunkohlenrevier wird in der Gemeinde Zscherndorf derzeit eine solche Kombinationslösung errichtet. Neben Einzelhaussicherungen durch Innen- und Außenabdichtungen sowie Kellerverfüllungen wird ein 2 bis 3 Meter tiefes Dränagesystem mit Ableiter installiert. Darüber hinaus soll durch Wasserspiegelabsenkung im nahegelegenen Bergbaufolgesee der Grundwasseranstieg verringert werden [Tienz 2012].

7.3.4 Behandlung der Stoffquellen (Kategorie A im Sanierungsbergbau)

Als nachsorgende Maßnahmen zur Quellenbehandlung im Sanierungsbergbau kommen folgende in Frage (<u>Tabelle 34</u>). Um die Bewertung zu vereinfachen, wurden die Maßnahmen nach dem Wirkprinzip und der Quelle systematisiert. Im Unterschied zu den Verfahren für den aktiven Braunkohlenbergbau (vgl. <u>Tabelle 29</u>) wurde anstelle des bergbautechnologischen ein bautechnisches Wirkprinzip definiert sowie ein hydraulisch-chemisches Wirkprinzip zusätzlich aufgenommen.

Tabelle 34: Nachsorgende Maßnahmen zur Quellenbehandlung (Kategorie A im Sanierungsbergbau)

Quelle Wirk- prinzip	Tagebau- restsee	Innen- kippe	Grund- wasser- leiter	Außen- halde
1) bau- technisch				
2) boden- mechanisch		[9] Untergrund- verdichtung zur Verringerung der Durchlässigkeit		
3) kultur- technisch		[15] Bepflanzung und Nutzungs- änderung zur Verringerung der Grundwasserneubildung		[15] Bepflanzung und Nutzungs- änderung zur Verringerung der Grundwasserneubildung
4) hydraulisch	[5] Spülungs- flutung zur Verdünnung			
5) hydraulisch- chemisch	[6] Wasser- haltung und externe Wasser- behandlung	[12] Wasserhebung und externe Wasserbehandlung in technischen Anlagen		
6) chemisch und/oder biologisch	[7] In-lake- Wasser- behandlung	[13] Untergrundwas	[17] Chemischer Schleier (Infiltration alkalischer Stoffe)	

Bewertung

Zur Behandlung von Bergbaufolgeseen als Quelle kommen ausschließlich hydraulische und chemische Maßnahmen in Frage. Die denkbaren Maßnahmen sind hinsichtlich der Bewertungskriterien vergleichbar. Die Spülungsflutung und die Inlake-Wasserbehandlung sind aus wirtschaftlicher Sicht grundsätzliche günstiger zu bewerten im Vergleich zu einer Wasserhaltung mit einer externen Wasserbehandlung (Anlage 7.1).

Die Untergrundverdichtung sowie die Bepflanzung und Nutzungsänderung verfolgen das Ziel, die Grundwasserneubildung in der Braunkohlenabraumkippe zu minimieren. Dabei erfolgt keine Behandlung des versauerten Kippenwassers. Es wird lediglich der Abstrom von Kippenwasser in Schutzgüter (z. B. gewachsener Grundwasserleiter, Oberflächengewässer) und damit der Stoffaustrag verringert. Die Untergrundwasserbehandlung befindet sich derzeit noch im Entwicklungsstadium, so dass noch keine konkreten Angaben bezüglich der Wirtschaftlichkeit und technischen Umsetzbarkeit gemacht werden können. Gegenüber der Wasserhebung und Wasserbehandlung in technischen Anlagen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sowohl die Investitions- als auch Betriebskosten geringer sind. Der Wirkungsgrad der Maßnahme ist für die externe Wasserbehandlung auf Grund des technischen Prozesses höher einzustufen (Anlage 7.1). Die beiden letztgenannten Maßnahmen sind sowohl auf das Grundwasser in der Kippe als auch auf das Grundwasser in den gewachsenen Grundwasserleitern anwendbar.

Im Unterschied zur Innenkippe verbleiben Außenhalden auch nach dem Grundwasserwiederanstieg unter ungesättigten Verhältnissen. Maßnahmen auf dem Stand der Technik beschränken sich auf die Verringerung der Grundwasserneubildung durch Bepflanzung oder Nutzungsänderung. Die Anwendung chemischer Maßnahmen ist auf Grund der ungesättigten Verhältnisse lediglich durch die Infiltration von alkalischen Stoffen denkbar. Dazu gibt es nach unserer Kenntnis bisher keine Pilotprojekte oder großmaßstäblichen Versuche (Anlage 7.1).

7.3.5 Verringerung des Stoffaustrages aus den Quellen (Kategorie B im Sanierungsbergbau)

Maßnahmen an der Barriere zwischen der Quelle und dem Transportpfad können auf Grund der konkreten räumlichen Abgrenzung insbesondere für die Bergbaufolgeseen, Innenkippen und Außenhalden angewendet werden (<u>Tabelle 35</u>). Für den Grundwasserleiter als Quelle der Versauerung lässt sich häufig keine klare Grenze zwischen der Quelle, dem Transportpfad und dem Schutzgut definieren.

Tabelle 35: Nachsorgende Maßnahmen an der Barriere der Quelle (Kategorie B im Sanierungsbergbau)

Quelle Wirk- prinzip	Tagebau- restsee	Innen- kippe	Grund- wasser- leiter	Außen- halde
1) bau- technisch				
2) boden- mechanisch				
3) kultur- technisch				
4) hydraulisch	[10] Dichtwand zur Einkapselung der Quelle [4] Veränderte Stauhaltung (Absenkung) zur Verringerung des Abstroms	[10] Dichtwand zur Einkapselung der Quelle [11] Hydraulische Barriere (Schutz- infiltration) zur Einkapselung der Quelle		[10] Dichtwand zur Einkapselung der Quelle
5) hydraulisch- chemisch	[8] Auslauf- wasser- behandlung	[12] Wasser- hebung und externe Wasser- behandlung		[12] Wasser- fassung und externe Wasser- behandlung
6) chemisch und biologisch		[13] Untergrund- wasserbehand- lung (als reaktive Wand)		[13] Untergrund- wasserbehand- lung (als reaktive Wand)

Bewertung

Hydraulische Maßnahmen besitzen das größte Potential, den Stoffaustrag aus Bergbaufolgeseen zu verringern. Hinsichtlich der Wirkungsfaktoren sind Dichtwände am günstigsten zu bewerten. Nachteilig sind hier die hohen Investitionskosten und die geologischen Einschränkungen. Bei ungünstigen geologischen Gegebenheiten ist die Anwendung von Dichtwänden nicht möglich. Im Unterschied zu einer Veränderung der Stauhaltung ist die Auslaufwasserbehandlung eine echte Behandlung des Wassers. Die Absenkung des Wasserspiegels im Bergbaufolgesee stellt lediglich eine Umverteilung der einzelnen Stoffströme dar. Die Auslaufwasserbehandlung in

Form einer naturräumlichen Wasserbehandlung befindet sich noch im Entwicklungsstadium. Die technische Umsetzbarkeit ist damit noch nicht abschätzbar. Die wirtschaftlichen Faktoren sind vergleichbar mit den Kosten der veränderten Stauhaltung (Anlage 7.2).

Sowohl die Anwendung von Dichwänden als auch die Schutzinfiltration sind fortgeschrittene technische Maßnahmen im aktiven Braunkohlenbergbau zur Verringerung des Absenkungstrichters und können auch zur Verringerung des Stoffaustrages aus der Kippe angewandt werden. Die Wasserhebung mit externer Wasserbehandlung sowie die Untergrundwasserbehandlung sind hinsichtlich der Wirkfaktoren vergleichbar mit denen der Schutzinfiltration. Bei der Bewertung der wirtschaftlichen Faktoren ist festzustellen, dass mit Ausnahme von Dichtwänden alle Maßnahmen relativ hohe Betriebskosten aufweisen (Anlage 7.2). Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der lang andauernden Stoffausträge aus den Abraumkippen zu beachten.

Die Maßnahmen zur Verringerung des Austrages aus Außenhalden entsprechen weitestgehend den Maßnahmen der Innenkippen. Die Maßnahmen können in Analogie des oben stehenden Abschnittes bewertet werden. Die einzige Ausnahme stellt die hydraulische Barriere dar, die auf Grund der ungesättigten Verhältnisse im Bereich von Außenhalden nicht anwendbar ist.

7.3.6 Verringerung der Stoffausbreitung (Kategorie C im Sanierungsbergbau)

Gemäß <u>Abschnitt 2.3</u> sind als Transportpfade für die Produkte der Pyritverwitterung die ungesättigte Bodenzone, die gewachsenen Grundwasserleiter, Standgewässer und Fließgewässer zu betrachten (<u>Tabelle 36</u>). Die Zusammenhänge zwischen Quellen, Transportpfaden und Schutzgütern können vielfältig sein. Der Transportpfad kann häufig schon den Charakter eines Schutzgutes tragen.

Tabelle 36: Nachsorgende Maßnahmen zur Verringerung der Stoffausbreitung auf dem Transportpfad (Kategorie C im Sanierungsbergbau)

Transport- pfad Wirk- prinzip	Ungesättigte Bodenzone	Grund- wasser- leiter	Stand- gewässer	Fließ- gewässer
1) bau- technisch				
2) boden- mechanisch				
3) kultur- technisch				
4) hydraulisch		[10] Dichtwand zur Trennung der Grundwasserströme nach Beschaffenheit [11] Hydraulische Barriere zur Trennung der Grundwasserströme	[5] Spülungs- flutung zur Verdünnung	[1] Wasser- management im Flussgebiet
5) hydraulisch- chemisch		[12] Wasser- hebung und externe Wasser- behandlung in technischen Anlagen	[6] Wasser- haltung und externe Wasser- behandlung in technischen Anlagen	[2] Wasser- fassung und externe Wasser- behandlung in technischen Anlagen
6) chemisch und/oder biologisch		[13] Untergrund- wasser- behandlung	[7] In-lake- Wasser- behandlung	[3] Naturräum- liche Wasser- behandlung (Flusskläranlage)

Bewertung

Der Stoffaustrag aus der Innenkippe erfolgt zumeist über den Transportpfad Grundwasserleiter. Zur Verringerung der Stoffausbreitung über den Grundwasserpfad sind die gleichen Maßnahmen denkbar, die zur Verringerung des Stoffaustrages aus der Innenkippe angeführt wurden (vgl. <u>Abschnitt 7.3.5</u> und <u>Anlage 7.3</u>).

Maßnahmen zur Verringerung der Stoffausbreitung innerhalb von Standgewässern entsprechen den Maßnahmen zur Quellbehandlung in Bergbaufolgeseen. Die Bewertung der Maßnahmen erfolgte bereits in <u>Abschnitt 7.3.4</u> und ist in der <u>Anlage 7.3</u> tabellarisch zusammengestellt.

Das Wassermanagement und die Wasserfassung mit externer Wasserbehandlung sind Maßnahmen auf dem Stand der Technik zur Verringerung der Stoffausbreitung auf dem Transportpfad Fließgewässer. Die Wasserfassung und externe Wasserbehandlung ist durch höhere wirtschaftliche Aufwendungen gegenüber dem Wassermanagment im Flussgebiet gekennzeichnet. Die naturräumliche Wasserbehandlung (z. B. Flusskläranlage) bietet als chemische Behandlung eine kostengünstigere Alternative zur Wasserfassung und Behandlung in externen Anlagen. Diese Maßnahme befindet sich derzeit jedoch noch in der Entwicklung. Die technische Umsetzbarkeit und Genehmigungsfähigkeit ist daher noch nicht abschätzbar (siehe Anlage 7.3).



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle - Abschlussbericht

7.3.7 Verringerung des Stoffeintrages in das Schutzgut (Kategorie D im Sanierungsbergbau)

Gemäß dem <u>Abschnitt 2.3</u> sind als Schutzgüter Standgewässer, Fließgewässer, gewachsene Grundwasserleiter, der Boden und Bauwerke zu betrachten. Als Maßnahmen an der Barriere zum Schutzgut, d. h. beim Übergang vom Transportpfad zum Schutzgut lassen sich folgende definieren (<u>Tabelle 37</u>):

Tabelle 37: Nachsorgende Maßnahmen zur Verringerung des Stoffeintrages in die Schutzgüter (Kategorie D im Sanierungsbergbau)

Schutz- gut Wirk- prinzip	Seen/ Talsperren	Fließ- gewässer	Grund- wasser- leiter	Boden	Bauwerke
1) bau- technisch					[18] Material- wahl und Oberflächen- vergütung
2) boden- mechanisch					[19] Baugrund- verdichtung, Verpressen
3) kultur- technisch				[16] Melioration (Dränage, Kalkung)	
4) hydraulisch		derte Stauhaltung m Standgewässe			[20] lokale Wasser- haltung
	[10] Dicht- wand		[10] Dicht- wand		
	[11] Hydrau- lische Barriere (Schutz- infiltration)		[11] Hydrau- lische Barriere (Schutz- infiltration)		
5) hydraulisch- chemisch	[12] Abfangen des Grundwasserzustroms und externe Wasserbehandlung				
6) chemisch und/oder biologisch	[13] Unter- grundwasser- behandlung	[3] Flussbett- auskleidung mit reaktiven Stoffen	[13] Untergrundwasserbehandlung		[17] Chemischer Schleier (mit alkalischen Stoffen)

Bewertung

Eine Gefährdung des Schutzgutes Standgewässer erfolgt im Wesentlichen über den Transportpfad des Grundwasserleiters. Maßnahmen zur Verringerung des Stoffeintrages entsprechen daher hauptsächlich den Maßnahmen zur Verhinderung der Stoffausbreitung mit dem Grundwasserpfad. Der größte Forschungsbedarf besteht für die Maßnahme Untergrundwasserbehandlung. Die technische Umsetzbarkeit und Genehmigungsfähigkeit sind für diese Maßnahme bisher nicht abschätzbar. Die übrigen Maßnahmen zur Verringerung des Stoffeintrages sind technisch machbar und die Genehmigung zumindest unter Auflagen erreichbar. Der Großteil der Maßnahmen ist voraussichtlich über einen langen Zeitraum von mehr als 30 Jahren notwendig, wodurch über den gesamten Zeitraum der Anwendung Betriebskosten anfallen. Eine sehr kurze Anwendung der Maßnahme bei einer gleichzeitig sehr langen Wirkungsdauer bietet die Installation einer Dichtwand, sofern günstige geologische Bedingungen vorliegen (Anlage 7.4).

Die denkbaren Maßnahmen zur Verringerung des Stoffeintrages in das Schutzgut Fließgewässer sind hinsichtlich der Wirkfaktoren ähnlich zu bewerten. Für die Maßnahme Abfangen des Grundwasserstromes und externe Behandlung fallen die höchsten wirtschaftlichen Aufwendungen an. Die Flussbettauskleidung ist gemäß einer naturräumlichen Wasserbehandlung in Fließgewässern zu bewerten und befindet sich derzeit noch im Entwicklungsstadium (Anlage 7.4).

Die Maßnahmen zum Schutz des Stoffeintrages in den Grundwasserleiter sind analog denen zum Schutz des Stoffeintrages in Standgewässer, da eine Gefährdung des Grundwasserleiters im Wesentlichen von angrenzende Innenkippen oder von Bergbaufolgeseen ausgeht. Die Bewertung der möglichen Maßnahmen erfolgte bereits oben.

Das Schutzgut Boden ist im Wesentlichen durch Stoffeinträge aus Außenhalden gefährdet. Bodenverbessernde Maßnahmen sind Stand der Technik zur Verringerung der Stoffeinträge.

Bauwerke werden im Sanierungsbergbau zumeist vor generellem Grundwasserwiederanstieg geschützt. Die Wasserbeschaffenheit spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Zum Schutz der Bausubstanz werden überwiegend technische Maßnahmen angewandt. Die Wirkung auf die Verringerung der Versauerung ist lediglich gering. Die Infiltration von alkalischen Stoffen zum Schutz der Bausubstanz ist bisher noch nicht untersucht und die technischen Bewertungskriterien derzeit nicht abschätzbar (Anlage 7.4).

7.3.8 Behandlung des betroffenen Schutzgutes (Kategorie E im Sanierungsbergbau)

Als Maßnahmen zur Behandlung des Schutzgutes selbst kommen folgende in Betracht (Tabelle 38):

Tabelle 38: Nachsorgende Maßnahmen zur Behandlung des betroffenen Schutzgutes (Kategorie E im Sanierungsbergbau)

Schutz- gut	Seen/ Talsperren	Fließ- gewässer	Grund- wasser-	Boden	Bau- werke
Wirk- prinzip			leiter		
1) bau- technisch			[14] Ersatz- maßnahme		[19] Verpressen, Weiße Wanne [21] Keller- verfüllung, Anhebung der Bodenplatte [22] Ersatz- neubau
2) boden- mechanisch					
3) kultur- technisch				[16] Melioration (Dränage, Kalkung)	
4) hydraulisch	[1] Wasserman Flussgebiet	agement im			[20] Lokale Wasser- haltung
5) hydraulisch- chemisch		[3] Natur- räumliche Wasser- behandlung (Flussklär- anlage)	[12] Wasser- hebung und externe Wasser- behandlung		
6) chemisch und/oder biologisch	[7] In-lake- Wasser- behandlung		[13] Untergrundwasserbehandlung		

Bewertung

Zur Behandlung des Schutzgutes Grundwasserleiter besteht zusätzlich zu den bereits bewerteten chemischen Maßnahmen die Möglichkeit bautechnische Maßnahmen durchzuführen. Dazu gehört beispielsweise der Bau einer neuen Wasserfassung (z. B. für die Trinkwassergewinnung). Dazu können tiefere vom Bergbau unbeeinflusste Grundwasserleiter genutzt werden. Im Unterschied zu den

chemischen Maßnahmen erfolgt hierbei keine direkte Behandlung der Versauerung. Hinsichtlich der Maßnahmendauer und der Wirtschaftlichkeit sind Ersatzmaßnahmen günstiger zu bewerten als die chemischen Maßnahmen (Anlage 7.5).

Zum Schutz von Bauwerken vor saurem Grundwasser sind insbesondere bautechnische Maßnahmen denkbar. Die Maßnahmen werden im Wesentlichen innen oder außen an Bauwerken durchgeführt und auch zum Schutz von Bauwerken vor wieder ansteigendem Grundwasser (unabhängig von der Wasserbeschaffenheit) bereits häufig praktiziert. Die Bewertung der Eignung von Maßnahmen zum Schutz des Baugrundes ist in der Anlage 7.5 zusammengestellt. Alle bautechnischen Maßnahmen zeigen keine Wirkung auf die Versauerung, sind Stand der Technik und sind weitestgehend technisch umsetzbar. Je nach Art der lokalen Wasserhaltung (Brunnen oder Sickerschlitze) fallen bei dieser Maßnahme geringe bis mittlere Betriebskosten an. Für alle anderen bautechnischen Maßnahmen fallen lediglich Investitionskosten an.



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle - Abschlussbericht

8 Stand der Technik und Ausblick

8.1 International

Zu den größten Braunkohlenförderländern zählen neben Deutschland die Volksrepublik China, die Russische Föderation, die Türkei, die USA, Australien, Polen und Griechenland (Bild 59, [Stoll u. a. 2009]). Geeignete praxiserprobte Maßnahmen zur Verhinderung der Pyritverwitterung und Versauerung im Braunkohlenbergbau konnten international nicht recherchiert werden. Die Ursachen hierfür sind sehr unterschiedlich und meist auch länderspezifisch. Hervorzuheben sind die spezifischen geologischen Lagerstättenbedingungen in den einzelnen Fördergebieten, die maßgebend das technische Niveau bestimmen. In Abbaugebieten, in denen das Grundwasser keine oder nur eine geringe Rolle spielt, ist auch das Versauerungsproblem nicht in der Größenordnung präsent, wie im Lausitzer Braunkohlenrevier.

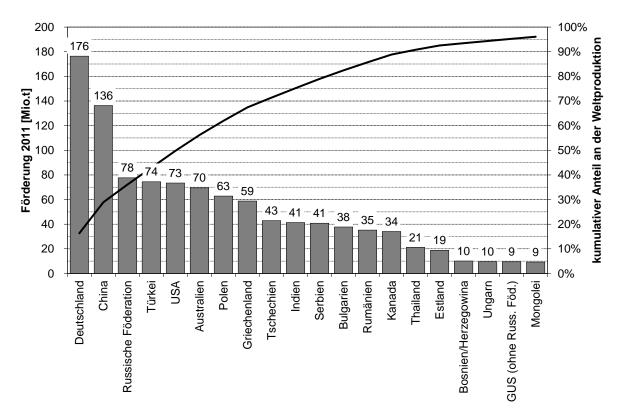


Bild 59: Braunkohlenförderung im Jahr 2011 weltweit, Quelle: DEBRIV 2013

Zur gleichen geochemischen Problematik findet sich umfangreiches Schrifttum für den Erzbergbau. Eine aktuelle zusammenfassende Arbeit zu dieser Thematik ist mit dem Band 3 der Schriftenreihe "Management Technologies for Metal Mining Influencend Water" von der SME Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc. mit Sitz in Littelton (Colorado, USA) erschienen [SME 2009]. Durch eine freiwillig organisierte Arbeitsgruppe im Rahmen einer Acid-Drainage-Technology-Initiative mit Vertretern aus bundesstaatlichen und einzelstaatlichen Behörden der USA, Akademikern, Mitarbeitern von Bergbauunternehmen, Consultingfirmen und weiteren interessierten Gruppen wurden sechs Handbücher zusammengestellt, von denen bislang die ersten drei Bände erschienen sind.

Der Band 3 [SME 2009] dieser Reihe befasst sich speziell mit Minderungsansätzen für Wässer im Erzbergbau. Die Autoren vermeiden im Titel bewusst den Begriff der Versauerung, weil dieser nur einen Teil der möglichen Einflüsse auf die Wasserbeschaffenheit darstellt. Die Lösungsansätze wurden in drei Kategorien gefasst:

- A Planung und konstruktive Gestaltung
- B Kontrolle der Quellen und des Stoffaustrags
- C Wasserbehandlung

In die <u>Kategorie A</u> fallen Aspekte, wie die Rückverfüllung des besonders reaktiven Bergematerials in die Tief- und Tagebaue, was im Braunkohlenbergbau mit der Innenverkippung sein Pendant findet. Hierzu gehört auch die Mitverkippung von Aufbereitungsrückständen mit Bergematerial als Präventionsstrategie. Auch die selektive Verkippung von besonders pyrithaltigem bzw. gepuffertem Material, einschließlich einer gezielten Vermischung der geochemisch differenzierten Materialien wird thematisiert. In die Kategorie A fällt des Weiteren die Abschlussgestaltung von Bergehalden. Alle genannten Aspekte werden in den einzelnen Fördergebieten des deutschen Braunkohlenbergbaus gebührend berücksichtigt.

Die <u>Kategorie B</u> wird in [SME 2009] dreigegliedert: in Maßnahmen zur Verhinderung des Wasserzutritts zu den Bergehalden, Maßnahmen des Luftabschlusses und Maßnahmen zur Modifikation des Pyrits. Der Wasserzutritt zu sulfidhaltigem Abraum kann durch Abdeckung, Abdichtung und Verdichtung verhindert bzw. verringert werden, aber auch durch sehr standortspezifische und eher exotische Maßnahmen, wie z. B. das Einfrosten, das aber nur in Permafrostgebieten funktioniert.

Der Luftzutritt kann durch subhydrische Ablagerung von Aufbereitungsrückständen sehr effektiv verhindert werden. Diese Methode kommt für den Braunkohlenbergbau nicht in Betracht. Der Grundwasserwiederanstieg in den Kippen hat die gleichen hydrochemischen Wirkungen wie eine subhydrische Ablagerung, nur das er aufgrund der geotechnischen Bedingungen in den Kippen des Braunkohlenbergbaus nur sehr verzögert zugelassen werden kann. Auch unterschiedliche Abdecksysteme verhindern in Doppelfunktion neben dem Wasserzutritt zugleich auch den Luftzutritt. Das Überziehen der Direktversturzkippen im Braunkohlentagebau mit pyritfreien bzw. pyritarmen Absetzerkippen wird diesem Prinzip gerecht, indem die Diffusionswege des atmosphärischen Sauerstoffs verlängert werden. Auch die Zugabe sauerstoffzehrender Substrate wird in diese Kategorie eingeordnet.

Die Pyritverwitterung kann durch physikalische, chemische oder mikrobiologische Manipulation verhindert bzw. eingedämmt werden. Eine grundsätzliche Methode zur Erhöhung des Neutralisationspotentials ist die Zumischung von alkalischen Stoffen in Form natürlicher Substrate (Kalkstein, Dolomit), industrieller Produkte (Kalk, Natronlauge, Soda u. a.) oder geeigneter Abprodukte (alkalisches Bergematerial oder alkalische Aufbereitungsrückstände, alkalische Schlämme, Kraftwerksaschen und weitere). Ausführlich wird in [SME 2009] auf die Durchmischungsprobleme im realen Betrieb eingegangen und an Fallbeispielen thematisiert. Die Dosierung sauerstoffzehrender Stoffe, die ein anaerobes Milieu erzeugen sollen, wird ebenfalls unter dieser Kategorie gezählt. Eine Umsetzung dieses speziellen Verfahrens im realen

Bergbaubetrieb wird nicht aufgeführt. Anhand einer einzigen Literaturquelle werden in [SME 2009] Einmischungsprobleme thematisiert.

Der Einsatz von Bakteriziden zur Minderung der Aktivität acidophiler sulfatoxidierender Bakterien wird als präventive Maßnahme auf frisches Bergematerial beschränkt. Die meisten Bakterizide scheiden aufgrund ihrer Umwelteigenschaften für eine Anwendung im (Braunkohlen-)Bergbau aus. Als erfolgreich und umweltverträglich haben sich heterozyklische Merkaptane erwiesen. Der Effekt dieser Bakterizide auf die Mikrobiologie ist jedoch immer nur temporär. Die Anwendung von Bakteriziden erfordert eine zyklische Wiederholung des Einsatzes.

Mit Phosphaten und Silikaten können die Oberflächen von Sulfidmineralen durch schwerlösliche Eisen(III)verbindungen blockiert werden. Die Methode setzt einen gewissen Verwitterungsgrad der Minerale und ein aerobes Milieu voraus. Zur chemischen Einkapselung von Sulfidmineralen werden am Markt sogar spezielle Lösungen angeboten, die drei chemische Reagenzien enthalten: ein leichtlösliches Phosphat oder Silikat, ein starkes Oxidationsmittel (z. B. Wasserstoffperoxid oder Calciumhypochlorit) zum "Anlösen" der Sulfidminerale und einen organischen Puffer (z. B. Natriumacetat) zur Stabilisierung des pH-Wertes. Außer zahlreichen Laborund Feldtests wird keine großtechnische Anwendung für die chemische Einkapselung von Pyrit genannt. Weitere Forschungsansätze wurden zur Erzeugung organischer Überzüge (z. B. Latex) über die Sulfidminerale und von Biofilmen auf den Sulfidmineralen verfolgt.

Die Maßnahmen der <u>Kategorie C</u> zur Wasserbehandlung werden als aktive, passive und semipassive Verfahren unterschieden. Die aktive Wasserbehandlung schließt die ganze Palette der Verfahrenstechnologien in der Wasseraufbereitung ein. Dazu gehören die im Braunkohlenbergbau praktizierten Verfahren der Belüftung, chemischen Oxidation, Neutralisation und Flockung in den Grubenwasserreinigungsanlagen, des Weiteren das gesamte Spektrum der Filtrationsverfahren, Membranverfahren, elektrochemische Verfahren u.s.w. Die passive Wasserbehandlung schließt aerobe horizontal durchflossene Feuchtgebiete, anaerobe vertikal durchflossene Feuchtgebiete, anaerobe Kalksteindräns, reaktive Wände und weitere ein. Als semipassive Verfahren werden Verfahren definiert, wie zum Beispiel eine Einmaldosierung von alkalischen Stoffen in ein saures Wasser ohne spezielle Nachbehandlungen, wie z. B. ein Schlammmanagement. Den semipassiven Verfahren wären u. a. die In-lake-Verfahren in den Bergbaufolgeseen des Lausitzer und Mitteldeutschen Sanierungsbergbaus zuzuordnen.

Wenn die zusammenfassende Arbeit [SME 2009] den Stand der Technik und Wissenschaft zur Behandlung von Bergbauwässern im nordamerikanischen Erzbergbau wiederspiegelt, kann folgende Einschätzung getroffen werden. Grundsätzlich werden von den Forschern und Praktikern die gleichen naturwissenschaftlichen Ansätze verfolgt wie im deutschen Braunkohlenbergbau. Die Systematisierung der Verfahren und ihre weitere Untergliederung sind abweichend zu der in Kapitel 7. Es werden Verfahren besprochen, die von den Dimensionen des Erzbergbaus ausgehen und nicht unkritisch auf die Dimensionen des deutschen Braunkohlenbergbaus übertragen werden können. Wichtig ist des Weiteren die Feststellung, dass sich viele der thematisierten Verfahren auch hier auf dem Entwicklungsstand der Forschung oder Pilotierung befinden.

8.2 National

8.2.1 Lausitzer Revier

Entsprechend den konkreten geologischen und hydrogeologischen Lagerstättenverhältnissen haben im Lausitzer Braunkohlenrevier der Bau von Dichtwänden und Grubenwasserbehandlungsanlagen (GWBA) einen fortgeschrittenen Entwicklungsstand erreicht. Der Lausitzer Braunkohlenbergbau ist in diesen Sparten technologieführend in Deutschland und auch im weltweiten Vergleich.

Durch den Einsatz der Abraumförderbrückentechnologie sind die Expositionszeiten der Baggerböschungen und der Kippenböschungen in den Lausitzer Braunkohlentagebauen bereits vergleichsweise kurz und die Expositionsfläche vergleichsweise klein (siehe Kapitel 5.1.1). Für eine weitere Verkürzung der Expositionszeiten und Verringerung der Expositionsflächen werden keine relevanten technologischen Reserven gesehen. Begrenzte technologische Reserven zur Minimierung von Expositionsflächen und -zeiten bestehen in der zeitnahen Verfüllung von Randschläuchen und einer Verkürzung des Zeitraumes, in dem die Direktversturzkippe mit der aus weitestgehend pyritfreiem Material bestehenden Absetzerkippe überzogen wird.

Das Ziel einer weiteren Forcierung der zeitnahen Verfüllung wird heute in den Braun-kohlentagebauen der Vattenfall Europe Mining AG kaum noch verfolgt. Die aus der Historie aufgelaufenen Defizite bei der Randschlauchverkippung wurden in den zurückliegenden zwei Jahrzehnten weitgehend aufgearbeitet. Zudem wird der Anteil der Randschläuche auf den Gesamtumsatz der Pyritverwitterung in den Tagebauen nur auf wenige Prozent geschätzt, siehe z. B. [BTU 1998] und [Berger 2000]. Die zeitnahe Abdeckung der pyritreicheren Direktversturzkippe mit einer pyritarmen bzw. pyritfreien Absetzerkippe ist im hohen Maße von der Materialverfügbarkeit abhängig. Die technologischen Reserven dieser Maßnahme wären von Seiten des Bergbaubetreibers tagebauspezifisch auszuloten.

Die Braunkohlenlagerstätten im Lausitzer Revier werden mit Schaufelradbaggern im Vorschnitt und einem Eimerkettenbagger-Abraumförderbrücken-Verbund im Hauptschnitt erschlossen. Die Selektivität der Materialgewinnung und -verstürzung beschränkt sich auf diese zwei maßgebenden Abbauprozesse. Das geochemisch beste Ergebnis wird erzielt, indem die pyritarmen pleistozänen und tertiären Sedimente wieder in die obere Kippscheibe (Absetzerkippe) eingebaut werden. Die Absetzerkippen werden entsprechend der Materialverfügbarkeit bevorzugt aus solchen Sedimenten geschüttet. Mit einer derart praktizierten Absetzerschüttung erfolgt im Lausitzer Revier praktisch eine selektive Verkippung im Rahmen der technologischen Möglichkeiten eines Förderbrückentagebaus (Kapitel 7.2.1.3).

Zur Verringerung der Reichweite des Absenkungstrichters infolge der Sümpfungsmaßnahmen werden im Lausitzer Braunkohlenrevier zunehmend **Dichtwände** eingesetzt [VEM 2008], [Arnold & Fisch 2013]. Bisher wurden in den Tagebauen Jänschwalde und Cottbus-Nord zwei Dichtwände mit jeweils 11 bzw. 7 Kilometer Länge und Teufen von 70 bis 85 Meter fertig gestellt. Zurzeit werden an der Süd- und

Ostmarkscheide des Tagebaus Reichwalde sowie an der Südmarkscheide des Tagebaues Welzow-Süd zwei weitere Dichtwände gebaut (<u>Tabelle 31</u>). Während die geplante 11 Kilometer lange Dichtwand in Reichwalde Teufen zwischen anfangs 37 Meter und später bis zu 80 Meter aufweist, wird die Dichtwand Welzow auf ihrer gesamten Länge von ebenfalls rund 11 Kilometer bis in eine Teufe von 100 bis maximal 110 Meter Teufe errichtet. Diese Teufen in Verbindung mit der Länge stellen weltweit eine Spitzenleistung dar. Die Dichtwand verhindert die Ausdehnung der tagebaubedingten Grundwasserabsenkung auf die außerhalb des Abbaufeldes liegenden Gebiete, verhindert damit die Belüftung der pleistozänen und tertiären Grundwasserleiter und die Pyritverwitterung mit ihren bekannten Folgen für die Grundwasserbeschaffenheit. Die Dichtwand wird nach Abschluss des Grundwasserwiederanstiegs die Ausbreitung von Kippenwasser in die natürlichen Grundwasserreservoire verhindern.

Die zum Dichtwandbau eingesetzte Schlitzfrästechnik ist für große Tiefen ausgelegt und wurde speziell für den Einsatz im Braunkohlenbergbau entwickelt (<u>Bild 60</u> und <u>Bild 61</u>). Sie entspricht der derzeit besten verfügbaren Technik (BVT). Die Entwicklung des Schlitzfräsverfahrens in der ostdeutschen Braunkohlenindustrie geht auf die 1970er Jahren zurück. Sie wurde nach Testläufen erstmalig ab dem Jahr 1978 zum Bau der Dichtwand im Tagebau Jänschwalde eingesetzt. Die Herstellung des nur einen Meter breiten Erdschlitzes erfolgt kontinuierlich durch ein Schneidewerkzeug an einem senkrecht in der Erde eingebauten Pfahl. Der Pfahl ist innen hohl. Der Aushub wird mit Druckluftunterstützung im Pfahl zutage gefördert. Durch den Einsatz von Stützflüssigkeiten auf der Basis natürlicher Tone und ggf. weiterer Spülungszusätze zur Stabilisation der Filterkruste wird unter Ausnutzung des Kolmationseffektes eine durchgehende Abdichtung zum gewachsenen Gebirge erzielt. Die Technologie hat sich hinsichtlich der beabsichtigten geohydraulischen Wirkungen bisher als sehr zuverlässig und nachhaltig erwiesen.

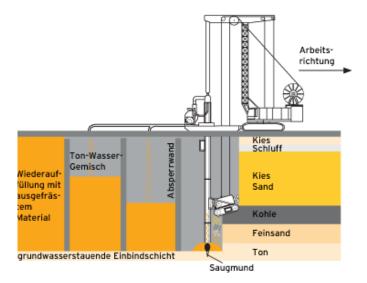


Bild 60: Prinzipschema des Baus einer Dichtwand im Lausitzer Braunkohlenrevier im Schlitzfräsverfahren [VEM 2008] und [Arnold & Fisch 2013]

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle - Abschlussbericht



Bild 61: Dichtwandfräse im Tagebau Welzow-Süd (Foto: Hartmut Rauhut)

Eine weitere Dichtwand wird derzeit für die Nordwestmarkscheide der geplanten Inanspruchnahme des Abbaufeldes 2 des Tagebaus Nochten geplant und vorbereitet. Hierzu wird mit einem renommierten Hersteller von Bergbaumaschinen eine neue Gerätegeneration entwickelt, mit der man unter Beibehaltung der Schlitzfrästechnik die Dichtwand auf 50 % der geplanten 8 km langen Dichtwand bis in Teufen von 150 Meter errichten kann. Damit soll die Grundwasserabsenkung nach Westen und Norden in Richtung der Zentrallausitzer und Grausteiner Rinnen einschließlich eines dort grundwasserfördernden kommunalen Wasserwerkes wirksam begrenzt werden. Diese Maßnahme gehört ebenfalls zum Komplex B (Minderung der Quellenausdehnung). Mit der Inanspruchnahme des Abbaufeldes 2 im Tagebau Nochten wird zugleich ein Flügel der in den 1960er Jahren abgelagerten Außenhalde (Aufschlusshalde) Nochten abgebaggert und im Tagebau verkippt. Damit wird eine derzeit aktive lokale Quelle der Grundwasserbelastung dauerhaft beseitigt. Diese Maßnahme ergibt sich aus dem Tagebaufortschritt bei Aufschluss und Abbau des Abbaufeldes 2 und gehört aufgrund des hohen Aufwandes nicht zum Methodeninventar des typisierten Maßnahmenkatalogs im Kapitel 7.

Das Sümpfungswasser aus der Tagebauentwässerung der Lausitzer Braunkohlentagebaue wird in **Grubenwasserbehandlungsanlagen** (GWBA) aufbereitet. Auf der Kippe des Tagebaus Nochten ist seit 2005 die GWBA Tzschelln mit einer nominellen Kapazität von 1,0 m³/s in Betrieb (<u>Bild 62</u>). Die GWBA Kringelsdorf wurde im Jahr 2011 grundlegend saniert. Sie hat eine Kapazität von 3,0 m³/s. Zwei weitere Grubenwasserbehandlungsanlagen befinden sich im Industriepark Schwarze Pumpe und am Kraftwerksstandort Jänschwalde mit jeweils einer Kapazität von 5,5 m³/s.

Das Sümpfungswasser wird unter Zugabe eines Neutralisationsmittels (üblicherweise Calciumhydroxid in Trockendosierung oder Branntkalk als Kalkmilch) neutralisiert und zusätzlich mit Sauerstoff belüftet. Durch den Einsatz organischer polymerer Flockungshilfsmittel wird die Ausfällung der Eisenhydroxide beschleunigt. Die anfallenden Eisenhydroxidschlämme werden entweder in Bergbaufolgeseen (GWBA Schwarze Pumpe → Bergbaufolgesee Spreetal-Nordost), in Restkonturen der Braunkohlentagebaue (GWBA Tzschelln → Tagebau Nochten) oder in spezielle Schlamm-

stapelbecken (GWBA Kringelsdorf → Schlammstapelbecken Kringelsdorf, GWBA Jänschwalde → Südbecken) verspült. Eine Besonderheit im Lausitzer Revier stellt die wirtschaftliche Nutzung des Eisenhydroxidschlammes aus der GWBA Tzschelln dar. Ein chemischer Betrieb bereitet aus diesem Schlamm ein granuliertes Produkt, welches zur Reinigung von Wässern sowie zur Reinigung von Abgasen aus Biogasanlagen eingesetzt wird. Das behandelte Sümpfungswasser wird anteilig in den Braunkohlenkraftwerken Boxberg, Schwarze Pumpe und Jänschwalde mit einem Versorgungsanteil von nahezu 100 % als Brauch- und Kühlwasser verwendet, in die regionale Vorflut (GWBA Kringelsdorf → Weißer Schöps, GWBA Tzschelln → Spree, GWBA Schwarze Pumpe → Spree, GWBA Jänschwalde → Malxe) eingeleitet oder auch als Stützungswasser für die von der Grundwasserabsenkung betroffenen Fließgewässer und Feuchtgebiete verwendet [VEM 2008].

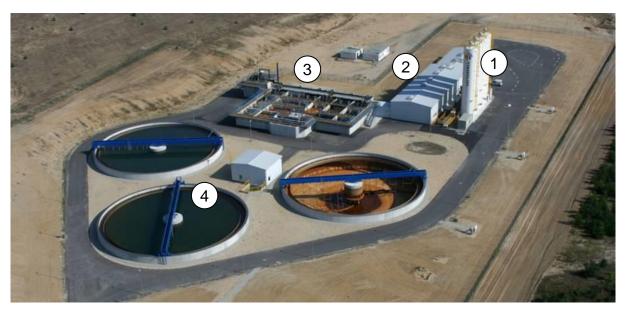


Bild 62: Grubenwasserbehandlungsanlage Tzschelln aus der Vogelperspektive mit (1) Kalksilos, (2) Betriebsgebäude, (3) Misch- und Dosierstrecken sowie (4) Rundbecken (Foto: Hartmut Rauhut)

Die Nutzung des behandelten Sümpfungswassers ist zwischen dem Bergbauunternehmen, örtlichen Bedarfsträgern und den Wasserbehörden der Bundesländer Sachsen, Brandenburg und Berlin weitgehend ausbilanziert. Das behandelte Sümpfungswasser trägt zur Stabilisierung des regionalen Wasserhaushaltes in den Einzugsgebieten der Spree und der Schwarzen Elster bei. Durch die Einleitungen des behandelten Sümpfungswasser aus dem Braunkohlenbergbau hat sich in den vergleichsweise dargebotsarmen Einzugsgebieten der Spree und der Schwarzen Elster bereits seit Jahrzehnten eine relativ ausgeglichene Dargebotssituation ohne extreme Niedrigwassersituationen entwickelt. Die Verteilung und Nutzung des Wassers erfolgt zeitnah mit speziellen numerischen Steuermodellen für die Wassermengenbewirtschaftung (siehe Kapitel 8.2.4).

Durch die Wasserbehandlung werden die Säuren aus der Pyritverwitterung vollständig neutralisiert und die Metalle nahezu vollständig abgeschieden. Zur Minderung der hohen Sulfatkonzentration ist für die hohen Volumenströme des Braunkohlenbergbaus derzeit noch kein wirtschaftliches Wasserbehandlungsverfahren verfügbar. Verfahrenstechnische Ansätze dafür gibt es zahlreiche (vgl. Kapitel 7.2.3).

Die Minderung der aus den hohen Sulfatkonzentrationen resultierenden Belastungen in den Fließgewässern erfolgt derzeit durch Mischung auf der Basis von **Steuermodellen für die Sulfatlast** (Kapitel 8.2.4).

Häufig wird die Frage nach der Übertragbarkeit von Technologien aus anderen deutschen Braunkohlenrevieren auf das Lausitzer Braunkohlenrevier aufgeworfen. Das betrifft vor allem die im Tagebau Garzweiler praktizierte **Kippenkalkung** (siehe dazu Kapitel 8.2.3), deren chemische Effekte vorteilhaft für die Genese des Kippenwassers sind. Wesentlich für die Entscheidung zum Einsatz einer Kippenkalkung sind die technologischen Unterschiede zwischen den Braunkohlentagebauen mit reinem Absetzer- bzw. Förderbrückenbetrieb sowie das konkrete Schutzerfordernis. Beurteilt werden müssen aus technologischer Sicht vor allem die Möglichkeiten:

- zur selektiven Gewinnung und Verkippung des Abraumes,
- der technischen Ausrüstbarkeit und

der Braunkohle - Abschlussbericht

der bedarfsgerechten Dosierung.

Die Selektivität der Abraumgewinnung und –verkippung ist in einem Tagebau mit mehreren Prozesslinien eines Schaufelradbagger-Bandanlage-Absetzer-Verbandes vergleichsweise hoch. Hier können kleinste Blöcke im Bereich von etwa 1.000 m³ geochemisch und technologisch differenziert werden (Bild 63 links). Mit einer Technologie im Eimerkettenbagger-Förderbrücken-Verband ist eine räumlich feingegliederte technologische Differenzierung des Abraums nach Herkunftshorizonten dagegen nicht möglich. Im Förderbrückenbetrieb ist nur eine geringe Selektivität der Materialgewinnung im gesamten Bereich des Hauptschnittes, in dem die wesentlichen pyrithaltigen tertiären Horizonte liegen, erreichbar (Bild 63 rechts). Der mit einem Förderbrückenverband erfassbare kleinste selektierbare Block liegt hier in der Größenordnung von 10.000 bis 100.000 m³. Das größere Problem ist dabei nicht die Steuerbarkeit der Blocktiefe oder des Strossenabschnittes, sondern die praktische Unmöglichkeit, den Abraum im vertikalen Profil zu differenzieren. Die relevanten geochemischen Gradienten bestehen aber im vertikalen Profil.

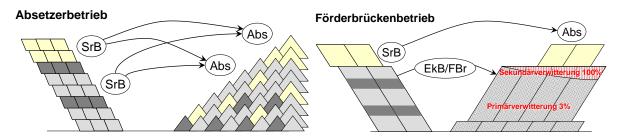


Bild 63: Unterschiede der Materialselektion beim Abbau und bei der Verkippung in Braunkohlentagebauen mit Schaufelradbagger-Absetzer-Technologie (links) sowie mit Eimerkettenbagger-Förderbrücken-Technologie (rechts)

Eine dem Absetzerbetrieb im Rheinischen Braunkohlenrevier vergleichbare Nachrüstung der Bandanlagen mit Kalksilos und Dosierstationen scheitert im Lausitzer Braunkohlenrevier bisher technisch daran, dass die Förderbänder im Hauptschnitt ausschließlich über die 60 Meter hohen Förderbrücken verlaufen und nicht auf festem Untergrund stehen und die Förderbänder mit der Förderbrücke ständig ihre räumliche Position verändern. Der Vorschnitt wird hier ebenfalls im Schaufel-

radbagger-Band-Absetzerbetrieb verhoben. Die pyrithaltigen tertiären Sedimente befinden sich jedoch hauptsächlich im Hauptschnitt des Tagebaus.

Derzeit bestehen keine praktikablen technologischen Vorstellungen zu einer zeitlich und örtlich bedarfsgerechten Dosierung alkalischer Produkte in eine Abraum-Förderbrücken-Kippe. Die Kalkprodukte müssten neben der vom Pyritgehalt der Horizonte abhängigen Dosierung zudem anteilig höher in die Zone der Sekundärverwitterung eingebaut werden (Bild 63 rechts). Vorbehaltlich ihrer technologischen Durchführbarkeit wäre andererseits eine nichtselektive überschüssige Kalkung der Kippen, die sich an den maximalen Raten der Sekundärverwitterung orientiert - gewissermaßen eine Kalkung auf Vorrat - mit sehr hohen Aufwendungen verbunden.

Zum Einbau alkalischer Stoffe in die Kippen des Lausitzer Braunkohlenbergbaus müssen folglich alternative technologische Lösungen gefunden werden (siehe <u>Abschnitt 8.4</u>). Die Durchführung entsprechender Untersuchungen und Pilotversuche wird hierzu angeraten.

8.2.2 Mitteldeutsches Revier

Die MIBRAG setzt die Erkenntnisse aus den geochemischen Untersuchungen zur Pyritverwitterung in ihren Tagebauen aus [Hoth u. a. 2010] mit speziellen Maßnahmen zur selektiven Gewinnung und Verkippung sowie zur Minimierung der Expositionszeiten und Expositionsflächen pyritreicher Sedimente um.

Im Tagebau Vereinigtes Schleenhain erfolgt eine selektive Verkippung des Abraums in Kombination mit kulturtechnischen Maßnahmen. Die versauerungsempfindlichen Lockergesteine des Grundwasserleiters G3 werden im unteren Bereich der Kippe abgelagert. In den quartären Geschiebemergeln ist natürliches Karbonat enthalten und zumindest im späteren Abbaufeld Peres technologisch gewinnbar. Die Geschiebemergel werden mit einem Anteil von 20 % bis 40 % in die versauerungsempfindlichen Substrate des Grundwasserleiters G2 eingemischt und in die Hochschüttung der oberen Kippe verbracht [MIBRAG 2011]. Der Einbau des versauerungsempfindlichen Materials des Grundwasserleiters G2 in die Hochschüttung der obersten Kippe ist aus geomechanischen Gründen notwendig [Hoth u. a. 2010].

Die Abdeckung der Kippen erfolgt durch eine etwa 3 Meter mächtige Kulturbodenschicht. Die Kulturbodenschicht besteht vorwiegend aus Sedimenten der Saale-Kaltzeit und einer ca. 30 cm mächtigen Mutterbodenschicht. In die Hochschüttung der oberen Kippe werden im Wesentlichen quartäre Sedimente der Elster-Kaltzeit und karbonatreiche tertiäre Sande und Tone verbracht [IWB 2005].

Eine Verringerung der Expositionszeiten wird im Tagebau Vereinigtes Schleenhain durch die Überdeckung bzw. Zwischenbegrünung lang offenstehender Bereiche (z. B. Drehpunktbereiche, temporäre Kippenendpunkte) erreicht [MIBRAG 2011]. Die Verkleinerung der Expositionsflächen erfolgt des Weiteren durch die gezielte Planung der Lage der Arbeitsebenen. Zur Verringerung des räumlichen und zeitlichen Kontaktes der versauerungsempfindlichen Sande der Grundwasserleiter G2 und G3 mit der Atmosphäre wird die Arbeitsebene des 1. Schnittes an die Basis des G2-Komplexes und die Arbeitsebene des 2. Schnittes an die Basis des G3/G4 gelegt [MIBRAG 2011].

Sehr hilfreich ist der MIBRAG ein GPS-gesteuertes Massenverfolgungssystem zur selektiven Gewinnung und Verkippung. Damit können auf der Grundlage eines geochemischen Lagerstättenmodells für das Deckgebirge Ort und Zeit der Gewinnung pyritreicher Sedimente ermittelt und diese Sedimente mittels der verwendeten Bagger-Band-Absetzer-Technologie speziell in tiefe Kippenbereiche verstürzt (Bild 64 bis Bild 66), mit alkalischen Sedimenten vermischt oder zeitnah mit pyritarmen Deckgebirgssedimenten überdeckt werden. Der Kippenaufbau hat das Ziel, für die obere Kippe, die nach Abschluss des Grundwasserwiederanstiegs mit ihrem Grundwasserdargebot direkten Kontakt zu den künftigen Oberflächengewässern haben wird, eine gemischte Verkippung von versauerungsempfindlichen und säurepuffernden Materialien zu erreichen. Die erforderlichen Mischungsverhältnisse wurden durch Laborversuche ermittelt. Sie gelten als Zielvorgabe für die Betriebsführung der selektiven Verkippung.

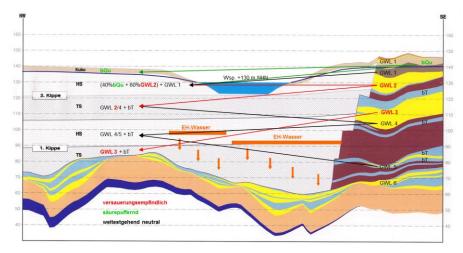


Bild 64: Kennzeichnung der unterschiedlichen Versauerungssensitivitäten und Pufferung der Stratigraphien im Deckgebirges des Tagebaus Vereinigtes Schleenhain und Strategien der Materialverbringung, Quelle: [Jolas 2011]

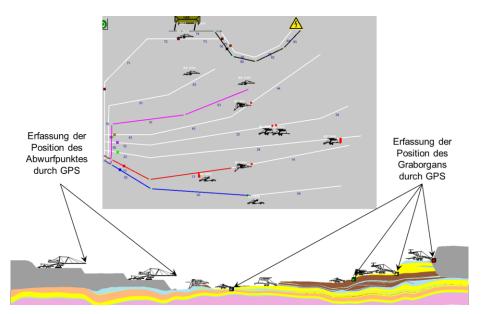


Bild 65: GPS-gesteuertes Massenmanagement im Tagebau Vereinigtes Schleenhain zur selektiven Verkippung der Abraummassen in Abhängigkeit vom Versauerungspotential und der Pufferung, Quelle: [Jolas 2011]

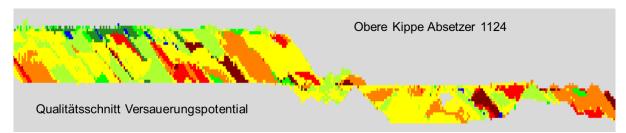


Bild 66: Ergebnisse eines Qualitätsschnittes der Abraumverkippung im Tagebau Vereinigtes Schleenhain, Quelle: [Jolas 2011]

In der Grubenwasserreinigungsanlage Neukieritzsch fallen jährlich rund 300.000 m³ alkalischer Eisenhydroxid-Dünnschlämme an. Sie sind prozessbedingt durch ein hohes Alkalinitätspotential gekennzeichnet. Auf der Basis von chemischen und bodenmechanischen Voruntersuchungen wurde ein genehmigungsfähiges Konzept zur Mitverkippung der Eisenhydroxidschlämme in die untere Kippe des Tagebaus Vereinigtes Schleenhain entwickelt. Seit der Inbetriebnahme der Grubenwasserreinigungsanlage Neukieritzsch im Jahr 2010 wird im Rahmen eines Sonderbetriebsplanes der Eisenhydroxidschlamm als Neutralisationsmittel in die Kippe eingebaut (Bild 64 und Bild 67).



Bild 67: Einleitung von alkalischen Eisenhydroxidschlämmen aus der Grubenwasserreinigungsanlage Neukieritzsch in die Kippe des Tagebaus Vereinigtes Schleenhain, Foto: Hiekel 2012

Die Wirkung dieser Maßnahme kommt erst in der Zukunft zur Entfaltung, wenn der Grundwasserspiegel in der Kippe ansteigt. Dann werden im Kippenwasser geringere Säuregrade erwartet, als ohne diese Maßnahme. Die Wirkung auf den chemischen Zustand des Grundwassers wird insgesamt jedoch begrenzt bleiben, weil der Flächenanteil der mit dieser Technologie beaufschlagten Kippe im Vergleich zu den bereits vorhandenen Kippenflächen gering ist.

8.2.3 Rheinisches Revier

Die Kippenversauerung wurde im Zusammenhang mit dem Genehmigungsverfahren für den Braunkohlentagebau Garzweiler II seit 1989 besonders intensiv erforscht, da hier der Abraum im Unterschied zu den anderen Tagebauen des Rheinisches Braunkohlenreviers über ein vergleichsweise hohes Versauerungspotential durch hohe Pyritanteile verfügt [Eyll-Vetter u.a. 2006], [Eyll-Vetter 2007]. In den 1990er Jahren wurden auf der Grundlage umfassender wissenschaftlich-technischer Untersuchungen von [Obermann u. a. 1993] erstmalig präventive Maßnahmen, sogenannte A-Maßnahmen, zur Minimierung der Kippenwasserversauerung vorgeschlagen (Bild 68). Überhaupt geht die grundlegende Klassifizierung der Maßnahmen in Kapitel 2.4 auf die wegweisenden Arbeiten im Rheinischen Braunkohlenrevier zurück. Im Abgleich mit der Tagebautechnologie und mit den zu erwartenden Wirkungen wurden geeignete Maßnahmen für den Tagebaubetrieb aus dem entwickelten Maßnahmenkatalog ausgewählt und in den Nebenbestimmungen der bergrechtlichen Zulassungsbescheide und der wasserrechtlichen Erlaubnis fixiert.

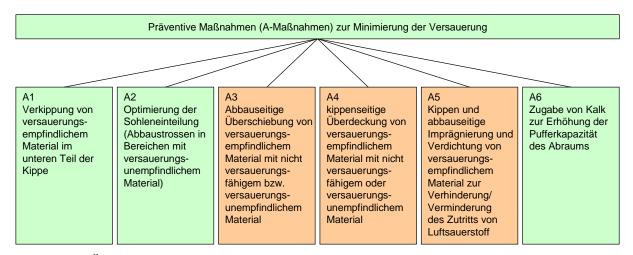


Bild 68: Übersicht präventiver Maßnahmen zur Minimierung der Kippenwasserversauerung im Rheinischen Revier

Die Umsetzung der Maßnahmen A3 und A4 war aus Gründen der geochemischen Massenbilanz für den Tagebau Garzweiler nicht erfolgversprechend, da der Anteil des versauerungsempfindlichen Abraums (> 0,2 Masse-% Pyritanteil, vgl. <u>Tabelle 1</u>) am Gesamtabraum mit etwa 60 % sehr groß ist. Auch eine Imprägnierung oder Abdichtung (A5) wurde als nicht durchführbar bewertet.

Im Tagebau Garzweiler reicht die natürliche Pufferkapazität im Mittel nicht aus, um die Säurefreisetzung infolge der Pyritverwitterung zu neutralisieren. Weiterhin war ausschlaggebend für die Auswahl der Maßnahmen, dass der Raum nördlich des Tagebaus Garzweiler II durch Wasserwerke und gewerbliche Bedarfsträger wasserwirtschaftlich intensiv genutzt wird. Für den Tagebau Garzweiler wurde aufgrund der besonderen geochemischen und wasserwirtschaftlichen Bedingungen die Umsetzung der Maßnahmen A1, A2 und A6 favorisiert [Eyll-Vetter 2007].

Die selektive Gewinnung von versauerungsempfindlichem Material und seine Verkippung in den unteren Kippenbereichen (Maßnahme A1) hat zum Ziel, analog der Vorgehensweise in den Mitteldeutschen und Lausitzer Revieren, in den oberen Kippenbereichen Pyrit und seine Verwitterungsprodukte abzureichern, um günstigere hydrochemische Voraussetzungen für das Grundwasser und den Bergbaufolgesee zu schaffen. Die Optimierung der Sohleneinteilung auf der Gewinnungsseite (Maßnahme A2) verfolgt das Ziel, möglichst weite Bereiche der Abbaustrossen in nicht versauerungsfähiges Material zu legen.

Mit der Maßnahme A6 (Kippenkalkung) werden dem versauerungsfähigem Abraum alkalische Rohstoffe zugegeben. Derzeit wird Kalksteinmehl verwendet. Perspektivisch ist der Einsatz von Kraftwerksaschen vorgesehen [Eyll-Vetter 2007]. Die Dosierung der alkalischen Rohstoffe erfolgt über ein Prozessleitsystem auf der Grundlage der Daten des geochemischen Lagerstättenmodells, der Lage des Baggerschnittes und des aktuellen Massenstromes. Der Kalk wird in Abhängigkeit von der Versauerungsfähigkeit und dem Volumen des Massenstroms bedarfsgerecht zugegeben. Derzeit sind im Tagebau Garzweiler II vier Kalksilos mit einem Fassungsvermögen von 950 und 2.100 m³ sowie einer technischen Dosierleistung von 8 bis 105 t/h in Betrieb (Bild 69). Die Anlieferung erfolgt mit Silo-LKW. Der

Regelbetrieb erfolgt seit 2006 mit dem nahtlosen Übergang des Tagebaus Garzweiler I in den Tagebau Garzweiler II.



Bild 69: Kalksilos auf der Bandanlage im Tagebau Garzweiler II zur Umsetzung der A6-Maßnahme Kippenkalkung, Quelle: Forkel, RWE 2009

Ein vorlaufender Test der Kippenkalkung mit einer Pilotanlage erfolgte seit 1998 im Nordflügel des Tagebaus Garzweiler I. Die mittlere Kalkzugabe zum Abraum betrug hier 0,065 Masse-%. Die Maßnahmen werden durch ein intensives behördliches Kippenmonitoring begleitet. Da die Wirkung auf die Grundwasserbeschaffenheit erst in vielen Jahrzehnten eintritt, erfolgt die Evaluierung der Maßnahme durch umfangreiche Kippenuntersuchungen [Wisotzky & Lenk 2006] und repräsentative Behälterversuche [Kwasny 2011].

Im Tagebau Garzweiler wird ausschließlich eine Bagger-Band-Absetzer-Technologie eingesetzt. Am Bandsammelpunkt Jackerath kreuzen sich sechs gewinnungsseitige Förderbänder mit sechs kippenseitigen Förderbändern. Durch die tagebau- und technologiespezifische Vernetzung der Bänder können die Abraummassen mit hohen Freiheitsgraden disponiert werden. Durch logistische Verbote bzw. Präferenzen der Verknüpfungen wird die selektive Verkippung gewährleistet [Kwasny 2011]. Die vier Kalksilos sind an den zuführenden Bändern unmittelbar vor dem Bandsammelpunkt aufgestellt (Bild 69), so dass durch die gezielte Vermischung von Massenströmen theoretisch der gesamte Abraum beaufschlagt werden kann. Im Jahr 2008 wurden 71 Mio. Tonnen Abraum in der Kippe des Tagebaus Garzweiler II mit etwa 166.000 Tonnen Kalk beaufschlagt [MUNLV 2009].

8.2.4 Sanierungsbergbau

Der Lausitzer Sanierungsbergbau hat vor allem mit den Folgen der Versauerung der zwischen 1880 und 1990 entstandenen Kippen und des Tagebauumfeldes zu kämpfen. Ein nachträglicher Eingriff in die Prozesse der Pyritverwitterung ist hier nicht mehr möglich. Die großräumige Verockerung der Fließgewässer in den Grundwasserwiederanstiegsgebieten des Sanierungsbergbaus zeigt, dass die wassergütewirtschaftlichen Folgen des Braunkohlenbergbaus nicht auf die unmittelbaren Tagebaubereiche (Restlöcher, Innenkippen, Außenhalden) und auf den Geltungsbereich der bergrechtlichen Betriebspläne begrenzt werden können. Die systemanalytische Erweiterung der Betrachtungen auf das Umfeld der Tagebaue, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, hat sich deshalb als dringend notwendig erwiesen.

Im Sanierungsbergbau wird vor allem die Behandlung von bergbaubeeinflussten Wässern praktiziert [LMBV 2003]. Im Wesentlichen werden Grundwasser und Oberflächenwässer aus Bergbaufolgeseen, die in die öffentliche Vorflut ausgeleitet werden müssen, chemisch behandelt. Die Fassung erfolgt mit Filterbrunnen bzw. offenen Wasserhaltungen. Zur Behandlung dienen Grubenwasserreinigungsanlagen (GWRA), die überwiegend bereits aus der Zeit des aktiven Bergbaubetriebs stammen. Derzeit sind bei der LMBV die GWRA Rainitza und die GWRA Lichterfeld (beide in Brandenburg) in Betrieb. Die Eisenschlämme aus der Wasserbehandlung werden in Bergbaufolgeseen (z. B. in den Sedlitzer See) verspült. Das behandelte Wasser wird in die Vorflut eingeleitet oder zur Flutung von Bergbaufolgeseen genutzt. Aufgrund der neuen Entwicklungen im Zusammenhang mit dem Grundwasserwiederanstieg werden von der LMBV neue Wasserbehandlungsanlagen geplant, z. B. am Hammergraben in Plessa kurz vor der Einmündung in die Schwarze Elster (Brandenburg), bzw. seit längerem stillgelegte und meist verschlissene Anlagen rekonstruiert, wie z. B. die GWRA Burgneudorf (Sachsen) und die GWRA Vetschau (Brandenburg). Die Nutzung der genannten Anlagen wird voraussichtlich über Jahrzehnte erforderlich sein, um die nachteiligen Wirkungen des Braunkohlenbergbaus auf die Gewässer zu heilen.

Die in den 1990er Jahren von den Autoren und anderen Fachkollegen angestoßene Entwicklung der In-lake-Wasserbehandlung von Bergbaufolgeseen, siehe dazu [LUA BB 1995] und [LUA BB 2001], hat sich inzwischen zum Stand der Technik entwickelt. Neben der Flutung stellt die chemische In-lake-Wasserbehandlung heute die zweitwichtigste Säule der Wassergütebewirtschaftung saurer Bergbaufolgeseen dar. Die In-lake-Technik arbeitet inzwischen mit hohen chemischen Wirkungsgraden von ca. 80 ± 10 %, die mit den Wirkungsgraden der Grubenwasserbehandlungsbzw. –reinigungsanlagen vergleichbar sind. Das Verfahren ist insofern sehr effizient, weil eine Wasserbehandlung nur in dem Maße erfolgt, wie sie tatsächlich erforderlich ist. Zu berücksichtigen ist, dass die Technologie meist nicht nur einmalig, sondern permanent oder in Kampagnen zur Anwendung kommen muss. Insofern ist auch der leichte Zugang zu einem Oberflächengewässer, im Unterschied zu einer vergleichbaren Wasserbehandlung im Untergrund, vorteilhaft.



Bild 70: Kalkeinbringung in den Bergbaufolgesee Burghammer mittels Schiff (links) und mittels getauchter Rohrleitung in den Bergbaufolgesee Scheibe (rechts) (Fotos: LMBV)

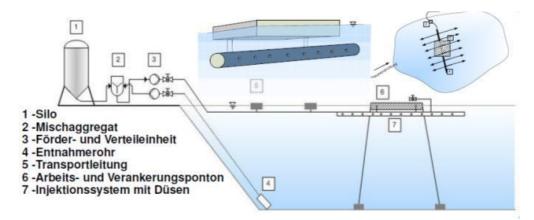


Bild 71: Prinzipskizze eines Düsenstrahlinjektionssystems zur In-lake-Neutralisation [Benthaus 2012]

Von der LMBV wurde in der Lausitz eine **Flutungszentrale** eingerichtet, die die Flutung von Bergbaufolgeseen und die Ausleitung aus gefüllten Bergbaufolgeseen hinsichtlich der Wassermenge und der Wasserbeschaffenheit steuert (<u>Bild 72</u>). Ging es in den 2000er Jahren noch hauptsächlich darum, die begrenzten Flutungsressourcen gezielt und effektiv für die Flutung der Bergbaufolgeseen zu verteilen, hat sich der Schwerpunkt der Steuerung in den letzten Jahren auf wassergütewirtschaftliche Aspekte verlagert. Die Steuermodelle der Flutungszentrale Lausitz werden derzeit überwiegend dazu genutzt, um die behördlichen Immissionswerte für Sulfat in der Spree einzuhalten. Die Ausleitung aus dem Speicher Burghammer, der ein sulfatreiches Wasser enthält, wird entsprechend geregelt.

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle - Abschlussbericht

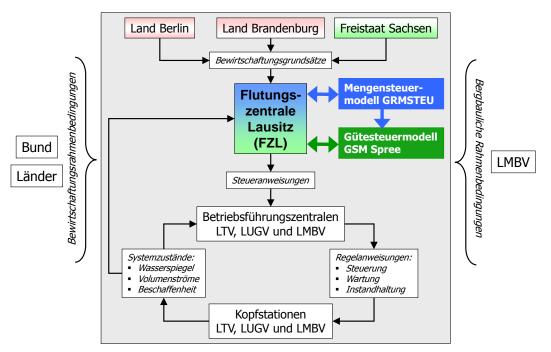


Bild 72: Organisationsschema für die Flutungszentrale Lausitz der LMBV mit den Modellen für die Wassermengen- und Wassergütesteuerung

Aussichtsreiche Entwicklungen werden im Sanierungsbergbau vor allem in Verfahren der naturräumlichen Wasserbehandlung und in der Untergrundwasserbehandlung gesehen. Bei der (oberirdischen) naturräumlichen Wasserbehandlung werden technisch-intensive gegen natürlich-extensive Prozesse ersetzt. Das erfordert in der Regel einen großen Flächenbedarf. Die Flächenverfügbarkeit stößt in der intensiv genutzten deutschen Kulturlandschaft jedoch sehr schnell an Grenzen. Die Prozessführung naturräumlicher Wasserbehandlungsverfahren ist nur bei nicht säuregenerierenden Wässern vergleichsweise einfach. Diese Prozesse lassen sich gut bemessen und nahezu unbegrenzt skalieren. Säuregenerierende Wässer sind dagegen ungleich schwieriger zu behandeln. Hierfür müssen der Wasserbehandlung zusätzliche Prozessschritte vorgeschaltet und nachgeschaltet werden. In der Regel beschränken sich solche naturräumlichen Wasserbehandlungsverfahren deshalb auf kleine Volumenströme.

Die Untergrundwasserbehandlung, als Form der unterirdischen naturräumlichen Wasserbehandlung, ist zur Behandlung nicht säuregenerierender, moderat eisenhaltiger Wässer Stand der Technik, wie zum Beispiel die unterirdische Enteisenung und Entmanganung. Die vom Braunkohlenbergbau beeinflussten Grundwässer fallen aber in der Regel nicht in diese chemische Kategorie. Der verfahrenstechnische Anspruch an die Untergrundwasserbehandlung von Grundwasser mit über 1.000 mg/L Sulfat und bis zu mehreren hundert Milligramm Eisen pro Liter Wasser und hohen Aciditäten ist sehr hoch. Die Vorteile einer Untergrundwasserbehandlung sind die großen verfügbaren Räume und die langen Prozesszeiten. Insbesondere der unterirdischen Sulfatreduktion werden hohe Entwicklungschancen eingeräumt, weil dieser Prozess faktisch den ersten Schritt zur Umkehrung der Pyritverwitterung darstellt. Die Untergrundwasserbehandlung stößt jedoch genehmigungsrechtlich auf viele Vorbehalte.

der Braunkohle - Abschlussbericht

Seite 156

8.3 Bewertung

Durch den Braunkohlenbergbau im Tagebaubetrieb werden die Strukturen der Grundwasserleiter innerhalb der Grenzen der Abbaufelder grundlegend zerstört und dabei gleichzeitig belüftet. Aus einer vertikalen Wechselfolge zwischen gut durchlässigen Grundwasserleitern und weniger gut durchlässigen bis undurchlässigen Grundwasserstauern wird ein Mischboden erzeugt, dessen hydraulische Profildurchlässigkeit in der Regel deutlich geringer ist, als die des gewachsenen Gebirges. Schon aus diesen Gründen kommen die Braunkohlenabraumkippen für eine Grundwassernutzung künftig nicht mehr in Frage. Darüber hinaus führen bereits vergleichsweise geringe Umsätze der Pyritverwitterung zu Sulfatkonzentrationen, die über dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung liegen (> 250 mg/L). Das Kippenwasser ist deshalb auch ohne Versauerung für diese Zwecke auf lange Zeit voraussichtlich nicht nutzbar. Vordergründig geht es im Braunkohlenbergbau folglich hauptsächlich darum, Schadwirkungen des Kippenwassers auf tangierende aquatische Schutzgüter bzw. Schutzobjekte zu vermeiden.

Das Ideal eines Braunkohlentagebaus hinsichtlich der Minimierung seiner wasserhaushaltlichen und stofflichen Auswirkungen auf das Umfeld in allen seinen Betriebsphasen (Aufschluss, Abbaubetrieb, Stilllegung) wäre ein geohydraulisch umlaufend abgedichteter Tagebau (siehe Kapitel 2.2). In einem geohydraulisch eingekapselten Kippenmassiv spielt die sich nachbergbaulich einstellende Wasserbeschaffenheit praktisch keine Rolle, weil das Kippengrundwasser am Wasserkreislauf nicht teilnimmt.

Das im Innenraum neugebildete Grundwasser muss dabei durch geeignete Maßnahmen so gelenkt werden, dass dauerhaft minimale stoffliche Austräge aus den Kippen gewährleistet sind. Beispielsweise kann die Gebietsentwässerung über einen oberflächennah gestalteten Grundwasserleiter erfolgen, der hydraulisch vom tiefen belasteten Kippenwasser getrennt ist. Ein umlaufend abgedichteter Tagebau führt bei einem Minimum an tagebaubegleitenden und nachsorgenden Maßnahmen zur deutlichen Minderung der Kippenversauerung und ihrer Auswirkungen und auch zu einem Minimum an Nachsorgekosten. Der Umgang mit so einem Tagebau entspricht formal dem Umgang mit einer gesicherten Altlast oder Deponie, deren Körper unabhängig vom Schadstoffinventar selbst nicht behandelt werden muss. Dieser Zustand soll als **erster Grenzfall** bezeichnet werden.

Der zweite Grenzfall ist ein Braunkohlentagebau, dessen Kippen gegenüber der Umgebung nicht isoliert sind, der geohydraulisch in den nachbergbaulichen Wasserhaushalt vollständig eingebunden ist und dessen stoffliche Emissionen tangierende aquatische Schutzgüter relevant beeinflussen. In solchen Braunkohlentagebauen ist es erforderlich, durch tagebaubegleitende Maßnahmen die Pyritverwitterung soweit wie möglich zu minimieren und durch nachsorgende Maßnahmen ihre Folgen soweit wie möglich, ggf. sogar vollständig, zu kompensieren. Eine solche Konstellation deutet sich zum Beispiel für den Tagebau Schlabendorf-Süd (Brandenburg) an. Dieser Tagebau enthält eine hydraulisch vergleichsweise gut durchlässige Innenkippe. Die Innenkippe liegt zwischen dem Lausitzer Grenzwall und dem Bergbaufolgesee des Tagebaus (Schlabendorfer See) und wird vom Grundwasser

praktisch vom höher gelegenen Lausitzer Grenzwall zum tiefer gelegenen Bergbaufolgesee vollständig durchströmt. Das Grundwasser wird über Jahrzehnte den gesamten löslichen Stoffbestand der Innenkippe in den Bergbaufolgesee auswaschen. Das saure und metallreiche Wasser muss nachträglich in der Kippe oder spätestens im Bergbaufolgesee neutralisiert werden, damit eine gefahrlose Ausleitung in die Vorflut erfolgen kann. Langfristig stellt sich diese Maßnahme als eine chemische Vollkompensation der Pyritverwitterung dar. Das ist der typische Fall eines Braunkohlentagebaus, in dem eine tagebaubegleitende Minderung und Verhinderung der Pyritverwitterung die bessere Lösung dargestellt hätte.

Der Vollständigkeit halber muss konkret zum Tagebau Schlabendorf-Süd gesagt werden, dass zum Zeitpunkt der Planung dieses Tagebaus (in den 1960er Jahren) das Problem der Kippenversauerung in den heute bekannten Dimensionen nicht gegenwärtig war und das zudem die Planungen eine andere Endkonstellation des Tagebaus und seines Bergbaufolgesees vorsahen. Der Tagebau wurde aus wirtschaftlichen Erwägungen in der Nachwendezeit vorzeitig eingestellt und der bereits geplante benachbarte Nachfolgetagebau nie aufgeschlossen.

Als für die gegenwärtigen Verhältnisse eher **typischen Fall** kann drittens die Konstellation angesehen werden, bei der langfristig nur die lokalen Wirkungen der Pyritverwitterung und Kippenversauerung auf die tangierenden aquatischen Schutzgüter bzw. Schutzobjekte kompensiert werden müssen. Das kann im Einzelfall an der geohydraulischen Konstellation des Tagebaus, z. B. bei einer Lage auf einer Hochfläche mit geringem Wasseraustausch, an einer natürlichen hydrogeologischen oder technischen Teilisolation des Tagebaus oder an günstigen geochemischen Bedingungen (Karbonate im Deckgebirge) liegen. In diesen Fällen ist aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten immer als Einzelfalllösung zu entscheiden, in welchem Maße tagebaubegleitende oder nachsorgende Maßnahmen das Mittel der Wahl sind bzw. in welchen Anteilen sie umgesetzt werden. Die Eignung von Technologien und Verfahren zur Minderung der Kippenversauerung und ihrer Außenwirkungen in einem aktiven Braunkohlentagebau ist neben den lagerstättengeologischen und geochemischen sowie abbautechnologischen Faktoren wesentlich auch vom Fortschritt eines Braunkohlentagebaus abhängig (Bild 73).



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle - Abschlussbericht

Seite 158

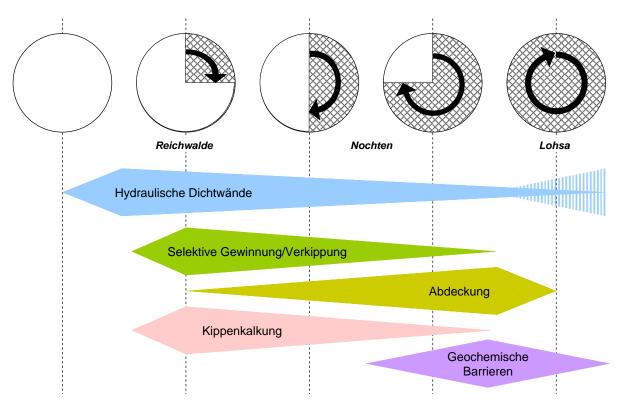


Bild 73: Abhängigkeit der Eignung tagebaubegleitender Maßnahmen zur Minderung der Pyritverwitterung und Kompensation ihrer Wirkungen vom Fortschritt eines Braunkohlentagebaus

Schwierigkeiten bei der objektiven wirtschaftlichen Entscheidung zwischen tagebaubegleitenden oder nachsorgenden Maßnahmen dürfte die enorme Zeitlücke zwischen der Inanspruchnahme der jeweiligen Maßnahmen bereiten. Die Zeitlücke beträgt für einen Braunkohlentagebau in der Regel mehrere Jahrzehnte. In dieser Zeitspanne können sich die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen grundlegend verändern, wofür die Auftraggeber und Autoren dieser Studie Zeitzeugen sind. Deshalb ist der Vorzug prinzipiell den tagebaubegleitenden Maßnahmen einzuräumen.

Um die Kluft zwischen der ökologischen Notwendigkeit und der wirtschaftlichen Sinnfälligkeit zu verringern, werden im folgenden Abschnitt Hinweise auf Entwicklungspotentiale für tagebaubegleitende Maßnahmen zur Verhinderung bzw. Minderung der Pyritverwitterung und ihrer Folgen für den aktiven Braunkohlenbergbau der Lausitz gegeben.

8.4 Entwicklungspotentiale

In diesem Kapitel sollen die Entwicklungspotentiale für Maßnahmen zur Verhinderung bzw. Minderung der Pyritverwitterung und ihrer Folgen für den aktiven Braunkohlenbergbau in der Lausitz in den Grundzügen dargelegt werden. Tatsache ist, dass insbesondere das Deckgebirge der aktiven Lausitzer Braunkohlentagebaue Nochten und Reichwalde praktisch keine Karbonate enthält. Die natürliche Pufferung der Säuren aus der Pyritverwitterung beschränkt sich auf die Prozesse der Silikatverwitterung und des Ionenaustausches und ist unvollständig und nicht ausreichend. Jede, auch eine anteilige Zufuhr von Alkalinität mindert die Auswirkungen der Pyritverwitterung. Aus wirtschaftlichen und umweltchemischen Erwägungen sollte zunächst geprüft werden, inwieweit regional verfügbare alkalische Ressourcen, günstigerweise Reststoffe, zur Minderung der Kippenversauerung nutzbar gemacht werden können. Dazu zählen vor allem:

- Eisenhydroxidschlämme mit alkalischem Überschuss aus den Grundwasserbehandlungsanlagen
- Kraftwerksaschen
- Artfremde alkalische Rückstände aus der chemischen und Rohstoffindustrie

Die MIBRAG praktiziert den Einbau des alkalischen EHS aus ihrer Grubenwasserreinigungsanlage Neukieritzsch in der Kippe des Tagebaus Vereinigtes Schleenhain
(siehe Kapitel 8.2.2). Vergleichbare Lösungen sollten auch für die Tagebaue
Reichwalde und Nochten der Vattenfall Europe Mining AG geprüft werden. In der
GWBA Tzschelln und in der GWBA Kringelsdorf fallen beträchtliche, in der Wasseraufbereitung des Kraftwerkes Boxberg eher geringe Mengen EHS mit einem
bedeutenden Alkalinitätsüberschuss an. Ein Einbau dieser EHS auf der Oberfläche
der Direktversturzkippe würde die Alkalinität zudem unmittelbar in die Bereiche der
Sekundärverwitterung eintragen, wo sie am meisten notwendig sind.

Die Kraftwerksaschen der Braunkohlenkraftwerke und anderer kommunaler Kraftwerke werden derzeit nach Abfallrecht bzw. Bergrecht in Monodeponien abgelagert: im Tagebau Nochten in einer oberirdischen Anlage und im Tagebau Reichwalde in einer Randschlauchkontur. In den Kraftwerksaschen verbergen sich beachtliche verwertbare Alkalinitätspotentiale, deren Nutzung zur Kompensation der Kippenversauerung technisch, umweltchemisch und genehmigungsrechtlich geprüft werden sollte.

In gleicher Weise fallen unbedenkliche alkalische Rückstände in großen Mengen in der chemischen und Rohstoffindustrie an, die für den gleichen Anwendungszweck geprüft werden sollten. Hier lassen sich volkswirtschaftliche Synergien herstellen.

Da eine Vollkompensation der Säurebildung aus der Pyritverwitterung in den Innenkippen der Lausitzer Tagebaue mit Förderbrückenbetrieb technologisch derzeit nicht möglich erscheint (Kapitel 8.2.1), wird empfohlen, das **Konzept geochemischer Barrieren** zu verfolgen. Dieses Konzept beinhaltet den verdichteten Einbau alkalischer Stoffe in ausgewählte Bereiche der Kippe als Sonderschüttungen. Die Alkalinität wird hier im Überschuss bemessen, damit in diesen Zonen die Acidität des strömenden bzw. aufsteigenden Grundwassers auf lange Zeit lokal kompensiert werden kann. Die geochemischen Barrieren können ausgebildet werden als:

- Horizontale geochemische Barrieren
- Vertikale geochemische Barrieren

Der Bau einer horizontalen geochemischen Barriere ist zum Beispiel an der Basis der Absetzerkippe sinnvoll (<u>Bild 74</u>). Diese geochemische Barriere ist geeignet, das aufsteigende saure Grundwasser aus der Direktversturzkippe zu neutralisieren und das Eisen zu fixieren. Der Bau vertikaler geochemischer Barrieren wäre sinnvoll in Kippenbereichen, die zukünftig horizontal durchströmt werden, was insbesondere für die ufernahen Kippenschüttungen zu einem späteren Bergbaufolgesee oder für den Übergangsbereich ins Gewachsene zutrifft. Konkrete technologische Vorstellungen hierzu bestehen derzeit noch nicht. Entsprechende Untersuchungen mit Pilotcharakter werden empfohlen.

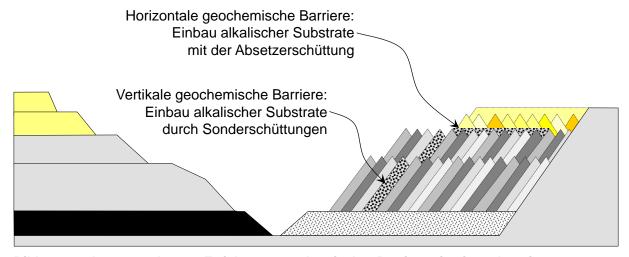


Bild 74: Ansatzpunkte zur Errichtung geochemischer Barrieren in einem Lausitzer Braunkohlentagebau

Da die Förderbrückenkippe für den Einbau alkalischer Stoffe im Regelbetrieb technologisch nicht erreichbar ist, bietet sich in den besonders exponierten Tagebaupositionen statt der Förderbrückentechnologie der Bagger-Band-Absetzer-Betrieb an. Der Bau horizontaler geochemischer Barrieren lässt sich mit dem Absetzerbetrieb koordinieren (Pumpbetrieb für EHS) bzw. in die Technologie des Absetzerbetriebes einordnen (Schüttgüter). Als Rohstoffe zum Bau der horizontalen geochemischen Barrieren sind die oben besprochenen alkalischen Reststoffe bevorzugt geeignet.

Eine dritte wesentliche Entwicklungsrichtung zur Minderung der Pyritverwitterung im Tagebaubetrieb wird in der Nutzung **respiratorisch wirkender Stoffe** gesehen, um den Sauerstoffeintrag in die Kippe zu verringern. Solche Stoffe sind in geeigneten Mengen verfügbar als:

- Abfälle aus der Biogasproduktion
- Faulschlämme aus der Gewässersanierung

Diese Stoffe müssten in gleicher Weise unmittelbar auf die Oberfläche der Direktversturzkippe eingebaut werden, um eine maximale Wirkung auf den Bereich der Sekundärverwitterung zu erzielen.

Die Entwicklungspotentiale für den Einsatz von **bakteriziden und inertisierenden Stoffen** zur Minderung der Pyritverwitterung in den Kippen der Lausitzer Braunkohlentagebaue werden eher als gering eingeschätzt. Als einschränkend für die Anwendung von Bakteriziden werden vor allem ökotoxikologische und damit genehmigungsrechtliche Aspekte, die begrenzte Wirkdauer und der beträchtliche Mengenbedarf gesehen. Als einschränkend für die Anwendung von inertisierenden Stoffen (z. B. Phosphate) werden vor allem der beträchtliche Mengenbedarf und bislang nicht kalkulierbare umweltchemische Langzeitwirkungen gesehen. Dennoch sollten diese Ansätze forschungsseitig weiter verfolgt werden.

In der <u>Tabelle 39</u> werden die Maßnahmen zur Verhinderung/Minderung der Kippenversauerung bzw. ihrer Auswirkungen hinsichtlich des derzeit erreichten Entwicklungsstandes und des Entwicklungspotentials für die Lausitzer Braunkohlentagebaue zusammenfassend eingeschätzt. Die detaillierten Erläuterungen hierzu erfolgten im vorstehenden Text.

Tabelle 39: Bewertung der Eignung und des Entwicklungstandes der Maßnahmen gegen Kippenversauerung im Lausitzer Braunkohlenbergbau

Rippenversaderding iiii Lads		
Maßnahme	anerkannte Regel der Technik bzw. Stand der Technik	Entwicklungs- potential
A – Maßnahmen der Quellenbehandlung		
Selektive Gewinnung/Verkippung		
Verringerung der Expositionsflächen/-zeiten		
Oberflächenverdichtung/-abdeckung		
Beregnung/Einstau		
Alkalische Stoffe		
Sauerstoffzehrung		0
Bakterizide Stoffe		
Inertisierende Stoffe		
B – Maßnahmen zur Eindämmung der räum	lichen Ausdehnur	ng
Dichtwände		
Infiltrationselemente		
C – Maßnahmen zur Verhinderung der Stof	fausbreitung	
Wasserbehandlung in technischen Anlagen		
Naturräumliche Wasserbehandlung		
Wassermanagement		

nachgewiesene	Wirkuna	bzw. hohes	Entwicklungs	spotential

[■] begrenzte Wirkung bzw. eingeschränktes Entwicklungspotential

[☐] keine Wirkung bzw. geringes Entwicklungspotential

9 Quellenverzeichnis

9.1 Literatur

[Arnold & Fisch 2013]

Arnold, I. und St. Fisch: Braunkohlengewinnung in der Niederlausitz.

Dresdner Grundwassertage 2013 "Entwicklung und Applikation

innovativer Grundwasserschutz- und Grundwasserbehandlungsmaßnahmen", Heft 49, 109-119, 2013.

[Beims 2011] Beims, U.: Effiziente Maßnahmen zur Minderung des Eiseneintrages in

die öffentliche Vorflut von Bergbaufolgelandschaften. Dresdner

Grundwassertage 2011, Proceedings des Dresdner

Grundwasserforschungszentrums e.V., Heft 45, S. 241-2510, 2011.

[Berger 2000] Berger, W.: Stoffinventar und Stoffänderung durch Redoxreaktionen in

Sedimenten des Lausitzer Braunkohlenreviers. Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V., Heft 18, 177 S., 2000.

[Bilek 2004] Bilek, F.: Beschaffenheitsprognose für den Grundwasser-Abstrom aus

Braunkohle-Tagebaukippen auf der Basis von experimentell bestimmten

Parametern und geochemisch charakterisierten Sedimenten.

Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.v., Heft

26, 144 S., 2004.

[Breitenbücher & Siebert 2011]

Breitenbücher, R. und Siebert, B.: Verbreitung und Schadenspotenzial saurer und sulfatreicher Grundwässer in Deutschland unter besonderer

Berücksichtigung des Wiederanstiegs des Grundwassers. Teil 1: Sachstandsbericht. Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Baustofftechnik, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart, 127 S., 2011.

[Buczko 1999]

Buczko, U.: Modellierung des Wasserflusses und Stofftransport in der wasserungesättigten Zone heterogener Braunkohlentagebau-

Abraumkippen der Lausitz. Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung 6, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 200

S., 1999

[Eyll-Vetter u.a.

2006]

Eyll-Vetter, M.; J. den Drijver; U. Michalak und J. Kwasny: Umsetzung von Maßnahmen zur Verminderung der Abraumversauerung im Tagebau

Garzweiler II. Bergbau 10/2006, S. 460- 464.

[Evangelou 1995]

Evangelou, V. P.: Pyrite oxidation and its control: Solution chemistry, surface chemistry, acid mine drainage, molecular oxidation mechanisms,

microbial role, kinetics, control, ameliorates and limitations, microencapsulation. CRC Press Inc., Boca Raton, 293 S., 1995.

[Forkel 2011] Forkel, Ch.: Aspekte des

Forkel, Ch.: Aspekte des Grundwasserwiederanstiegs im Rheinischen

Revier. Dresdner Grundwassertage 2011,

Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V., Heft

45, S. 137-150, 2011.

[Hoth 2011]

Hoth, N.: Minderung des Sulfat- und Eisenaustrages aus Kippen – technische Maßnahmen und natürliche Prozesse vor Abschluss des

Grundwasserwiederanstiegs. Dresdner Grundwassertage 2011,

Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V., Heft

45, S. 217-230, 2011.

[Gibson u. a. 1994]

Gibson, D. K.; Pantelis, G. and Ritchie, A. I. M.: The Relevance of the intrinsic oxidation rate to the evolution of polluted drainage from pyritic waste rock dump. International land reclamation and acid mine drainage conference and third international conference on the abatement of acid drainage. Volume 2 of 4, S. 258-263, Pittsburgh 1994.

[Jordan & Weder 1995]	Jordan, H. und Weder, HJ.: Hydrogeologie – Grundlagen und Methoden. 2. Auflage, Enke, Stuttgart, 603 S., 1995.
[Kalin & Wheeler 2011]	Kalin, M. und Wheeler, W.N.: A Review of the role of phosphate mining waste - A chemical or biological reagent for AMD prevention? Proceedings of the 32th West Virginia Surface Mine Drainage Task Force Symposium, Morgantown, 2011.
[Koch u. a. 2006]	Koch, R.; Schöpke, R.; Mangold, S.; Regel, R. und Striemann, A.: Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur Untergrundentsäuerung von Kippengrundwässern. Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft und Umwelt, Heft 11, 197 S., 2006.
[Koch u. a. 2011]	Koch, Th.; Arnold, I. und Uhlmann, W.: Instrumente zur Prognose der Folgen des Grundwasserwiederanstiegs im Absenkungsbereich der Vattentall-Tagebaue nach Einstellung der Sümpfung. Dresdner Grundwassertage 2011, Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V., Heft 45, S. 95-104, 2011.
[Jolas 2011]	Jolas, P.: Die Planung der Bergbaufolgelandschaft im Verantwortungsbereich der MIBRAG unter Beachtung der Auswirkungen des Grundwasserwiederanstiegs nach der Einstellung der bergbaulichen Wasserhaltungsmaßnahmen. Dresdner Grundwassertage 2011, Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V., Heft 45, S. 119-126, 2011.
[Kwasny 2011]	Kwasny, J.: Konzeptioneller betrieblicher Umweltschutz am Beispiel der Abraumpufferung im Tagebau Garzweiler. World of Mining – Surface & Underground, 63 (4), S. 207-216, 2011.
[LUA BB 1995]	Landesumweltamt Brandenburg (Hrsg.): Wasserbeschaffenheit in Tagebaurestseen. Schriftenreihe des Landesumweltamtes Brandenburg, Studien und Tagungsberichte 6, Potsdam, 85 S., 1995.
[LUA BB 2001]	Landesumweltamt Brandenburg (Hrsg.): Tagebauseen. Wasserbeschaffenheit und wassergütewirtschaftliche Sanierung – Konzeptionelle Vorstellungen und erste Erfahrungen. Schriftenreihe des Landesumweltamtes Brandenburg, Studien und Tagungsberichte 35, Potsdam, 77 S., 2001.
[Meek 1983]	Meek, F.A.: Research into the use of apatite rock for acidic drainage prevention. Proceedings of the Fifth Annual West Virginia Surface Mine Drainage Task Force Symposium, Morgantown, 1983.
[MUNLV 2009]	Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: 10 Jahre Monitoring Garzweiler II. Tagungsband, 1011.September 2009, Mönchengladbach.
[Nixdorf u. a. 2000]	Nixdorf, B.; Hemm, M.; Schlundt, A.; Kapfer, M. und Krumbeck, H.: Braunkohlentagebauseen in Deutschland. Umweltbundesamt, Berlin, 519 S., 2000.
[Obermann & Wisotzky 1998]	Obermann, P. und Wisotzky, F.: Auswirkungen der Pyritoxidation im Bereich des Braunkohlentagebaus Garzweiler auf die Qualität des Kippengrundwassers – Möglichkeiten und Maßnahmen der Qualitätsverbesserung. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 42 (6), S. 234-240, 1998.
[Parkhurst & Appelo 1999]	Parkhurst, D.L and C.A.J. Appelo: Users guide to PHREEQC (version 2) – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. U.S.G.S. Water

transport and inverse geochemical calculations. U.S.G.S. Water

Resources Investigations Report 99-4259, USA, Denver, Colorado 1999.

[Rento	on &
Stiller	1989]

Renton, J.J. und Stiller, A.H.: Use of phosphate meterials as ameliorants for acid mine drainage. Volume 1. The use of rock phosphate (apatite) for the amelioration of acid mine drainage from the mining of coal.,

Florida Institute of Phosphate Research 1989.

[Scholz u. a. 2011]

Scholz, G.; Kaiser, H.-J. und Tienz, B.-S.: Umgang mit den Folgen des Grundwasserwiederanstieges in den Sanierungsbereichen der Lausitz und Mitteldeutschlands. Dresdner Grundwassertage 2011,

Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V.,

Heft 45, S. 85-93, 2011.

[Siebert 2010]

Siebert, B.: Betonkorrosion infolge kombinierten Säure-Sulfat-Angriffs bei Oxidation von Eisendisulfiden im Baugrund. Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum, Heft 2010-2, Shaker, Aachen, 196 S., 2010.

[SME 2009]

Mitigation of Metal Mining Influenced Water. (Management Technologies for Metal Mining Influencend Water. Volumen 2.), Ed. J.J.Gusek and L.A.Figueroa, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

[Stoll u. a. 2009]

Stoll, R.D.; Niemann-Delius, Ch.; Drebenstedt, C. und Müllensiefen, K.: Der Braunkohlentagebau. Springer, Berlin, Heidelberg, 605 S., 2009.

[Stumm & Morgan 1996]

Stumm, W. und Morgan, J. J.: Aquatic chemistry. John Wiley & Sons, New York, 1022 S., 1996.

[Uhlmann u.a. 2011]

Uhlmann, W.; Nestler; W.; Theiss, S.; Scholz, E. und Benthaus, F. C.: Zum Einfluss des Grundwasserwiederanstiegs im Lausitzer Bergbaugebiet auf die Niedermoore und Fließgewässer. Dresdner Grundwassertage 2011, Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V., Heft 45, S. 105-117, 2011.

[Wecker 2005]

Wecker, B.: Kleinräumige Heterogenität kohlehaltiger Kippböden und ihre Auswirkungen auf den Stoffhaushalt. Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung 29, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 133 S., 2005.

[Wisotzky 1994]

Wisotzky, F.: Untersuchungen zur Pyritoxidation in Sedimenten des Rheinischen Braunkohlenreviers und deren Auswirkungen auf die Chemie des Grundwassers. Besondere Mitteilungen zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch, Nr. 58, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen, 1994.

[Wisotzky & Lenk 2006]

Wisotzky, F. und Lenk, St.: Darstellung und Evaluierung der Minderungsmaßnahmen zur Kippenwasserversauerung im Tagebau Garzweiler der RWE Power AG (Rheinisches Braunkohlenrevier). Merkel u. a. (Hrsg.): Behandlungstechnologien für bergbaubeeinflusste Wässer. Workshop am Geologischen Institut der TU Bergakademie Freiberg, Wissenschaftliche Mitteilungen 31, Freiberg 2006, S. 133-138.

9.2 Gutachten und Studien

[ARGE 2011] Bilek, F.; Koch, Ch. und Sommer, Th.: Endbericht Grundwassergüte

Lausitz – Beschaffenheitsprognose und EG-WRRL. Arbeitsgemeinschaft

Grundwassergüte Lausitz, Dresden, 05.01.2011.

[BTU 1996] Gutachten zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit im Tagebausee

Lohsa II. Wissenschaftlich-technisches Projekt: Gewässergüte in

Tagebauseen der Lausitz.

Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 15.12.1996.

[BTU 1998]	Rolland, Wolfgang u. a.: Ermittlung der Grundwasserbeschaffenheit der Braunkohleabraumkippe des Tagebaues Jänschwalde. Sachstandsbericht 06/98, BTU Cottbus, Abschlußbericht, September 1998.
[BTU 2001]	Erarbeitung einer Kurzcharakteristik der hydrochemischen Verhältnisse im Tagebau Reichwalde. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Fakultät Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik, Lehrstuhl Hydrologie und Wasserwirtschaft, Juni 2001.
[BTU 2003a]	Mazur, K.; Ender, R.; Fleischhammel, P.; Uhlmann, W. und Seiler, D.: Aktualisierung des Gutachtens zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit in den Tagebauseen der Erweiterten Restlochkette (Spreetal-NO, Spreetal-Bluno, Skado, Koschen, Sedlitz). Wissenschaftlich-technisches Projekt: Gewässergüte in Tagebauseen der Lausitz. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 24.11.2003.
[BTU 2003b]	Grünewald, U.; Ehret, B.; Mazur, K. und Rolland, W.: Untersuchungen zur Gewässerbeschaffenheitsentwicklung der Spree – Wasserbeschaffenheit Speichersystem Lohsa II. Abschlussbericht, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2003.
[BTU 2005]	Mazur, K.; Ender, R.; Fleischhammel, P.; Uhlmann, W. und Seiler, D.: Gutachten zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit in den Tagebauseen Dreiweibern, Lohsa II und Burghammer. Wissenschaftlichtechnisches Projekt: Gewässergüte in Tagebauseen der Lausitz. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 22.02.2005.
[BTU 2006a]	Ender, R.; Fleischhammel, P.; Uhlmann, W. und Seiler, D.: Gutachten zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit im Tagebausee Scheibe. Wissenschaftlich-technisches Projekt: Gewässergüte in Tagebauseen der Lausitz. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 16.12.2006.
[BTU 2006b]	Ender, R.; Fleischhammel, P.; Uhlmann, W. und Seiler, D.: Gutachten zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit im Graureihersee (RL D/F). Wissenschaftlich-technisches Projekt: Gewässergüte in Tagebauseen der Lausitz. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2006.
[BTU 2007]	Ender, R.; Fleischhammel, P.; Uhlmann, W. und Seiler D.: Untersuchungen zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit im Tagebausee Bärwalde für verschiedene Varianten der Speicherbewirtschaftung. Wissenschaftlich-technisches Projekt: Gewässergüte in Tagebauseen der Lausitz. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 23.02.2007.
[BTU 2009]	Mazur, K.; Ender, R.; Fleischhammel, P.; Uhlmann, W. und Seiler, D.: Gutachten zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit in den Bergbaufolgeseen der Erweiterten Restlochkette. Wissenschaftlichten bei der Berichte Gewähnen eine Tanah erweiter der Leweiter

[BTU 2010] Mazur; K.; Ender, R.; Fleischhammel, P.; Uhlmann, W. und Seiler, D.: Gutachten zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit im Tagebauseensystem Lugteich-Kortitzmühle-Laubusch. Wissenschaftlichtechnisches Projekt: Gewässergüte in Tagebauseen der Lausitz. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 30.04.2010.

technisches Projekt: Gewässergüte in Tagebauseen der Lausitz. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 15.05.2009.

[BTU 2012] Ender, R.; Uhlmann, W. und Seiler, D.: Gutachten zur Entwicklung der

Wasserbeschaffenheit im Speicherbecken Burghammer unter dem Einfluss der Überleitung von Seewasser aus dem Tagebaurestgewässer Scheibe. Wissenschaftlich-technisches Projekt: Gewässergüte in Tagebauseen der Lausitz. Brandenburgische Technische Universität

Cottbus, 17.02.2012.

Klassifizierung der Grundwasserbeschaffenheit in der [DGFZ 1999]

Braunkohleabraumkippe des Tagebaus Welzow-Süd, insbesondere nördlich des Kauscher Grabens und Emissionsanalyse hydrogeologisch exponierter Kippenwasserabflüsse entlang der Nordabdachung des Niederlausitzer Grenzwalls. Dresdner Grundwasserforschungszentrum

e.V., Dresden, September 1999.

Grundwassergütemodellierung zur Prognose der Auswirkungen des [DGFZ 2006]

Grundwasseranstiegs auf die Rohwasserqualität der Trinkwasserfassung Bärwalde - Abschlussbericht. Dresdner Grundwasserforschungszentrum

e.V., Dresden, den 09.10.2006.

Drebenstedt, C.: Gutachten zur Überprüfung der durch die sächsischen [Drebenstedt 2009]

Braunkohleunternehmen vorgelegten präventiven Maßnahmen gegen die Kippenversauerung. Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft

und Arbeit, TU Bergakademie Freiberg, 27.11.2009.

[Eyll-Vetter 2007] Eyll-Vetter, Michael: Kippenversauerung im Rheinischen Braunkohlen-

revier und Umsetzung von Gegenmaßnahmen im Tagebau Garzweiler. Vortrag "Management bergbaubedingten Säurepotentials. TU Berg-

akademie Freiberg, 23. Februar 2007.

Gast, M.; Schöpke, R. und Walko, M.: Pilotvorhaben Düseninjektion [FIB 2011]

Skadodamm zur in-situ Grundwassersanierung. Abschlußbericht, Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V., Finsterwalde,

Mai 2011.

Strzodka, M.: Einsatz von Getauchten Schwimmleitungen mit Düsen [GMB 2009]

zum Eintrag von Kalksuspensionen zur Neutralisation des Tagebausees Scheibe. Gesellschaft für Montan- und Bautechnik mbH, Senftenberg,

15.09.2009.

Hoth, N.; Simon, A.; Ussatz, M.; Rascher, J.; Escher, D. und Fischer, J.: [Hoth u. a. 2010]

Ermittlung des geogenen Potentials der Grundwasserversauerung in Folge von Stoffumwandlungsprozessen in Kippenmischböden und Ableitung technologischer Gegenmaßnahmen in den Abbaufeldern Schleenhain und Peres des Tagebaues Vereinigtes Schleenhain.

Abschlußbericht, TU Bergakademie Freiberg, Dezember 2010.

Uhlmann, W. und Seiler, D.: Studie zur Ermittlung des Säurebildungs-[IWB 2000a]

potentials im Tagebau Nochten und zu den technischen Möglichkeiten einer Verbesserung der Grundwasserbeschaffenheit. Teil 1: Stratigraphisch-geochemisches Leitprofil, Säurebildungs- und Säurekompensationspotential. Ingenieurbüro für Wasser und Boden GmbH

Possendorf, 30.06.2000.

Uhlmann, W. und Seiler, D.: Studie zur Ermittlung des Säurebildungs-[IWB 2000b]

potentials im Tagebau Nochten und zu den technischen Möglichkeiten einer Verbesserung der Grundwasserbeschaffenheit. Teil 2: Grundwasserbeschaffenheit der Kippe Nochten. Ingenieurbüro für Wasser und

Boden GmbH Possendorf, 15.12.2000.

[]] MD 0004 - 1	Libbonn W. and Coiler D. Ctudio zur Ermittland des
[IWB 2001a]	Uhlmann, W. und Seiler, D.: Studie zur Ermittlung des Säurebildungspotentials im Tagebau Nochten und zu den technischen Möglichkeiten einer Verbesserung der Grundwasserbeschaffenheit. Teil 3: Vertiefende bodenchemische Erkundung der Vor- und Hauptkippe Nochten. Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden, 12.04.2001.
[IWB 2001b]	Uhlmann, W. und Seiler, D.: Studie zur Ermittlung des Säurebildungspotentials im Tagebau Nochten und zu den technischen Möglichkeiten einer Verbesserung der Grundwasserbeschaffenheit. Teil 4: Integrierende Bilanzierung der kippenseitigen Verwitterungsumsätze. Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden, 11.12.2001.
[IWB 2005]	Uhlmann, W.; Seiler, D. und Günther, J.: Limnologische Einschätzung zum Neukieritzscher See (Tagebau Vereinigtes Schleenhain). Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden, 05.07.2005.
[IWB 2006]	Uhlmann, W. und Zimmermann, K.: Erarbeitung eines Gütesteuer- modells Spree zwischen den Pegeln Uhyst und Spremberg für die Flutungs- und Nachsorgephase. Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden, 24.05.2006.
[IWB 2008]	Uhlmann, W.; Zimmermann, K.; Seiler, D. und Schmidt, S.: Machbarkeitsstudie zur Herstellung einer nachhaltig ausleitfähigen Wasserbeschaffenheit in den Tagebauseen im oberen Einzugsgebiet der Spree unter Berücksichtigung des limitierten Flutungswasserdargebots. Teil 1: Referenzvariante. Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden, 15.12.2008.
[IWB 2009]	Uhlmann, W.: Erfüllung von Nebenbestimmungen der wasserrechtlichen Erlaubnis zum Tagebau Welzow-Süd. Teil 1: Maßnahmen zur Minderung/Vermeidung der Kippenversauerung bzw. ihrer Folgen. Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden, 30.11.2009.
[IWB 2009]	Uhlmann, W, und Seiler, D.: Erfassung der aktuellen und Prognose der künftigen Wasserbeschaffenheit in maßgebenden Sümpfungsbereichen des Tagebaus Reichwalde. Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden, 31.10.2009.
[IWB 2010]	Uhlmann, W. und Nestler, W.: Untersuchung der hydrochemischen und ökologischen Auswirkungen der Exfiltration von eisenhaltigem, saurem Grundwasser in die Kleine Spree (nördlich Speicher Burghammer) und in die Spree (Ruhlmühle) Abschlussbericht Teil 2: Maßnahmen. Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden, 21.05.2010.
[IWB 2011a]	Uhlmann; W.; Seiler, D. und Günther, J.: Grundwassermonitoring im Bereich der aktiven Braunkohlentagebaue der Vattenfall Europe Mining AG. Grundwassergütebericht 2011 für den Förderraum Nochten/Reichwalde. Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden, 31.08.2011.
[IWB 2011b]	Maßnahmen zur Erkundung, Überwachung und Minimierung der Folgen der Wasserbeschaffenheitsentwicklung in rückwärtigen Bereichen des Tagebaus Nochten. Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden, August 2011.
[IWB 2011c]	Uhlmann, W.; Zimmermann, K. und Theiss, S.: Weiterentwicklung des Gütesteuermodells Spree und fachliche Begleitung der angewandten Modellnutzung. Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden, 30.06.2011.

[IWB 2011d]	Seiler, D.; Uhlmann, W.; Reißmann, F. G. und Kritzner, W.: Externe Fremdbegutachtung währende des Weiterbetriebes der bestehenden Pilotanlage am Standort der GWRA Rainitza zur Verfahrenserprobung der elektrochemischen Sulfatabtrennung mit CO ₂ -Injketion. Ingenieurbüro für Wasser und Boden GmbH und Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Possendorf/Dresden, 31.07.2011.
[IWB 2011e]	Uhlmann, W.; Seiler, D. und Claus, Th.: Untersuchungen zur Formierung der Wasserbeschaffenheit des Kippengrundwassers im Tagebau Reichwalde. Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden, 18.03.2011.
[IWB 2011f]	Uhlmann, W.; Zimmermann, K.; Nestler, W.; Westphal, E.; Claus, Th.; Mansel, H. und Rakete, R.: Vorplanung einer Bewirtschaftungs- und Steuerzentrale bezüglich Sulfatlast in der unteren Pleiße. Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden, 20.11.2011.
[IWB 2012]	Uhlmann, W. und Kreutziger, Y.: Planung und Betreuung von zwei Bohrungen auf der Kippe Nochten zur Erkundung der Ammoniumbelastung, der Sulfatreduktion, der Geochemie und der Hydrochemie einschließlich Errichtung und Pumptest von zwei Grundwassergütemessstellen. Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden, 28.02.2012.
[LAUBAG 1999]	Uhlmann, W., Arnold, I. und Mietzsch, M.: Abschlussbericht zur Kippenwassergüteentwicklung im Tagebau Jänschwalde. Lausitzer Braunkohle Aktiengesellschaft, Senftenberg, 1999.
[LMBV 2003]	Restlochflutung – Maßnahmen zur Steuerung der Wasserbeschaffenheit in den Bergbaufolgeseen der Lausitz. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, Berlin, September 2003.
[LMBV 2004]	Winkler, FM.: Hydrogeologische Berechnung (Einschätzung – HE) 4. Nachtrag - "Speichersystem Lohsa II". Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft, Senftenberg, 2004.
[MIBRAG 2011]	Tagebau Vereinigtes Schleenhain - Hauptbetriebsplan 2012/2013. Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH, Zeitz, 07.10.2011.
[Obermann u.a. 1991]	Obermann, P.; van Berk, W.; Wisotzky, F. und Reichel, F.: Untersuchungen zu den Auswirkungen der Abraumkippen im Rheinischen Braunkohlenrevier auf die Grundwasserbeschaffenheit. Ruhr-Universität Bochum, Zwischenbericht, Juli 1991.
[Obermann u. a. 1993]	Obermann, P.; van Berk, W.; Wisotzky, F. und Reichel, F.: Untersuchungen zu den Auswirkungen der Abraumkippen im Rheinischen Braunkohlerevier auf die Grundwasserbeschaffenheit. Ruhr-Universität Bochum, Endbericht, 1993.
[Obermann & Kringel 1995]	Obermann, P. und Kringel, R.: Untersuchungen zu Verminderung der Auswirkungen von Braunkohlekippen im Rheinischen Braunkohlerevier auf die Grundwasserbeschaffenheit. Ruhr-Universität Bochum, Endbericht, Oktober 1995.
[Rheinbraun 1991]	Maßnahmen zur Verminderung des Stoffaustrages aus der Abraumkippe des Tagebau Garzweiler II. Rheinbraun AG, August 1991 In: MURL 1991: Materialband zu den Leitentscheidungen zum Abbauvorhaben Garzweiler II. Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein Westfalen, August 1991.
TO 11 000.13	Octor B. O confirmed to the First Park III and the first

[Seiler 2001] Seiler, D.: Quantifizierung des Eisendisulfidumsatzes in einer Braunkohleabraumkippe der Lausitz auf der Grundlage von Betriebsaufzeichnungen zur Tagebautechnologie. Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, 13.06.2001.

[LMBV 2008c]

Seite 169

[TUBAF 1998] Hoth, Niels. u. a.: Entwicklung eines numerischen Modells zur

Beschreibung und Simulation instationärer hydrogeochemischer Transportprozesse im Grundwasser der Kippe des Tagebaus Jänschwalde und in deren Abstrom. Abschlußbericht, Freiberg,

September 1998.

[VEM 2008] Umwelt 2008. Vattenfall Europe AG, Berlin, 2008.

9.3 Informationsmaterial

J.J	momation	isinaterial
[LfULG	2009]	Erlass zur Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie in vom Braun-kohlenbergbau beeinflussten Grundwasserkörpern. Hintergrundpapier zur Begründung für Ausnahmen von Bewirtschaftungszielen, -fristen und –anforderungen für die im deutschen Teil der Flussgebietseinheiten Elbe und Oder durch den Braunkohlenbergbau und den Sanierungsbergbau beeinflussten Grundwasserkörper in Übereinstimmung mit der EG-Wasserrahmenrichtlinie. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, 2009.
[LMBV	2007]	Wandlungen und Perspektiven - Teil 3: Sedlitz/Skado/Koschen. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg, 2007.
[LMBV	2008a]	Lausitzer Braunkohlenrevier - Wandlungen und Perspektiven -

[LMBV 2008a] Lausitzer Braunkohlenrevier - Wandlungen und Perspektiven - Teil 7: Spreetal/Bluno. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg, 2008.

[LMBV 2008b] Lausitzer Braunkohlenrevier - Wandlungen und Perspektiven - Teil 8: Burghammer/Scheibe. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg, 2008.

Lausitzer Braunkohlenrevier - Wandlungen und Perspektiven - Teil 9: Lohsa/Dreiweibern. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-

Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg, 2008.

[LMBV 2008d] Niederschrift über die 4. Fachberatung zur "Wiederherstellung des Wasserhaushaltes in der Lausitz – erreichter Stand, weitere Aufgaben

und Lösungen". Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft, Senftenberg, 10.01.2008..

[LMBV 2009a] Mitteldeutsches Braunkohlenrevier - Wandlungen und Perspektiven -

Teil 1: Holzweißig/Goitzsche/Rösa. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg, 2009.

[LMBV 2009b] Lausitzer Braunkohlenrevier - Wandlungen und Perspektiven -

Teil 11: Erika/Laubusch. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-

Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg, 2009.

[LMBV 2010a] Mitteldeutsches Braunkohlenrevier - Wandlungen und Perspektiven -

Teil 2: Espenhain. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-

Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg, 2010.

[LMBV 2010b] Mitteldeutsches Braunkohlenrevier - Wandlungen und Perspektiven -

Teil 4: Böhlen/Zwenkau/Cospuden. Lausitzer und Mitteldeutsche

Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg, 2010.

[LMBV 2010c] Mitteldeutsches Braunkohlenrevier - Wandlungen und Perspektiven -

Teil 7: Borna-Ost/Bockwitz. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-

Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg, 2010.

[LMBV 2010d]	Mitteldeutsches Braunkohlenrevier - Wandlungen und Perspektiven - Teil 8: Witznitz. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg, 2010.
[LMBV 2010e]	Lausitzer Braunkohlenrevier - Wandlungen und Perspektiven - Teil 12: Bärwalde. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg, 2010.
[LMBV 2010f]	Lausitzer Braunkohlenrevier – Wandlungen und Perspektiven - Teil 13: Berzdorf. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungs- gesellschaft mbH, Senftenberg, 2010.
[LMBV 2011a]	Lausitzer Braunkohlenrevier – Wandlungen und Perspektiven - Teil 17: Werminghoff/Knappenrode. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg, 2011.
[LMBV 2011b]	Mitteldeutsches Braunkohlenrevier – Wandlungen und Perspektiven - Teil 9: Haselbach/Schleenhain. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg, 2011.
[LMBV 2012]	Sanierungsbericht 2011: Daten, Fakten und Informationen zur Braun- kohlensanierung in Mitteldeutschland und der Lausitz im Jahr 2011. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg, 2012.
[MIBRAG 2010a]	Tagebau Vereinigtes Schleenhain – Besucherinformation. MIBRAG Pressestelle, Zeitz, 2010.
[MIBRAG 2010b]	Tagebau Profen – Besucherinformation. MIBRAG Pressestelle, Zeitz, 2010.
[RWE 2006]	Ökologie im Nordrevier – Wasser für die Feuchtgebiete. Infothek Forschung und Entwicklung, RWE Power AG, Essen, 2006. http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/de/346066/data/345780/4/rwe/innovationen/services/infothek-forschung-entwicklung/infothek-downloadbereich/wasser-fuer-feuchtgebiete-pdf.pdf
[VEM 2008]	Investitionen für die Region – Der Weiterbetrieb des Tagebaus Reichwalde. www.vattenfall.de/standortkarte/kraftwerke/pdf/fb_tgb_rw_kw_boxR.pdf, Stand September 2008, abgerufen am 06.12.2011.
[VEM 2010]	Aus Braunkohle wird Energie - Braunkohlentagebau Nochten. www.vattenfall.de/standortkarte/kraftwerke/pdf/fb_tgb_no_kw_box.pdf, Stand März 2010, abgerufen am 06.12.2011.

9.4 Internet

[www-1]	http://www.ostkohle.de/html/delitzsch.html, Abruf am 01.03.2012.
[www-2]	http://www.ostkohle.de/html/breitenfeld.html, Abruf am 01.03.2012.
[Tienz 2012]	Tienz, BSt.: Umgang mit den Folgen des Grundwasserwiederanstiegs in den LMBV-Sanierungsbereichen Mitteldeutschlands. Fachkonferenz Wasserwirtschaftliche Maßnahmen in der Bergbaufolgelandschaft Mitteldeutschland. Leipzig, 2012. http://www.lmbv.de/
[Benthaus 2012]	Benthaus, CF.: Innovative Verfahren zur Verbesserung der Gewässerbeschaffenheit.

Fachkonferenz Wasserwirtschaftliche Maßnahmen in der

Bergbaufolgelandschaft Mitteldeutschland. Leipzig, 2012. http://www.lmbv.de/



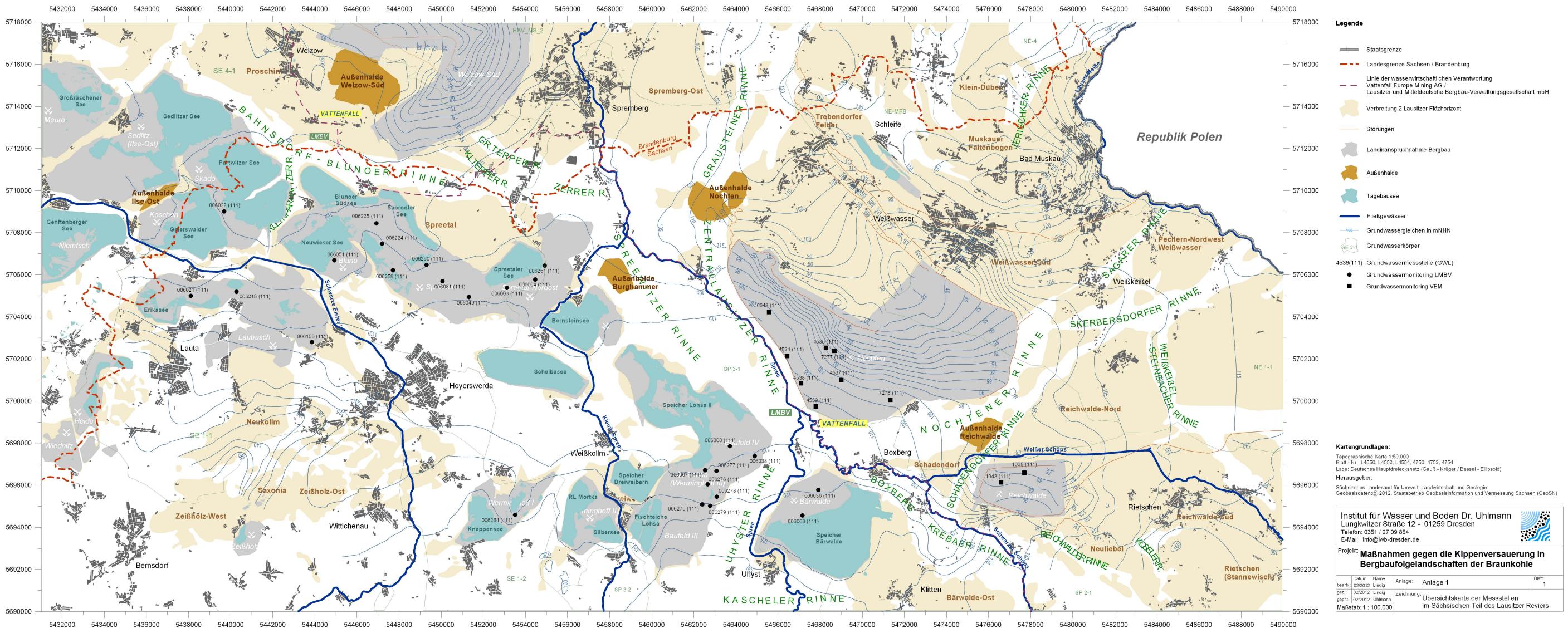
Für das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

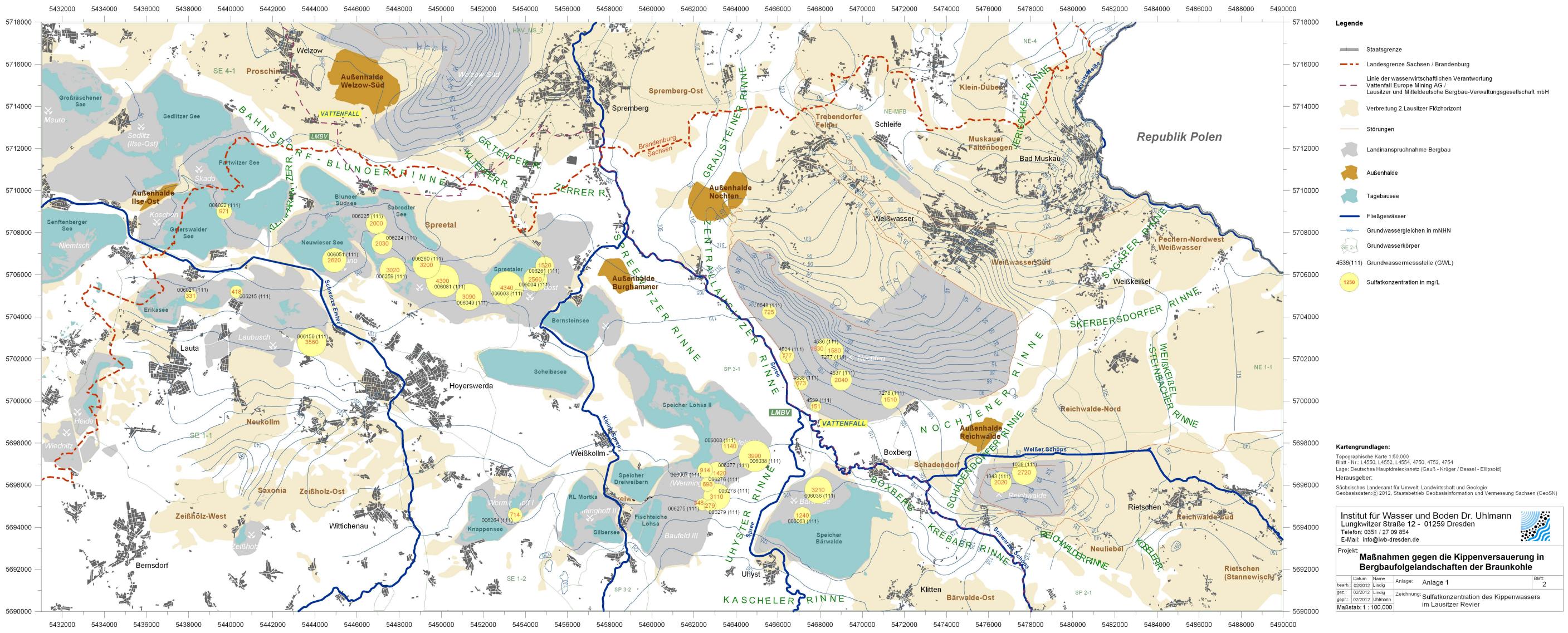
Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

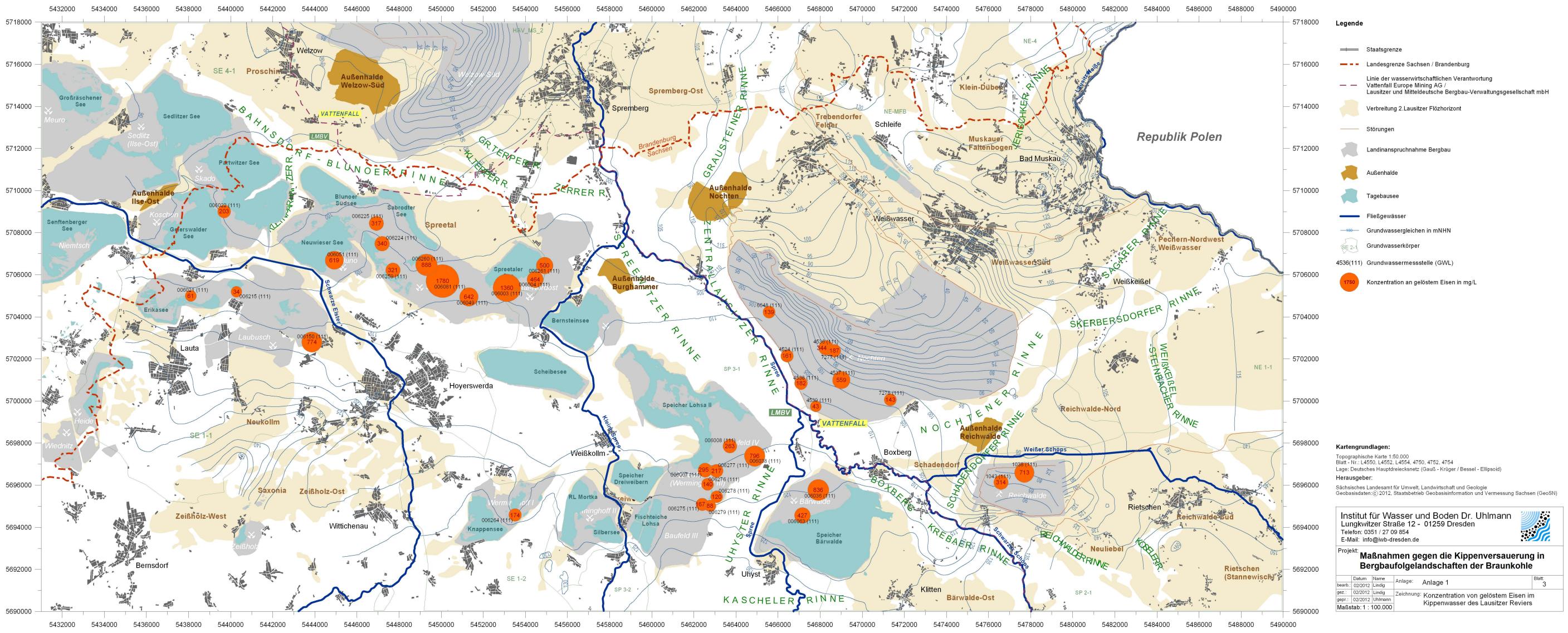
Abschlussbericht

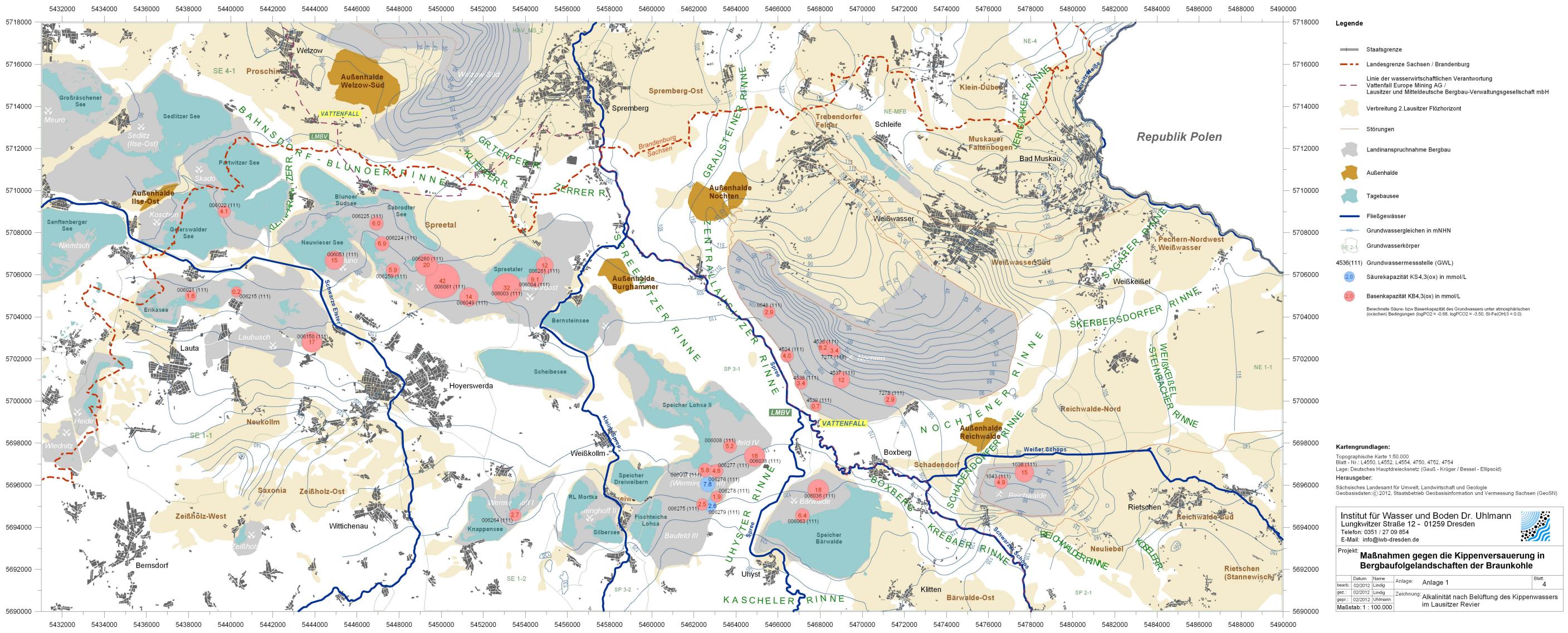
Anlage 1

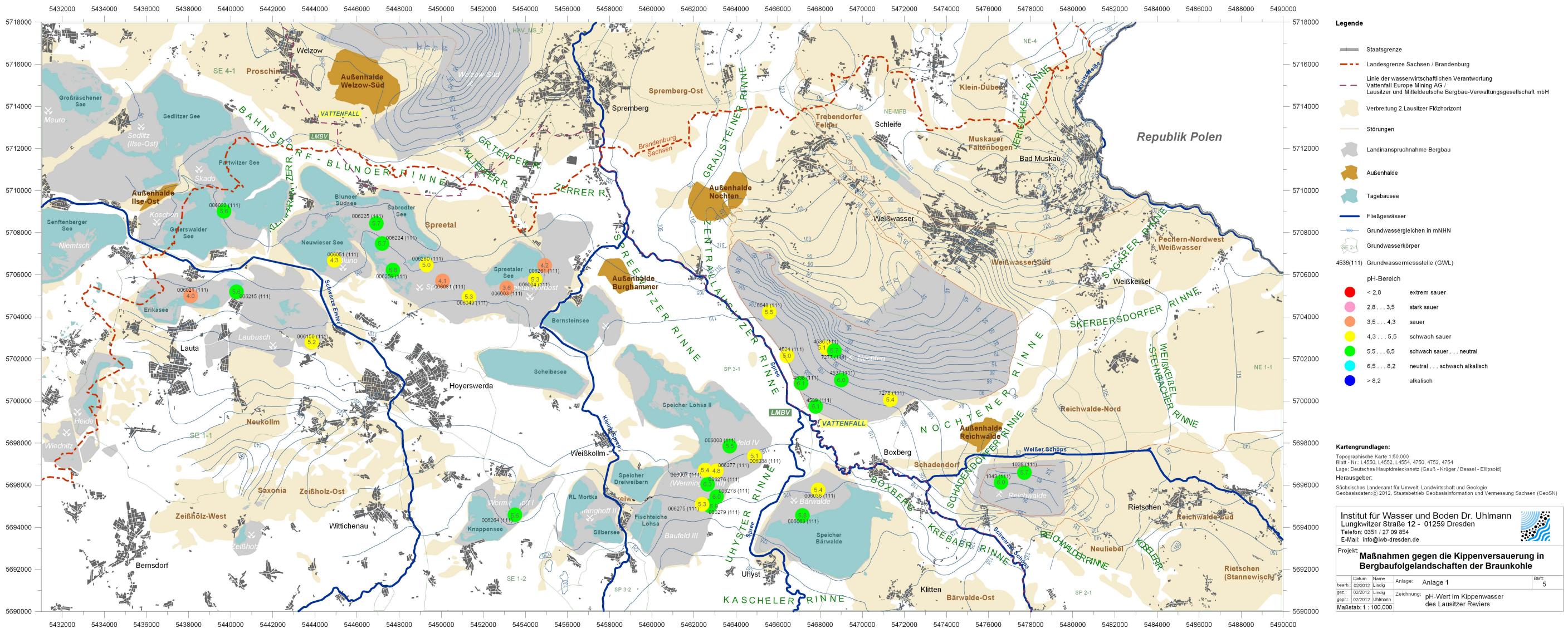
Karten des hydrochemischen Zustandes des Kippenwassers im ostsächsischen Lausitzer Revier

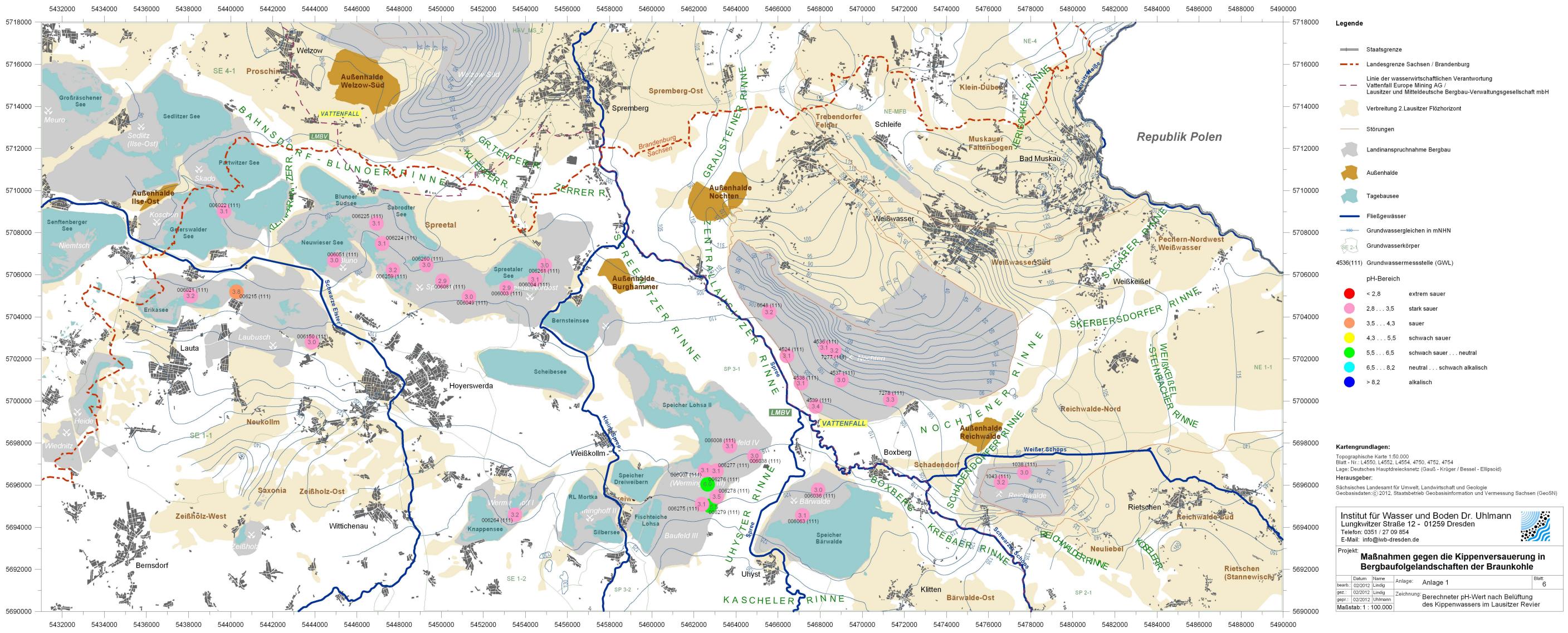














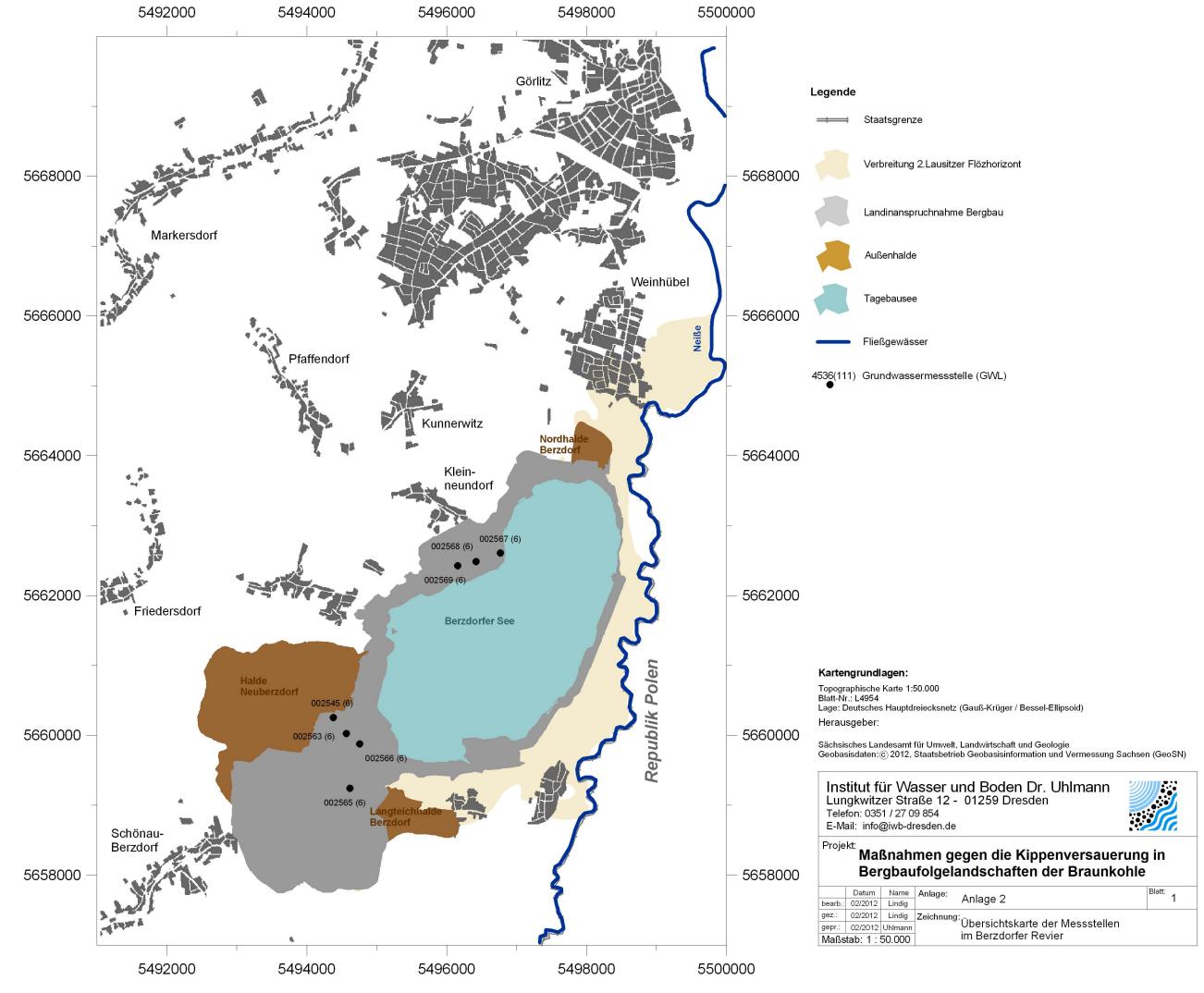
Für das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

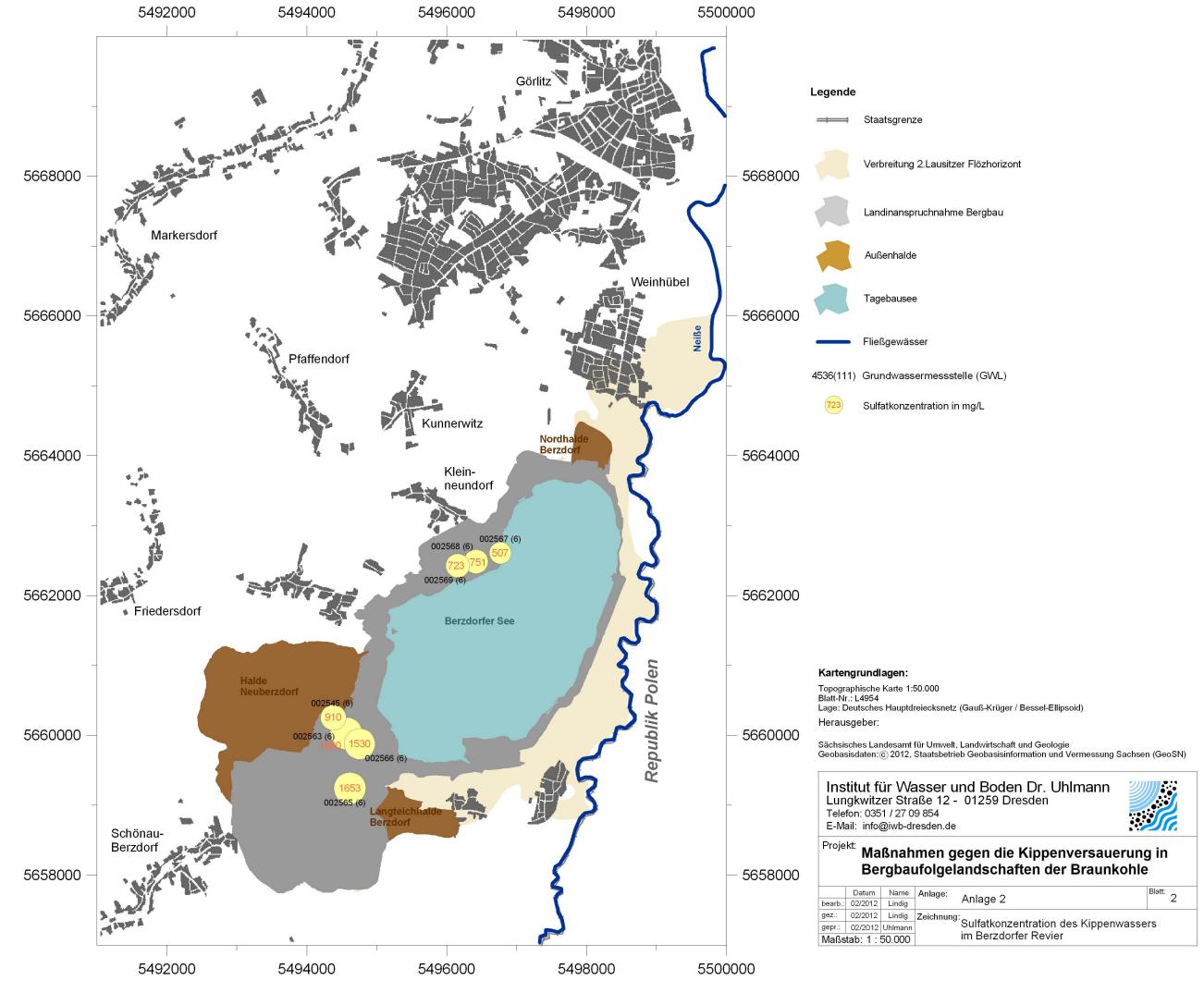
Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

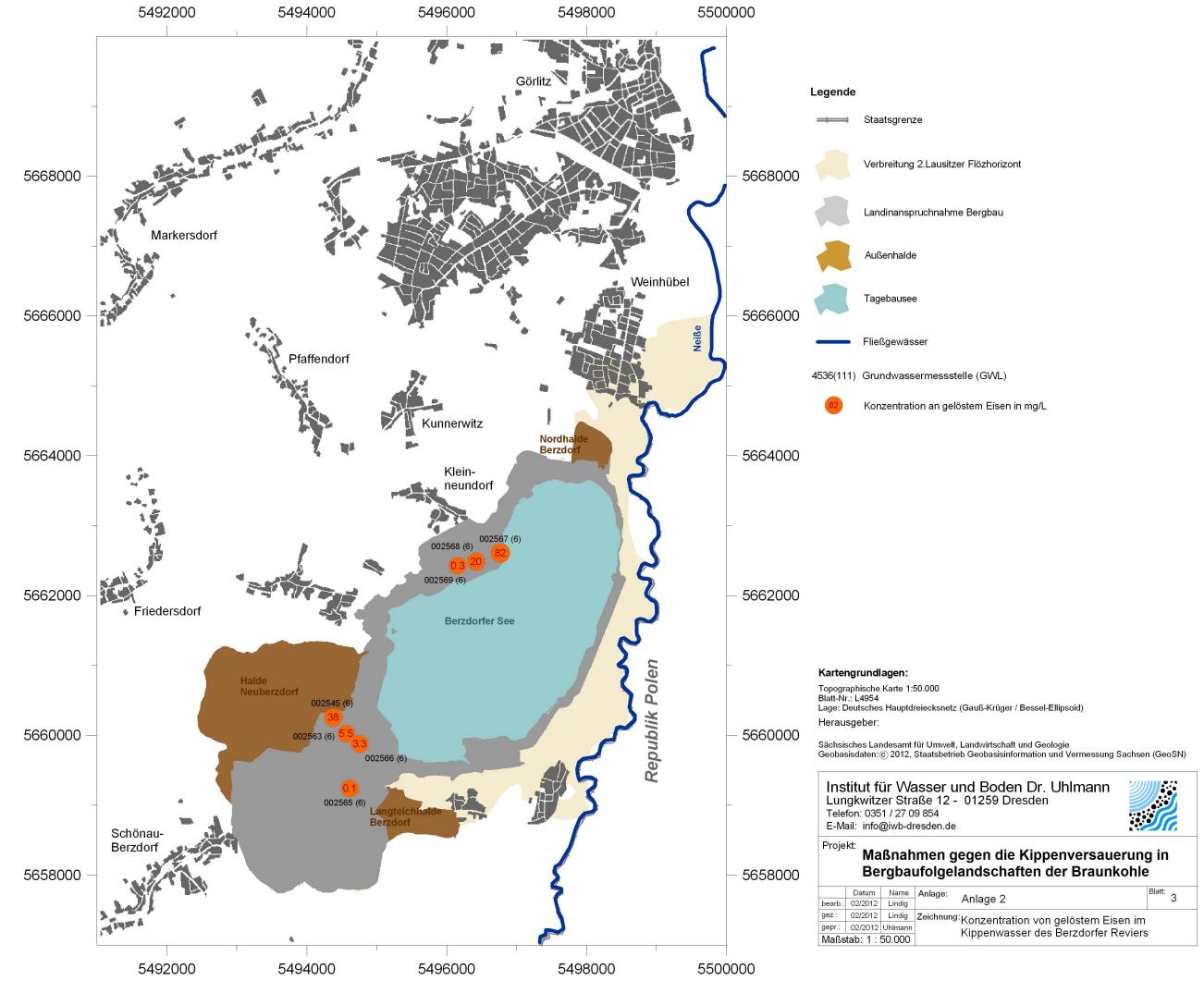
Abschlussbericht

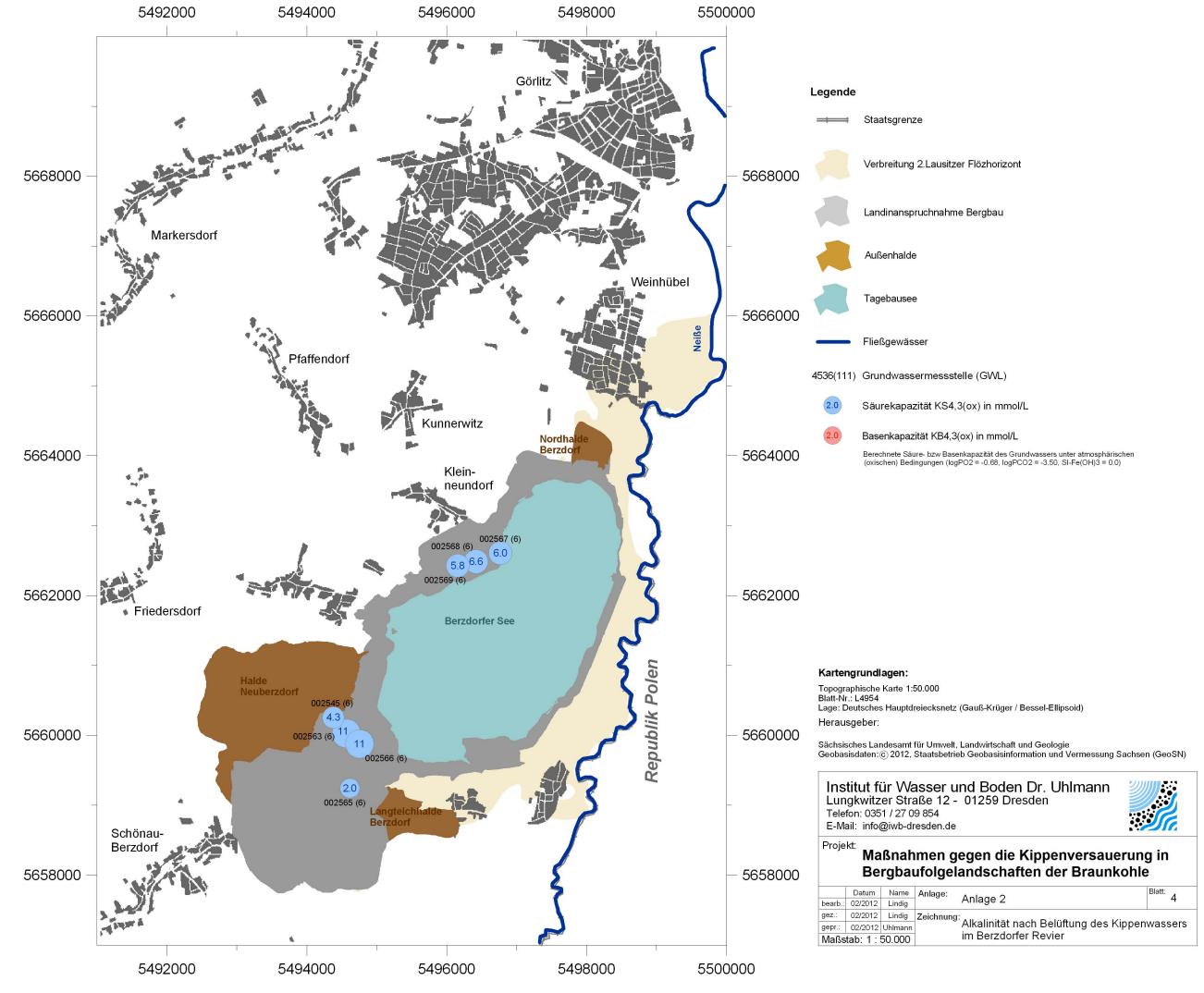
Anlage 2

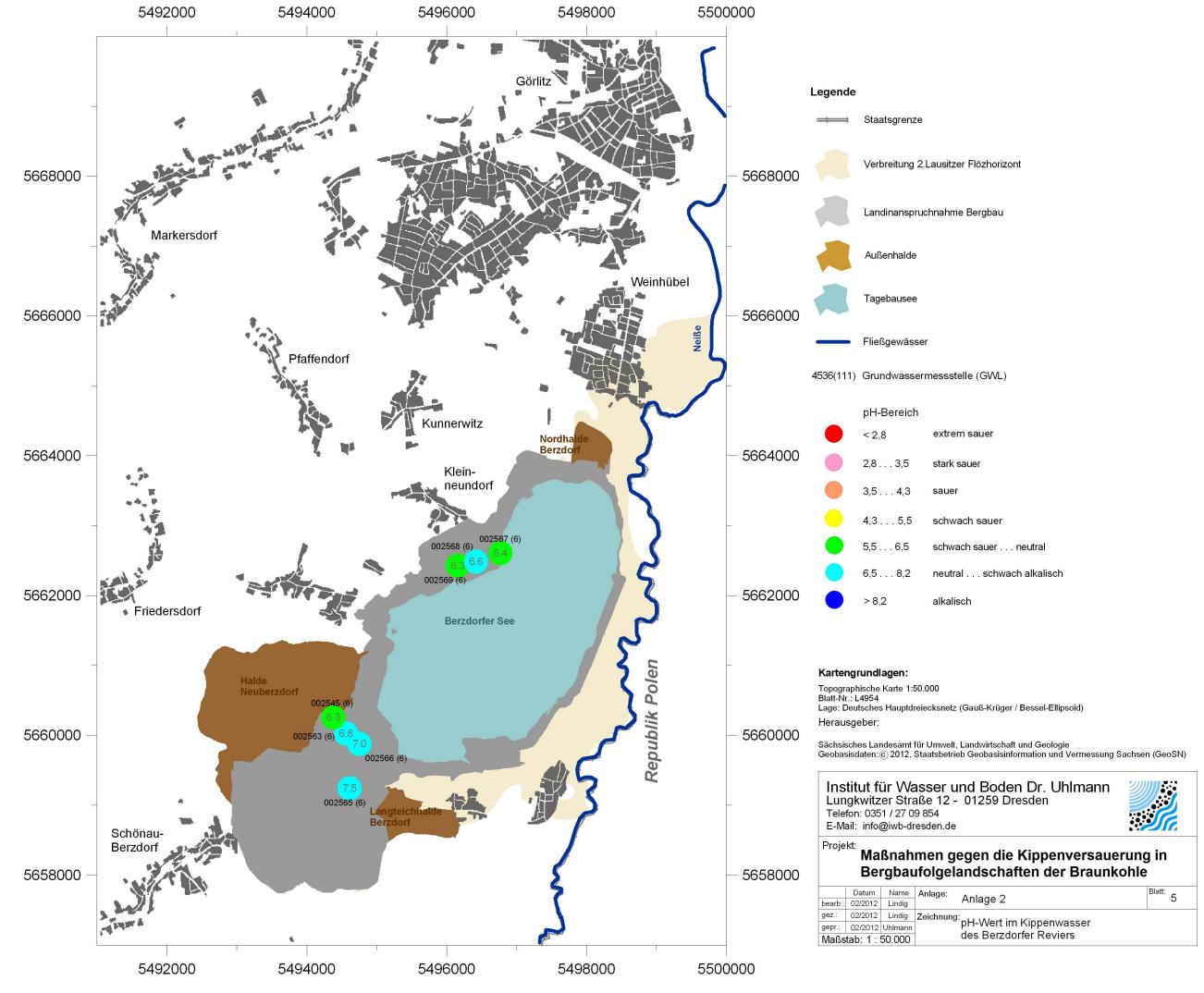
Karten des hydrochemischen Zustandes des Kippenwassers im ostsächsischen Lausitzer Revier: Tagebau Berzdorf

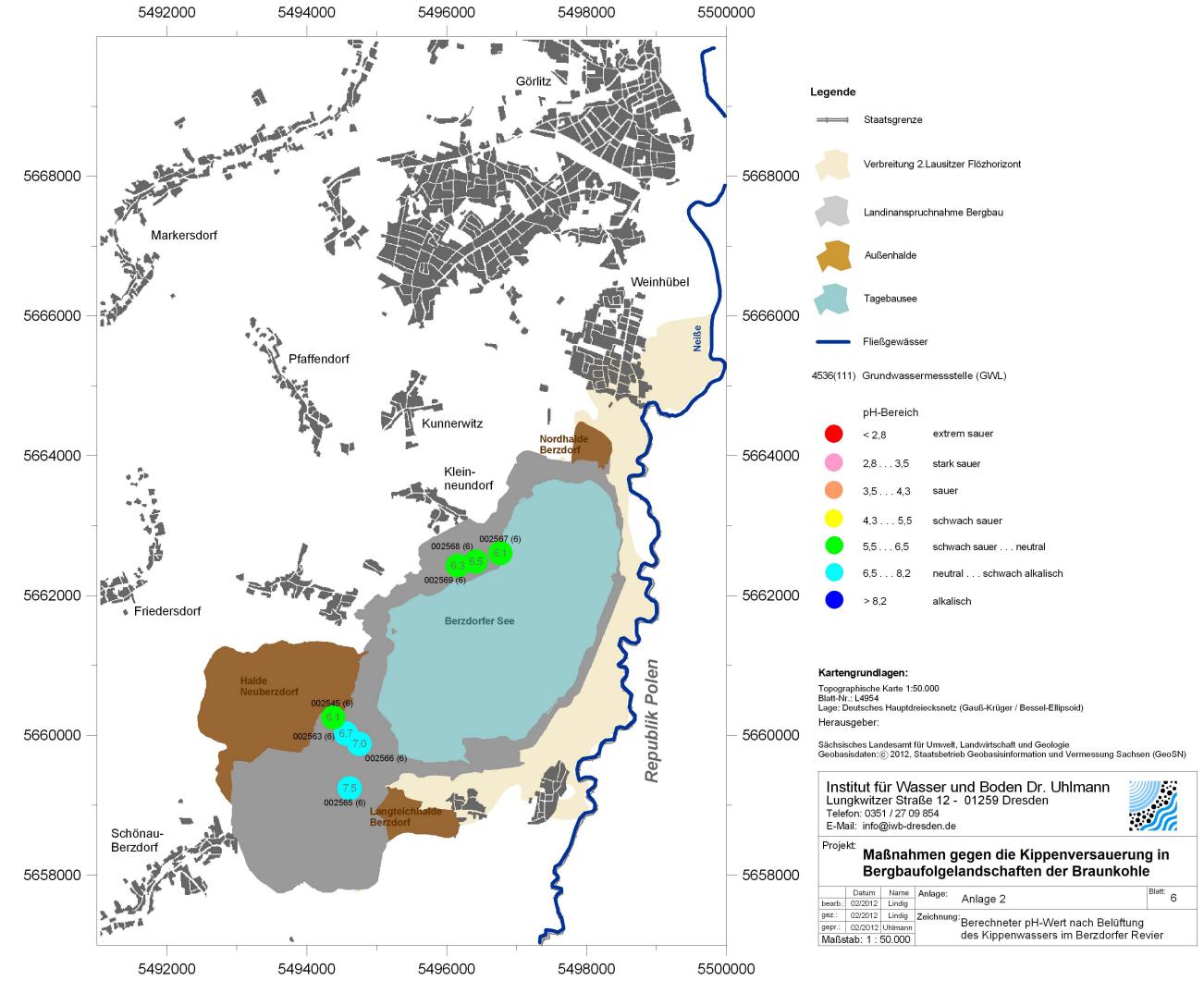












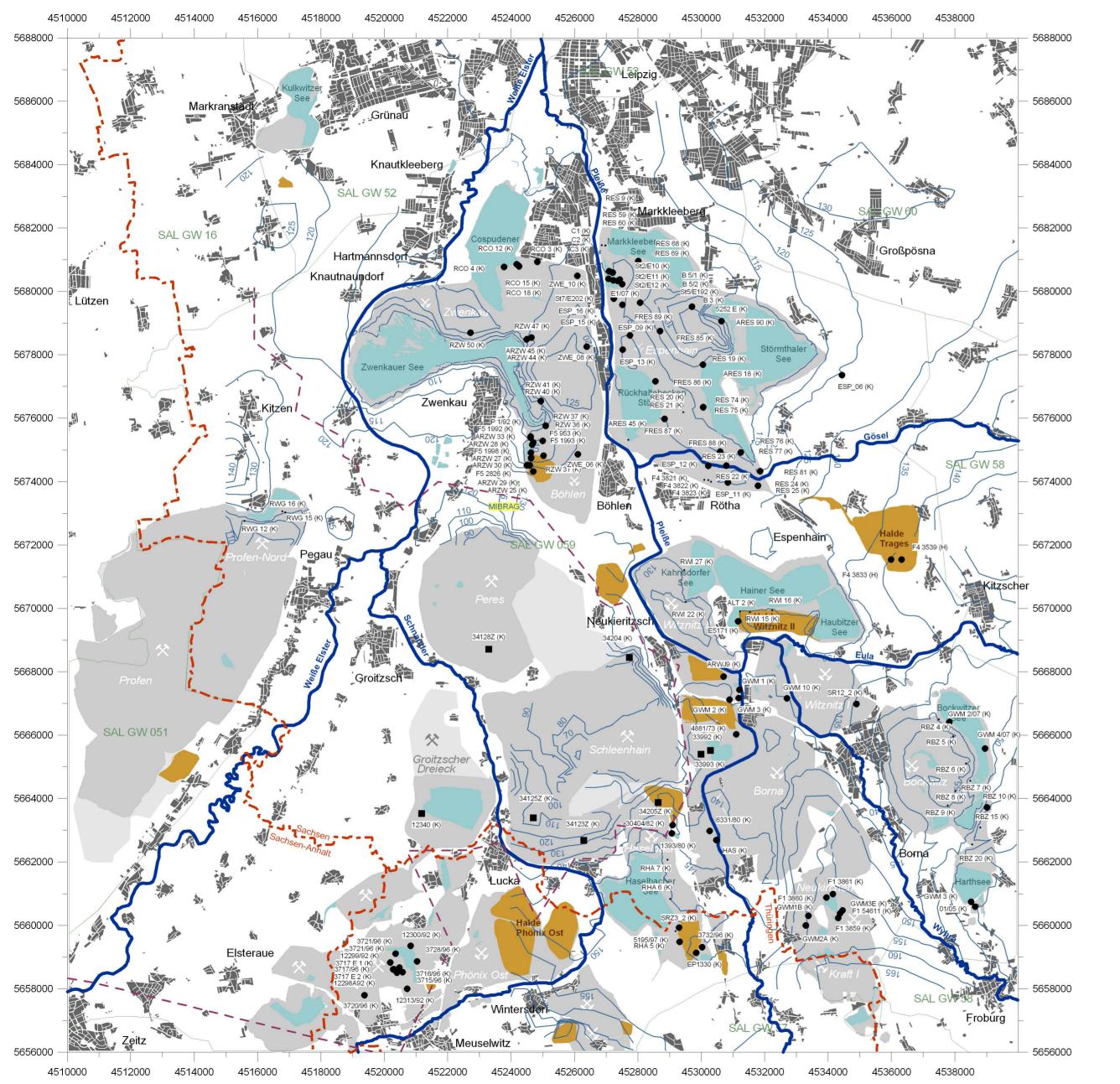


Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

Abschlussbericht

Anlage 3

Karten des hydrochemischen Zustandes des Kippenwassers im ostsächsischen Lausitzer Revier: Südraum Leipzig



Landesgrenze Sachsen / Sachsen-Anhalt / Thüringen

Linie der wasserwirtschaftlichen Verantwortung Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH /
Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH

Grundwasserkörper

Landinanspruchnahme Bergbau

Außenhalde

Tagebausee

Fließgewässer

Grundwassergleichen in mNHN

Grundwassermessstelle (GWL)

Grundwassermonitoring LMBV Grundwassermonitoring MIBRAG

Kartengrundlagen:

Topographische Karte 1:50.000 Blatt - Nr.: L4550, L4552, L4554, 4750, 4752, 4754 Lage: Deutsches Hauptdreiecksnetz (Gauß - Krüger / Bessel - Ellipsoid)

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Geobasisdaten: © 2012, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN)

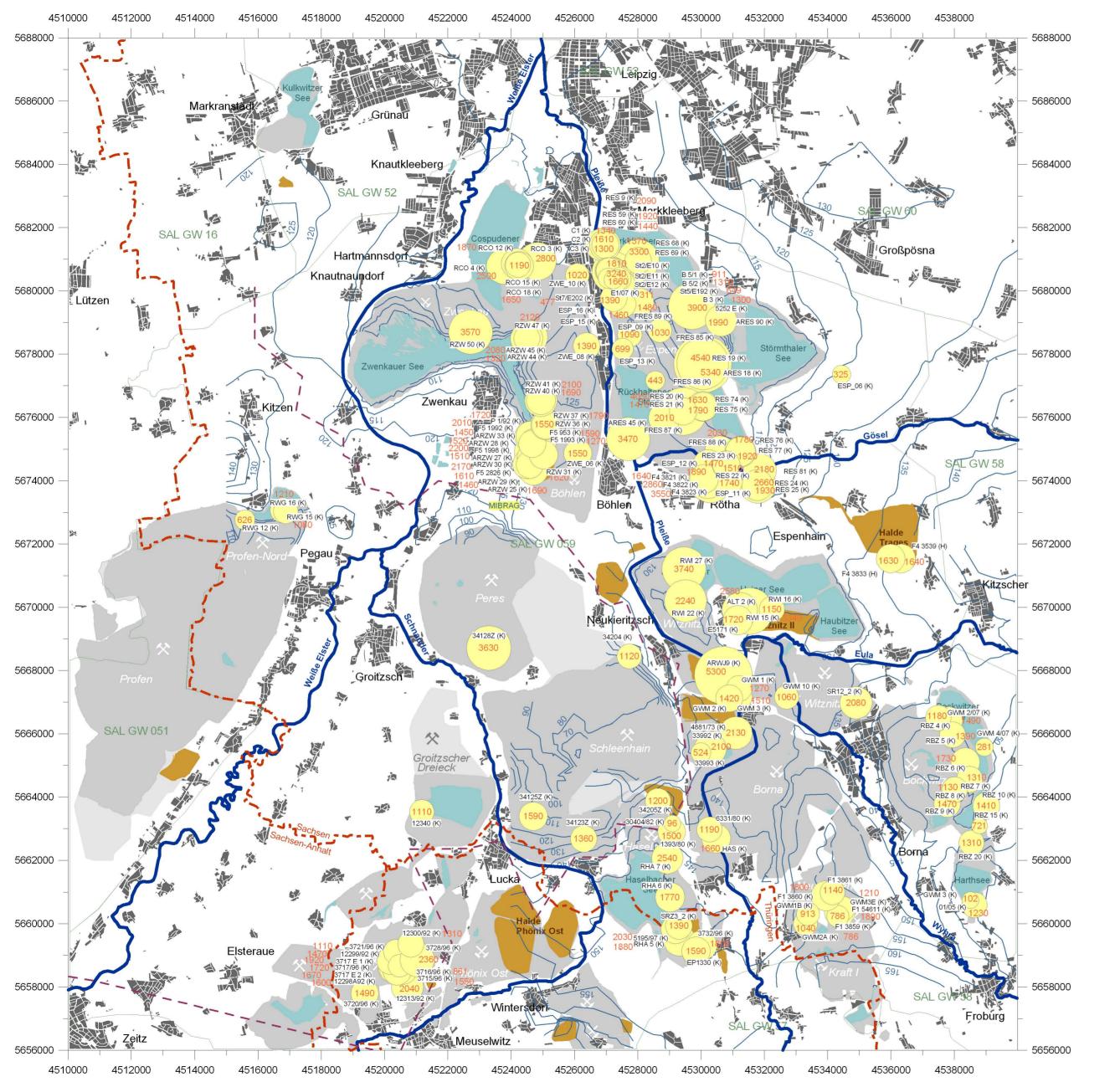
Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann Lungkwitzer Straße 12 - 01259 Dresden

Telefon: 0351 / 27 09 854

E-Mail: info@iwb-dresden.de

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

	Datum	Name	Anlage:	Anlaga 2	Blatt:	4
bearb.:	02/2012	Lindig	, unago.	Anlage 3		1
gez.:	02/2012	Lindig	Zeichnung:	.00		
gepr.:	02/2012	Uhlmann		Zeichnung: Übersichtskarte der Messstellen		
Maßs	stab:1:	100.000				zig



Linie der wasserwirtschaftlichen Verantwortung
Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH /
Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH

Grundwasserkörper

Landinanspruchnahme Bergbau

Außenhalde

Tagebausee

Fließgewässer

Grundwassergleichen in mNHN

Grundwassermessstelle (GWL)

Sulfatkonzentration in mg/L

Kartengrundlagen:

Topographische Karte 1:50.000 Blatt - Nr.: L4550, L4552, L4554, 4750, 4752, 4754 Lage: Deutsches Hauptdreiecksnetz (Gauß - Krüger / Bessel - Ellipsoid)

Herausgeber:

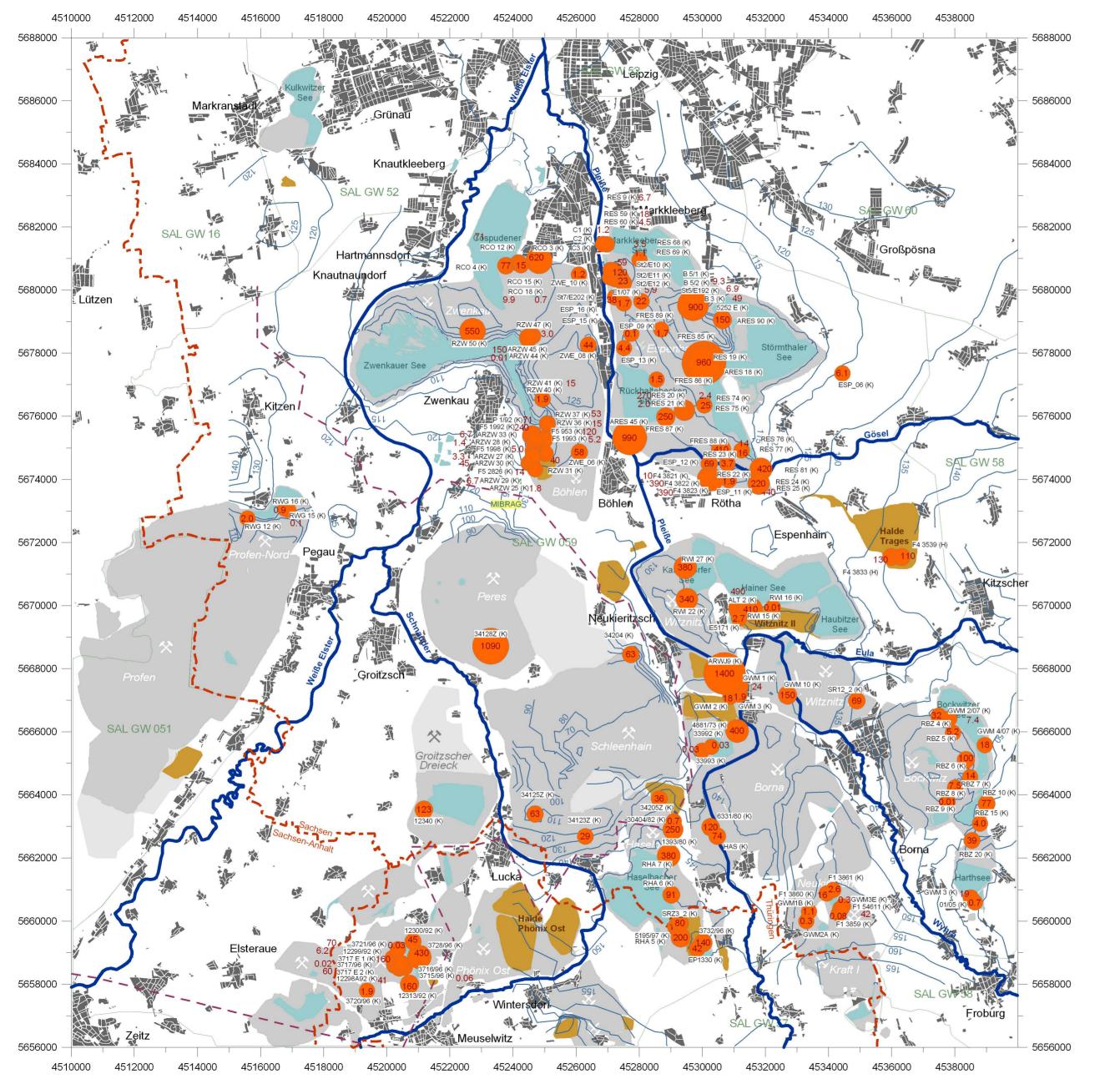
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Geobasisdaten:ⓒ 2012, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN)

Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann Lungkwitzer Straße 12 - 01259 Dresden



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

	Datum	Name	Anlage:	Anlana 2	Blatt:
bearb.:	02/2012	Lindig	/ illage.	Anlage: Anlage 3	
gez.:	02/2012	Lindig	Zeichnung	II	•
gepr.:	02/2012	Uhlmann	Zeichnung: Sulfatkonzentration des Kippenwassers		ers
Maßstab: 1 : 100.000				im Mitteldeutschen Revier - Südraum	Leipzig



 Landesgrenze Sachsen / Sachsen-Anhalt / Thüringen
 Linie der wasserwirtschaftlichen Verantwortung
 Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH / Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH

Grundwasserkörper

Landinanspruchnahme Bergbau

Außenhalde

Tagebausee

Fließgewässer
Grundwassergleichen in mNHN

4536(K) Grundwassermessstelle (GWL)

1750 Konzentration an gelöstem Eisen in mg/L

Kartengrundlagen:

Topographische Karte 1:50.000 Blatt - Nr.: L4550, L4552, L4554, 4750, 4752, 4754 Lage: Deutsches Hauptdreiecksnetz (Gauß - Krüger / Bessel - Ellipsoid)

Herausgebe

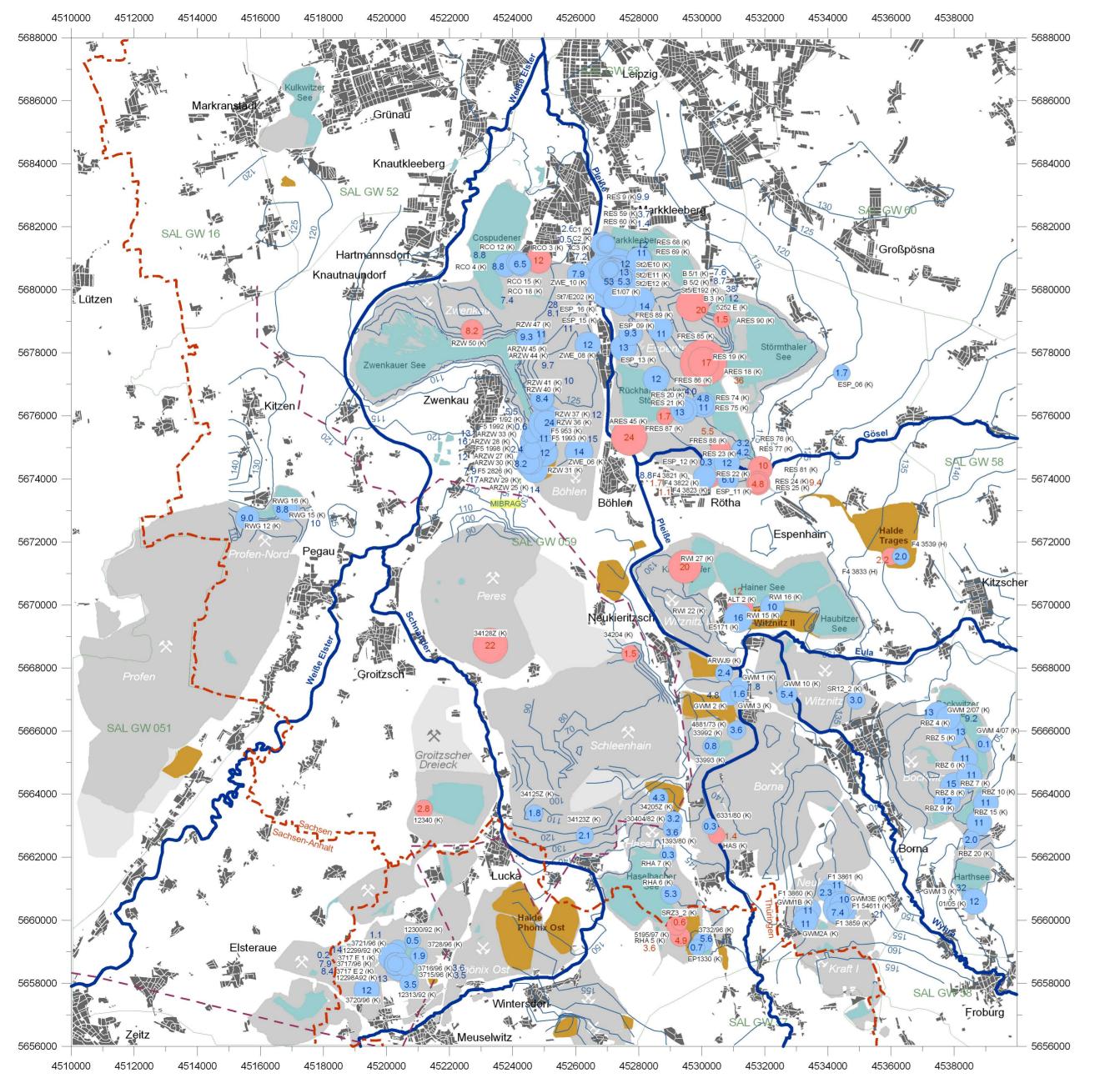
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Geobasisdaten: © 2012, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN)

Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann Lungkwitzer Straße 12 - 01259 Dresden

Telefon: 0351 / 27 09 854 E-Mail: info@iwb-dresden.de

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

	Datum	Name	Anlage:	Anlage 3	Blatt:
bearb.:	02/2012	Lindig	, anago.	Arriage 3	
gez.:	02/2012	Lindig	Zeichnung	:	
gepr.:	02/2012	Uhlmann	Konzentration von gelöstem Eisen im Kippenwass		penwasser
Maßstab:1:100.000		des	s Mitteldeutschen Reviers - Südraum Le	eipzig	



Landesgrenze Sachsen / Sachsen-Anhalt / Thüringen

Linie der wasserwirtschaftlichen Verantwortung

Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH /
Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH

Grundwasserkörper

Landinanspruchnahme Bergbau

Außenhalde

Tagebausee

Fließgewässer

Grundwassergleichen in mNHN

Grundwassermessstelle (GWL)

Säurekapazität KS4,3(ox) in mmol/L

Basenkapazität KB4,3(ox) in mmol/L

Berechnete Säure- bzw Basenkapazität des Grundwassers unter atmosphärischen (oxischen) Bedingungen (logPO2 = -0.68, logPCO2 = -3.50, SI-Fe(OH)3 = 0.0)

Kartengrundlagen:

Blatt - Nr.: L4550, L4552, L4554, 4750, 4752, 4754 Lage: Deutsches Hauptdreiecksnetz (Gauß - Krüger / Bessel - Ellipsoid)

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

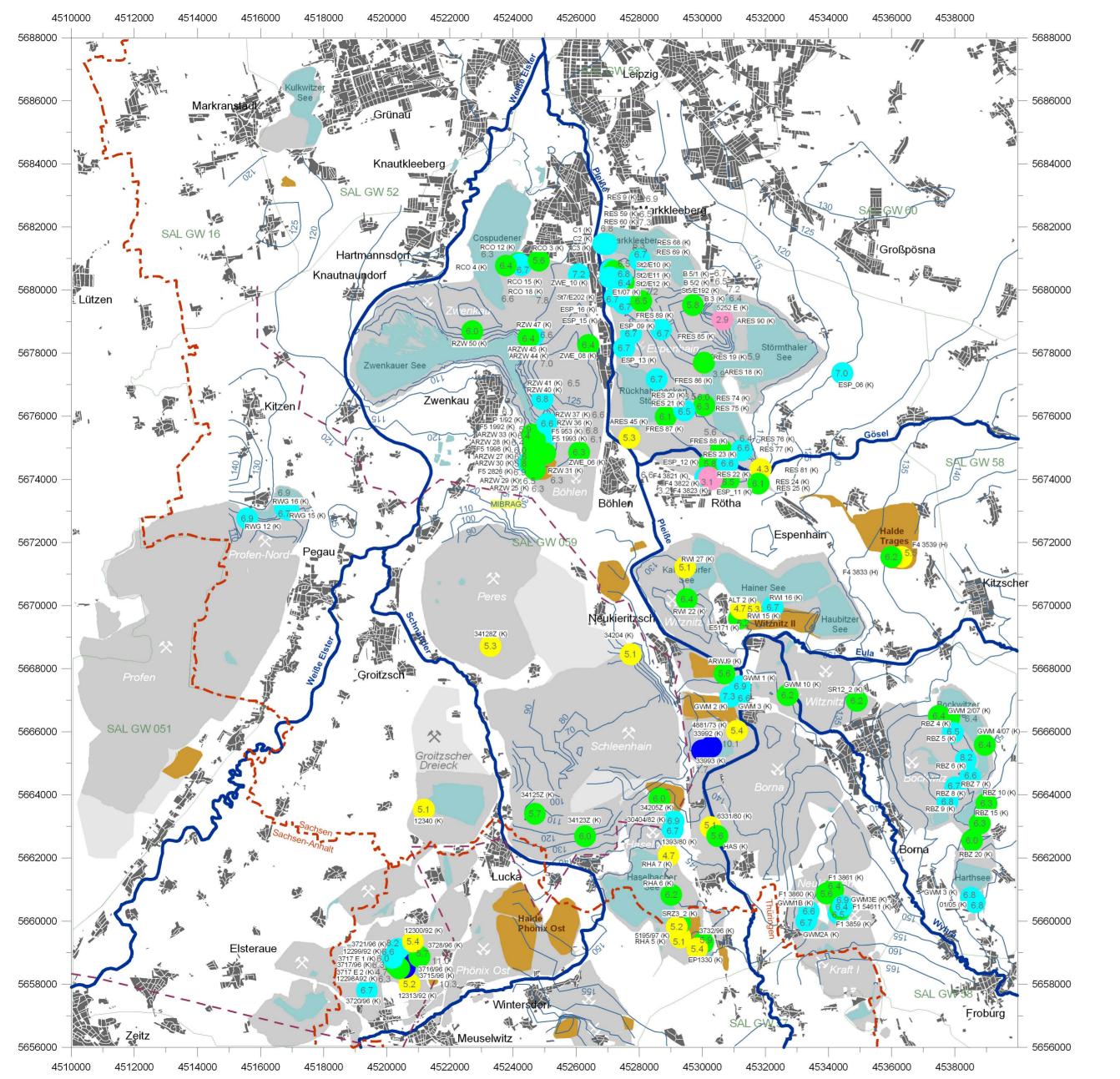
Geobasisdaten:© 2012, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN)

Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann Lungkwitzer Straße 12 - 01259 Dresden

Telefon: 0351 / 27 09 854 E-Mail: info@iwb-dresden.de

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

	Datum	Name	Anlage:	Anlogo 2	Blatt:
bearb	02/2012	Lindig	, anago.	Anlage 3	4
gez.:	02/2012	Lindig	Zeichnung:		
gepr.	02/2012	Uhlmann]	Zeichnung: Alkalinität nach Belüftung des Kippenwasse	
Maß	stab:1:	100.000	im Mitteldeutschen Revier - Südraum Le		า Leipzig



Landesgrenze Sachsen / Sachsen-Anhalt / Thüringen Linie der wasserwirtschaftlichen Verantwortung Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH /
Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH Grundwasserkörper Landinanspruchnahme Bergbau Außenhalde Tagebausee Fließgewässer Grundwassergleichen in mNHN Grundwassermessstelle (GWL) pH-Bereich < 2.8 extrem sauer 2,8 . . . 3,5 stark sauer 3,5 . . . 4,3 sauer 4,3 . . . 5,5 schwach sauer 5,5 . . . 6,5 schwach sauer . . . neutral neutral . . . schwach alkalisch

Kartengrundlagen:

Topographische Karte 1:50.000 Blatt - Nr.: L4550, L4552, L4554, 4750, 4752, 4754 Lage: Deutsches Hauptdreiecksnetz (Gauß - Krüger / Bessel - Ellipsoid)

alkalisch

erausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Geobasisdaten: © 2012, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN)

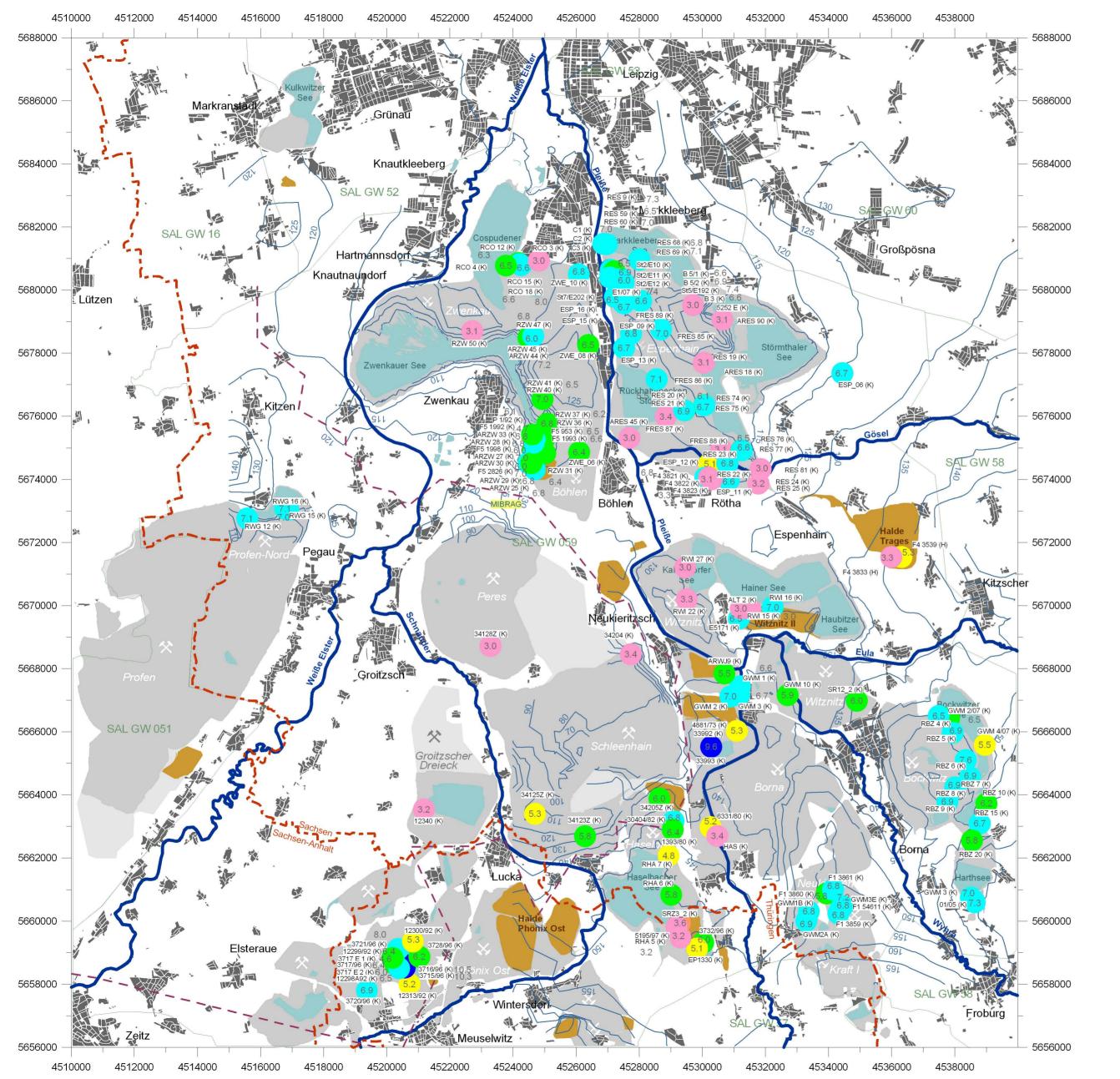
______g -assessing ______g

Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann Lungkwitzer Straße 12 - 01259 Dresden Telefon: 0351 / 27 09 854 E-Mail: info@iwb-dresden.de



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

			Amage.		
bearb.:	02/2012	Lindig	, unago.	Anlage 3	5
gez.:	02/2012	Lindig	Zeichnung	·	
gepr.:	02/2012	Uhlmann		pH-Wert im Kippenwasser	
Maßs	tab:1:	100.000			ım Leipzig



Landesgrenze Sachsen / Sachsen-Anhalt / Thüringen Linie der wasserwirtschaftlichen Verantwortung Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH /
Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH Grundwasserkörper Landinanspruchnahme Bergbau Außenhalde Tagebausee Fließgewässer Grundwassergleichen in mNHN Grundwassermessstelle (GWL) pH-Bereich < 2.8 extrem sauer 2,8 . . . 3,5 stark sauer 3,5 . . . 4,3 sauer 4,3 . . . 5,5 schwach sauer 5,5 . . . 6,5 schwach sauer . . . neutral neutral . . . schwach alkalisch

Kartengrundlagen:

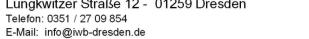
Topographische Karte 1:50.000 Blatt - Nr.: L4550, L4552, L4554, 4750, 4752, 4754 Lage: Deutsches Hauptdreiecksnetz (Gauß - Krüger / Bessel - Ellipsoid)

alkalisch

erausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Geobasisdaten:ⓒ 2012, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN)

Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann Lungkwitzer Straße 12 - 01259 Dresden





Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

	Datum	Ivallie	Anlage:	Anlage 3	Diatt.
bearb.:	02/2012	Lindig	, anago.	Alliage 3	0
gez.:	02/2012	Lindig	Zeichnung	: Berechneter pH-Wert nach Belüftund	des
gepr.:	02/2012	Uhlmann		Kippenwassers im Mitteldeutschen Reviers -	
Maßstab: 1 : 100.000 Südraum Leipzig					

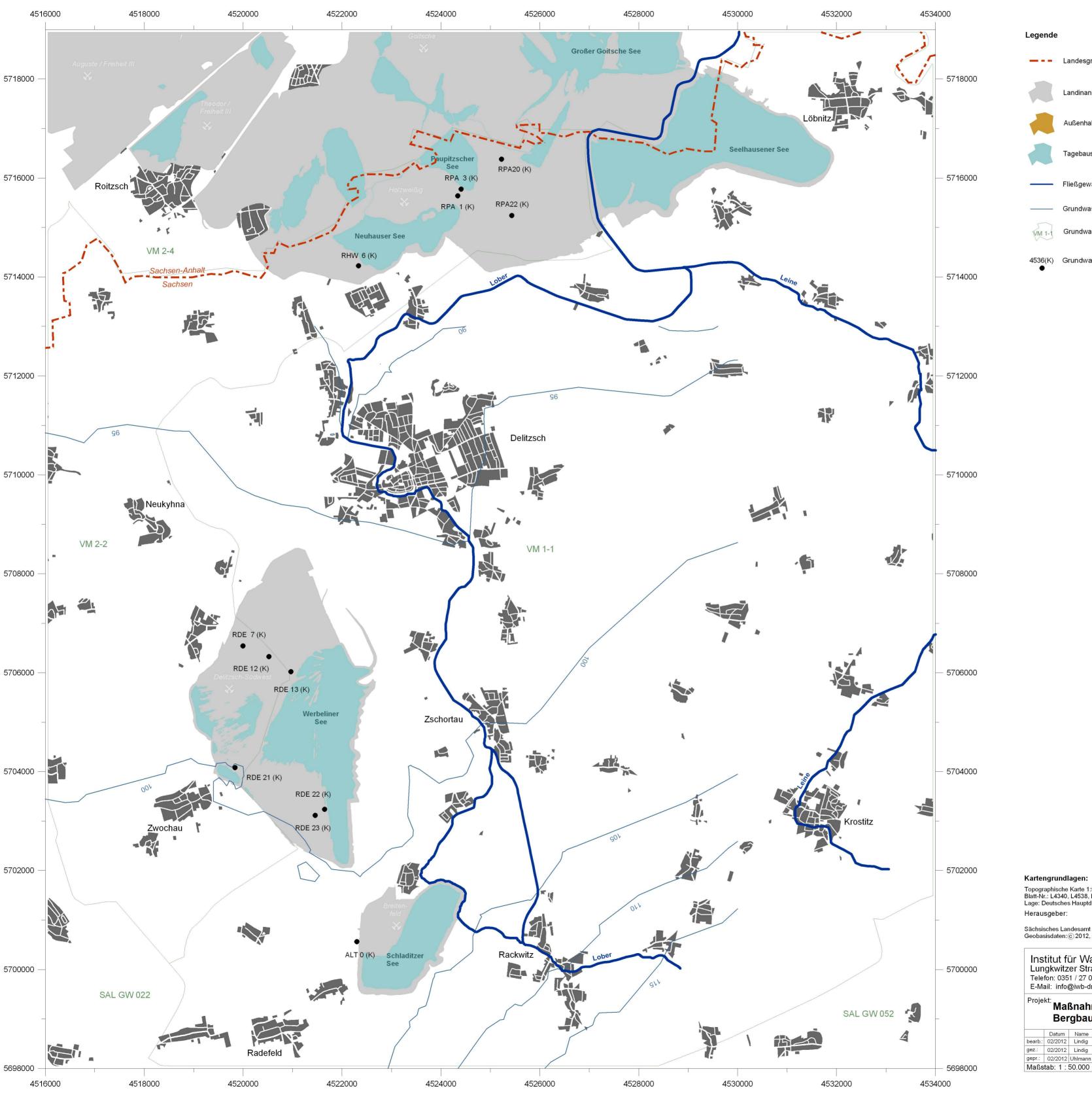


Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

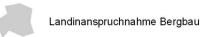
Abschlussbericht

Anlage 4

Karten des hydrochemischen Zustandes des Kippenwassers im ostsächsischen Lausitzer Revier: Nordraum Leipzig



- - Landesgrenze Sachsen / Sachsen-Anhalt



Außenhalde



Grundwassergleichen mNHN

Grundwasserkörper

4536(K) Grundwassermessstelle (GWL)

Kartengrundlagen:

Topographische Karte 1:50.000 Blatt-Nr.: L4340, L4538, L4540 Lage: Deutsches Hauptdreiecksnetz (Gauß-Krüger / Bessel-Ellipsoid) Herausgeber:

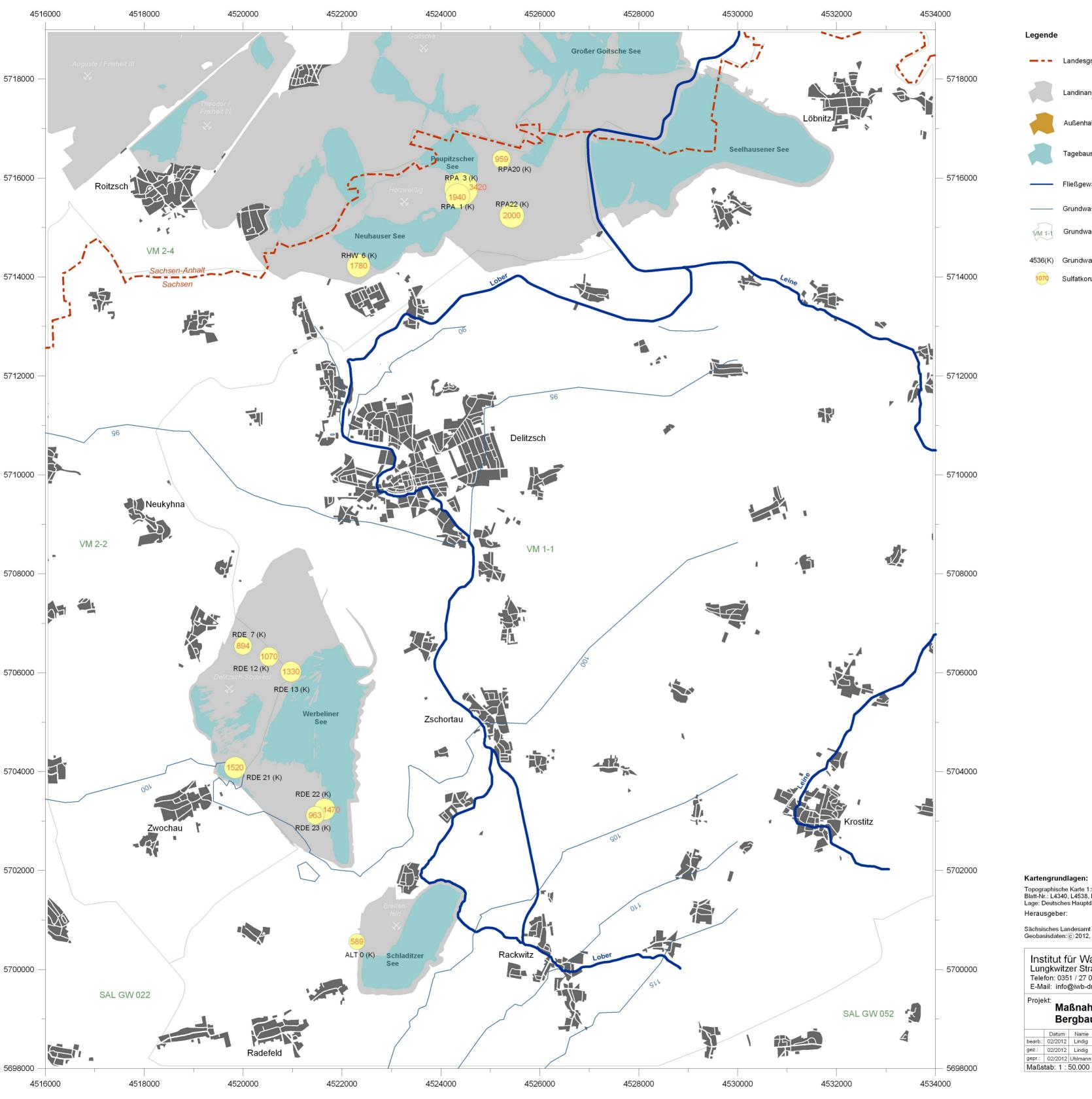
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Geobasisdaten:ⓒ 2012, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN)

Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann Lungkwitzer Straße 12 - 01259 Dresden Telefon: 0351 / 27 09 854 E-Mail: info@iwb-dresden.de



im Mitteldeutschen Revier - Nordraum Leipzig

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle Datum Name bearb.: 02/2012 Lindig Anlage: Anlage 4 gez.: 02/2012 Lindig Zeichnung: Übersichtskarte der Messstellen



- - Landesgrenze Sachsen / Sachsen-Anhalt







Grundwassergleichen mNHN

Grundwasserkörper

4536(K) Grundwassermessstelle (GWL)

Sulfatkonzentration in mg/L

Kartengrundlagen:

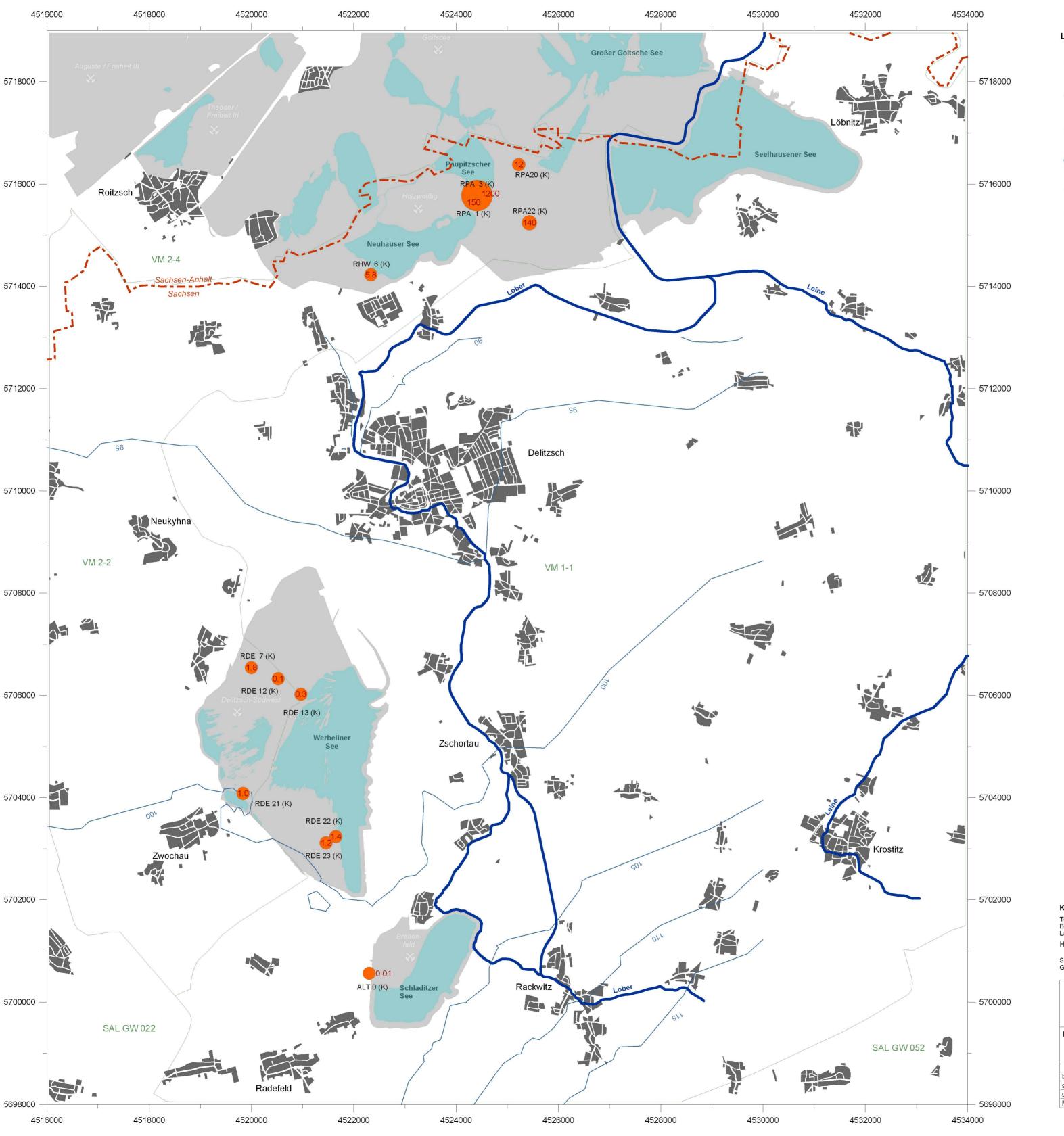
Topographische Karte 1:50.000 Blatt-Nr.: L4340, L4538, L4540 Lage: Deutsches Hauptdreiecksnetz (Gauß-Krüger / Bessel-Ellipsoid) Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Geobasisdaten:ⓒ 2012, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN)

Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann Lungkwitzer Straße 12 - 01259 Dresden Telefon: 0351 / 27 09 854 E-Mail: info@iwb-dresden.de



Datum Name Anlage: Anlage 4 gez.: 02/2012 Lindig Zeichnung: Sulfatkonzentration des Kippenwassers im Mitteldeutschen Revier - Nordraum Leipzig



Landesgrenze Sachsen / Sachsen-Anhalt







Fließgewässer

—— Grundwassergleichen mNHN

Grundwasserkörper

4536(K) Grundwassermessstelle (GWL)

140 Sulfatkonzentration in mg/L

Kartengrundlagen:

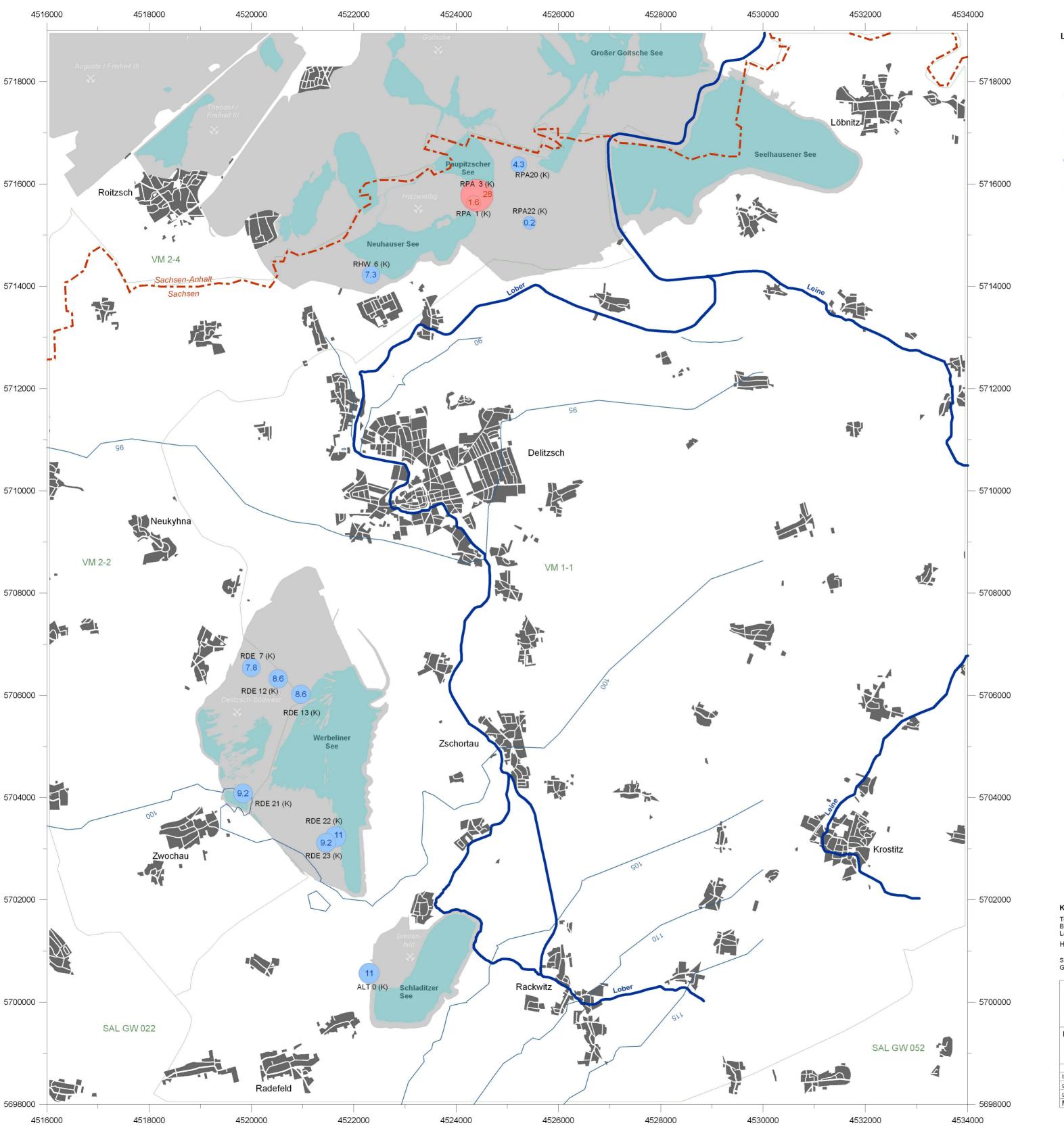
Topographische Karte 1:50.000 Blatt-Nr.: L4340, L4538, L4540 Lage: Deutsches Hauptdreiecksnetz (Gauß-Krüger / Bessel-Ellipsoid) Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Geobasisdaten:ⓒ 2012, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN)

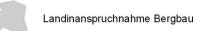
Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann Lungkwitzer Straße 12 - 01259 Dresden Telefon: 0351 / 27 09 854 E-Mail: info@iwb-dresden.de



Datum	Name	Anlage:	Anlana 1	Blatt:	3
02/2012	Lindig		Aniage 4		5
02/2012	Lindig	Zeichnung:	Konzentration von gelöstem Eisen im		
02/2012	Uhlmann	Kippenwasser im Mitteldeutschen Revier -		-	
tab: 1 :	50.000		Nordraum Leipzig		
	02/2012 02/2012 02/2012	02/2012 Lindig 02/2012 Lindig	02/2012 Lindig 02/2012 Lindig Zeichnung: 02/2012 Uhlmann	O2/2012 Lindig O2/2012 Lindig O2/2012 Uhlmann O2/2012 Uhlmann O2/2012 Uhlmann O2/2012 Uhlmann O2/2012 Uhlmann O2/2012 Uhlmann	O2/2012 Lindig O2/2012 Lindig O2/2012 Lindig O2/2012 Uhlmann Kippenwasser im Mitteldeutschen Revier



- - Landesgrenze Sachsen / Sachsen-Anhalt





Außenhalde

Grundwassergleichen mNHN

Grundwasserkörper

Fließgewässer

4536(K) Grundwassermessstelle (GWL)

Säurekapazität KS4,3(ox) in mmol/L

Basenkapazität KB4,3(ox) in mmol/L

Berechnete Säure- bzw Basenkapazität des Grundwassers unter atmosphärischen (oxischen) Bedingungen (logPO2 = -0.68, logPCO2 = -3.50, SI-Fe(OH)3 = 0.0)

Kartengrundlagen:

Topographische Karte 1:50.000 Blatt-Nr.: L4340, L4538, L4540 Lage: Deutsches Hauptdreiecksnetz (Gauß-Krüger / Bessel-Ellipsoid) Herausgeber:

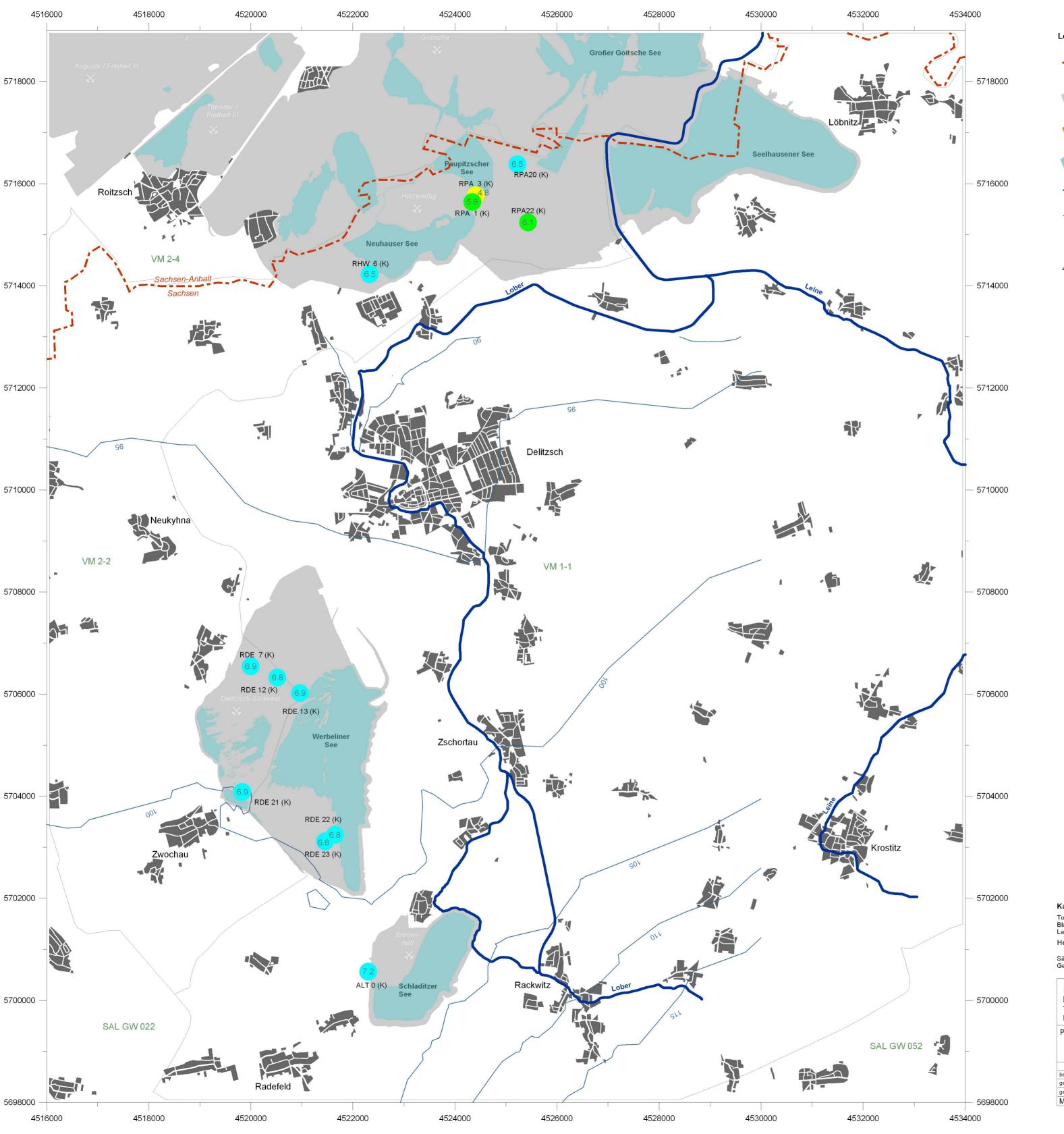
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Geobasisdaten:ⓒ 2012, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN)

Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann Lungkwitzer Straße 12 - 01259 Dresden Telefon: 0351 / 27 09 854 E-Mail: info@iwb-dresden.de



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle Datum Name Anlage: Anlage 4

gez.: 02/2012 Lindig Zeichnung: Alkalinität nach Belüftung des Kippenwassers im Mitteldeutschen Revier - Nordraum Leipzig Maßstab: 1:50.000



Landesgrenze Sachsen / Sachsen-Anhalt



Außenhalde



--- Fließgewässer

Grundwassergleichen mNHN

Grundwasserkörper

4536(K) Grundwassermessstelle (GWL)

pH-Bereich

< 2,8 extrem sauer
 2,8...3,5 stark sauer
 3,5...4,3 sauer
 4,3...5,5 schwach sauer
 5,5...6,5 schwach sauer ... ne

> 8,2 alkalisch

neutral . . . schwach alkalisch

Kartengrundlagen:

Topographische Karte 1:50.000 Blatt-Nr.: L4340, L4538, L4540 Lage: Deutsches Hauptdreiecksnetz (Gauß-Krüger / Bessel-Ellipsoid) Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Geobasisdaten:ⓒ 2012, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN)

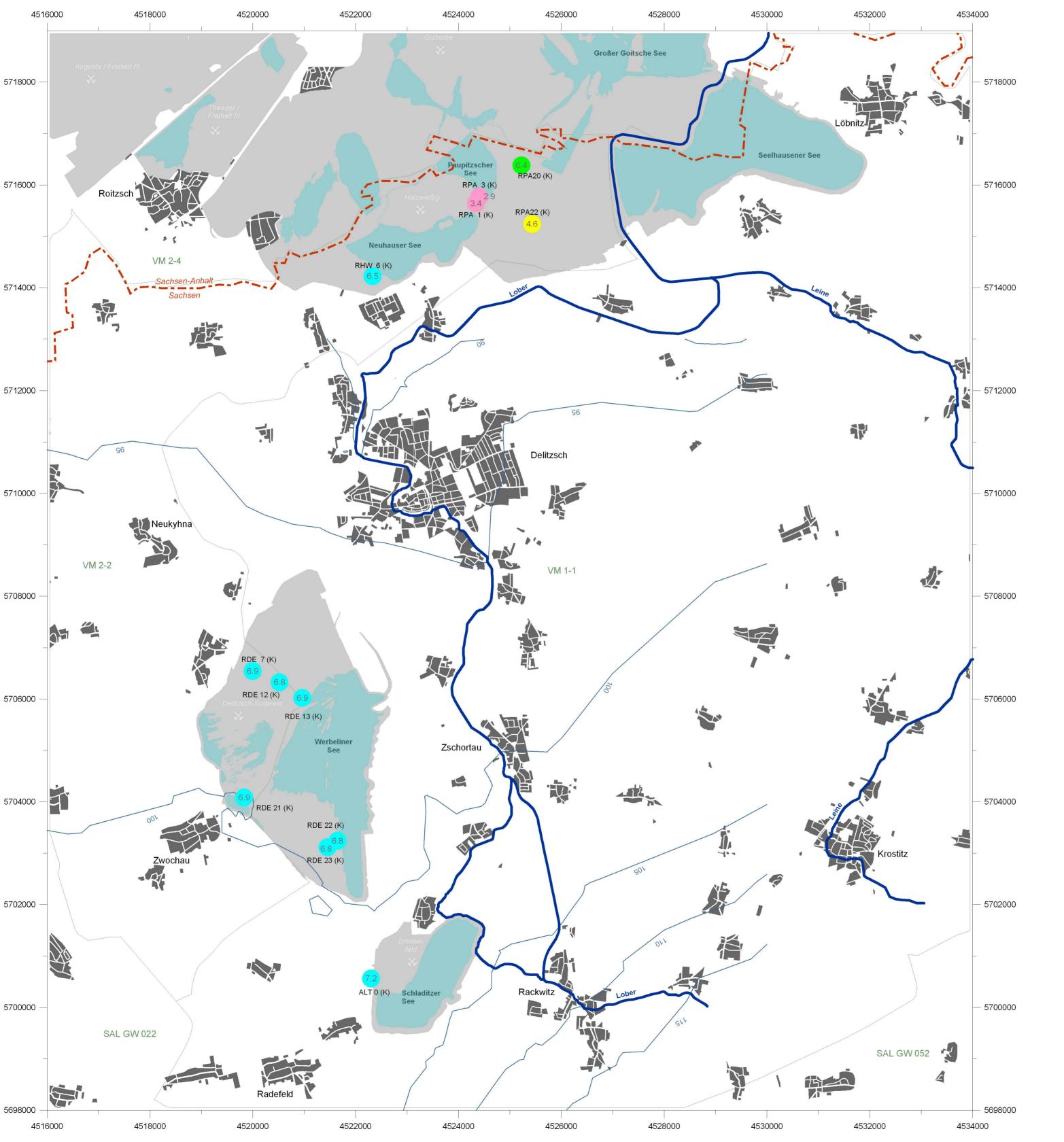
Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann Lungkwitzer Straße 12 - 01259 Dresden Telefon: 0351 / 27 09 854 E-Mail: info@iwb-dresden.de

E-Mail: info@iwb-dresden.de

Projekt:

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in
Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

Datum Name bearb: 02/2012 Lindig gez.: 02/2012 Lindig gepr.: 02/2012 Uhlmann Maßstab: 1:50.000 Anlage: Anlage 4 Blatt: 5



- - Landesgrenze Sachsen / Sachsen-Anhalt



Außenhalde



Fließgewässer

— Grundwassergleichen mNHN

Grundwasserkörper

4536(K) Grundwassermessstelle (GWL)

pH-Bereich

< 2,8 extrem sauer
 2,8 . . . 3,5 stark sauer
 3,5 . . . 4,3 sauer
 4,3 . . . 5,5 schwach sauer
 5,5 . . . 6,5 schwach sauer . . . neu

neutral . . . schwach alkalisch

> 8,2 alkalisch

Kartengrundlagen:

Topographische Karte 1:50.000 Blatt-Nr.: L4340, L4538, L4540 Lage: Deutsches Hauptdreiecksnetz (Gauß-Krüger / Bessel-Ellipsoid) Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Geobasisdaten:ⓒ 2012, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN)

Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann Lungkwitzer Straße 12 - 01259 Dresden Telefon: 0351 / 27 09 854 E-Mail: info@iwb-dresden.de



	Datum	Name	Anlage:	A	Blatt:
bearb.:	02/2012	Lindig		Anlage 4	0
gez.:	02/2012	Lindig	Zeichnung	:Berechneter pH-Wert nach Belüftung	,
gepr.:	02/2012	Uhlmann		des Kippenwassers im Mitteldeutsche	en Revier
Maßs	tab: 1 :	50.000		Nordraum Leipzig	
				<u> </u>	



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

Abschlussbericht

Anlage 5

Skala der Bewertungskriterien

Bewertungsskalen

Bewertungsskala zum Grad der Verhinderung/Minderung der Pyritverwitterung bzw. der Kippenversauerung

Bewertung	Grad der Verringerung der Pyritverwitterung und der Versauerung	
sehr hoch	> 90%	
hoch	70% 90%	
mittel	30% 70%	
gering	10% 30%	
sehr gering	< 10%	

Bewertungsskala der Dimensionen des Wirkungsraumes von Maßnahmen

Bewertung	Wirktiefe	zum Vergleich	zum Vergleich
	in m	im Tagebau	außerhalb des Tagebaus
sehr gering	<1	Einarbeitungstiefe land- und forst- wirtschaftlicher Maßnahmen	
gering	< 1 2	durchwurzelte Bodenzone	
mittel	2 10	künftiger Grundwasserflurabstand	
hoch	10 20	Mächtigkeit der Vorkippe	Teilbereich des Grundwasser- leiters (z. B. obere Lamelle)
sehr hoch	> 20	gesamte Kippenmächtigkeit	gesamter Grundwasserleiter

Bewertungsskala der erforderlichen Dauer der Durchführung von Maßnahmen

Bewertung	Dauer der Maßnahme	zum Vergleich
sehr kurz	<1a	
kurz	1 10 a	
mittel	10 30 a	
lang	30 100 a	Betriebsdauer des Tagebaus
sehr lang	> 100 a	Abschluss des GWWA

Bewertungsskala der Wirkungsdauer von Maßnahmen

Bewertung	Wirksamkeit der Maßnahme	zum Vergleich
sehr kurz	<1a	
kurz	1 10 a	
mittel	10 30 a	
lang	30 100 a	Betriebsdauer des Tagebaus
sehr lang	> 100 a	Abschluss des GWWA



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle - Abschlussbericht

Bewertungsskala des Entwicklungsstandes

Bewertung	Entwicklungsstand			
SdT im BB	Stand der Technik im Braunkohlebergbau			
SdT	Stand der Technik außerhalb des Braunkohlebergbaus			
GT	Großtechnisches Versuchsstadium (z. B. erfolgreiche Pilotversuche)			
KT	Kleintechnisches Versuchsstadium (erfolgreiche Labor- und Technikumsversuche)			
Е	Entwurfsstadium (theoretische Überlegungen)			

Bewertungsskala des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs

Bewertung	Forschungs- und Entwicklungsbedarf			
kein	Nutzung als Stand der Technik im Braunkohlebergbau			
gering	Anpassung an vorhandenen Stand der Technik			
mittel	Überführung mit großtechnischen Versuchen			
hoch	Angewandte Forschung mit kleintechnischen Versuchen			
sehr hoch	Ergänzende Grundlagenforschung erforderlich			

Bewertungsskala für den Eingriff in die Tagebautechnologie

Bewertung	Eingriff in die Tagebautechnologie
kein	kein Eingriff in die Tagebautechnologie, geringer logistischer Aufwand
gering	Geringer Eingriff in die Tagebautechnologie, mäßiger logistischer Aufwand (z.B. Organisation von Massentransporten)
mittel	Eingriff in die Tagebautechnologie, hoher logistischer Aufwand (z.B. terminliche Abstimmungen, die zu einer Veränderung der Betriebsfahrweise führen können)
hoch	maßgeblicher Eingriff in die Tagebautechnologie (z.B. technologische Ergänzungen, Einsatz zusätzlicher Geräte), sehr hoher logistischer Aufwand
sehr hoch	Grundlegende Veränderungen der Tagebautechnologie

Bewertungsskala der Investitionskosten

Bewertung	Kosten in €		
keine			
gering	< 1.000.000		
mittel	1.000.000 10.000.000		
hoch	> 10.000.000		
sehr hoch			

Bewertungsskala der Betriebskosten

Bewertung	Kosten in €/Jahr		
keine			
gering	< 100.000		
mittel	100.000 1.000.000		
hoch	> 1.000.000		
sehr hoch			

Bewertungsskala der technischen Umsetzbarkeit

Bewertung	Technische Umsetzbarkeit der Maßnahme
Einfach	Maßnahme mit einfachen technischen und technologischen Mitteln umsetzbar, geringer Aufwand
machbar	Maßnahme technisch umsetzbar nach Stand der Technik, mit überschaubarem finanziellen und organisatorischen Aufwand
aufwendig	Maßnahme technisch umsetzbar, hoher finanzieller und/oder organisatorischer Aufwand
Forschungsbedarf	Maßnahme technisch möglich, Kenntnisstand für eine sichere Beherrschung zu gering, erheblicher Forschungsbedarf
nicht machbar	kein Stand der Technik zur Durchführung der Maßnahme vorhanden, sehr hoher finanzieller Aufwand

Bewertungsskala für die Entsorgung bzw. für Abprodukte

Bewertung	Entsorgung bzw. Abprodukte
günstig	Nutzung von Abprodukten anderer Branchen für die Zwecke der Verhinderung/Minderung der Pyritverwitterung und Kippenversauerung
keine	es entstehen keine Abprodukte
einfach	geringe Mengen unschädlicher Abprodukte
anspruchsvoll	große Mengen weitgehend unschädlicher Abprodukte, ggf. einfache Maßnahmen zur Nachbehandlung
sehr aufwendig	große Mengen von Abprodukten, die einer gesonderten Entsorgung oder einer aufwendigen Nachbehandlung bedürfen

Bewertungsskala für die Genehmigungsfähigkeit

Bewertung	Genehmigungsfähigkeit
nicht erforderlich	erfordert keine gesonderte Genehmigung im Rahmen der Bergbautätigkeit
erreichbar	gesichert
mit Auflagen	erreichbar unter Auflagen
nicht abschätzbar	bisher fehlende Erfahrung zur Genehmigungsfähigkeit, da Verfahren noch nicht in der praktischen Anwendung
nicht genehmigungsfähig	verletzt elementare Regeln und Gesetzmäßigkeiten



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

Abschlussbericht

Anlage 6.1

Eignung bergbautechnologischer Maßnahmen zur Verringerung der Pyritverwitterung und der Kippenversauerung (Kategorie A im aktiven Bergbau)

Bewertung der tagebaubegleitenden Maßnahmen gegen die Kippenversauerung

Eignung bergbautechnologischer Maßnahmen zur Verringerung der Pyritverwitterung und der Kippenversauerung (Kategorie A im aktiven Bergbau)

Kriterien	Selektive Abraumgewinnung und -verkippung	Verringerung der Expositionsflächen	Verringerung der Expositionszeit	
technologisches Prinzip	Selektive Gewinnung und Verkippung geochemisch stark differenzierter Schichten	Verringerung der Flächen für den Angriff der Verwitterung	Verringerung der Zeiten für den Angriff der Verwitterung	
Varianten der Umsetzung	reichen Sedimente und Verkippung in untere Kippscheiben von Bermen und Arbeitsflächen in pyritfreien oder		zeitnahe Überdeckung von pyritreichen Kippen mit pyritarmem bzw. pyritfreiem Kippenmaterial	
	Separation pyritarmer, pyritfreier oder carbonatreicher Sedimente und Verkippung in obere Kippscheiben	pyritarmen Schichten Verfüllung von Hohlräumen (z. B. Randschläuche)	zeitnahe Verfüllung von Randschläuchen	
mögliche Einsatzstoffe	keine	keine	keine	
Einsatzgrenzen:				
natürliche	Ausreichende geochemische Differenzierung	Materialverfügbarkeit	Materialverfügbarkeit	
technologische	Ausreichend differenzierte Gewinnbarkeit durch die Abbautechnologie (Förderbrücken- oder Absetzerbetrieb)	Technische Grenzen der Geräte	Technische Grenzen der Geräte geotechnische Anforderungen	
Wirkungen auf:				
primäre Pyritverwitterung	gering	gering	gering bis mittel	
sekundäre Pyritverwitterung	mittel	keine	gering bis mittel	
Versauerung	keine	keine	keine	
Raumwirkung	sehr hoch	gering im laufenden Betrieb	mittel	
Maßnahmendauer	Betriebsdauer des Tagebaus	Betriebsdauer des Tagebaus Betriebsdauer des Tagebaus		
Wirkungsdauer	lang	kurz bis mittel	kurz bis mittel	

Kriterien	Selektive Abraumgewinnung und -verkippung	Verringerung der Expositionsflächen	Verringerung der Expositionszeit
Synergien im Braunkohlen- bergbau	Beaufschlagung mit alkalischen, respirato- risch wirkenden oder bakteriziden Stoffen		
Möglicher Einsatzbereich	bevorzugt für den Absetzerbetrieb	bevorzugt für den Absetzerbetrieb	bevorzugt für den Förderbrückenbetrieb
im Tagebau	eingeschränkt für den Förderbrückenbetrieb	eingeschränkt für den Förderbrückenbetrieb	eingeschränkt für den Absetzerbetrieb
Entwicklungs- stand	SdT im BB	SdT im BB	SdT im BB
Forschungs- und Entwicklungs- bedarf	kein	kein	kein
Eingriff in die Tagebau- technologie	mittel	mittel	mittel
Kosten:			
Investitionen	keine	keine	keine
Betrieb	gering	gering	gering
technische Umsetzbarkeit	machbar	machbar	machbar
Genehmigungs- fähigkeit	nicht erforderlich *)	nicht erforderlich *)	nicht erforderlich *)

^{*)} technologische Umsetzung im Rahmen des Bergrechtes

Bewertung der Eignung hydraulischer, kulturtechnischer und bodenmechanischer Maßnahmen zur Verringerung der Pyritverwitterung und der Kippenversauerung (Kategorie A im aktiven Bergbau)

Kriterien	Abdeckung	Zwischen- begrünung oder Bepflanzung	Oberflächen- verdichtung	Beregnung/ Einstau
technologisches Prinzip	Verringerung des Sauerstoffzutritts durch Abdeckung	Verringerung der Sickerwasser- menge durch Erhöhung der Transpiration	Verringerung des Sauerstoffzutritts durch Erhöhung der Lagerungs- dichte und Verringerung des Porenvolumens	Verringerung des luftgefüllten Porenraumes durch Erhöhung der Bodenfeuchte
Varianten der Umsetzung	Flächen- versiegelung durch Auftragen von Schichten oder Aufsprühen von Materialien	Bepflanzung	Variation durch unterschiedliche Verdichtungs- geräte (z. B. Rütteldruckwalze)	Beregnung oder Einstau
mögliche Einsatzstoffe	Abdeckmaterial: Bindiger Boden Montanwachs Kunststoff- folien	Kulturfähiges Substrat Samen Setzlinge	keine	Wasser
Einsatzgrenzen:				-
natürliche		Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen	Verdichtungs- fähigkeit	Hohe Durchlässigkeit
technologische	Oberflächen- entwässerung Geotechnische Sicherheit		Oberflächen- entwässerung Geotechnische Sicherheit	Wasserverfüg- barkeit Geotechnische Sicherheit
Wirkungen auf:				
primäre Pyritverwitterung	keine	keine	keine	keine
sekundäre Pyritverwitterung	gering bis mittel	sehr gering	sehr gering	gering
Versauerung	keine	keine	keine	keine
Raumwirkung	bis mittel	sehr gering	sehr gering	bis mittel
Maßnahmendauer	mittel bis lang	mittel bis lang	kurz	mittel
Wirkungsdauer	mittel bis lang	mittel bis lang	kurz	mittel

Anlage 6.1 Blatt 4

Kriterien	Abdeckung	Zwischen- begrünung oder Bepflanzung	Oberflächen- verdichtung	Beregnung/ Einstau
Synergien im Braunkohlen- bergbau	Verringerung der Staubbelastung	Verringerung der Staubbelastung	teilweise Verringerung der Staubbelastung	Verringerung der Staubbelastung Anlage von Spülbecken für Reststoffe
möglicher Einsatzbereich im Tagebau	offen liegende Kippenflächen der AK oder DVK	Bevorzugt auf Bermen und Böschungen in Randschläuchen	offen liegende Kippenflächen der AK oder DVK	offen liegende Kippenflächen der AK oder DVK
Entwicklungs- stand	SdT	SdT im BB	SdT	SdT im BB
Forschungs- und Entwicklungs- bedarf	kein	kein	kein	kein
Eingriff in die Tagebau- technologie	gering	gering	gering	gering
Kosten:				
Investitionen (Technik)	gering	gering	gering	gering
Betrieb	mittel	mittel	mittel	mittel
technische Umsetzbarkeit	machbar	aufwendig	machbar	machbar
Genehmigungs- fähigkeit	erreichbar	erreichbar	nicht erforderlich	mit Auflagen

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle - Abschlussbericht

Bewertung der Eignung chemischer und biologischer Maßnahmen zur Verringerung der Pyritverwitterung bzw. ihrer Folgen (Kategorie A im aktiven Bergbau)

Kriterien	Alkalische Stoffe	Respiratorisch wirkende Stoffe	Inertisierende Stoffe	Bakterizide Stoffe	
Technologisches Prinzip	chemische Kompensation der Versauerung durch Zufuhr von Alkalinität	Sauerstoff- verbrauch als Konkurrenz- reaktion zur Pyritoxidation ggf. Sulfat- reduktion	Chemische Einkapselung des Pyrits	Hemmung der mikrobiologischen Pyritoxidation	
Varianten der Umsetzung	Einbau in das Kippenvolumen, ggf. selektiv gewinnungs- oder abwurfseitig a) Absetzerbetrieb b) Förderbrücken- betrieb c) Einarbeitung in die Kippenober- fläche	Einarbeitung in die Kippenoberfläche	Einbau in das Kippenvolumen, ggf. selektiv	a) Einbau in das Kippenvolumen, ggf. selektiv b) Einarbeitung in die Kippenober- fläche c) Infiltration im Vorfeld	
mögliche Einsatzstoffe	Kalkstein, Dolomit kalkhaltige Reststoffe der Baustoff- und Chemieindustrie Kraftwerksasche und Aschen aus Heizkraftwerken Eisenhydroxid- schlamm	Klärschlamm Reststoffe der Biogasgewinnung organisches Material aus der Landwirtschaft Torfe aus der Vorfeldberäumung	Phosphate	Tenside	
Einsatzgrenzen:					
natürliche		Potential und temperatur- abhängige Kinetik der Respiration	Verfügbarkeit	nicht selektiv (Abtötung aller Bakterien) Abbaubarkeit	
technologische	a) keine b) beschränkt durch Statik und Selektivität c) begrenzte Tiefenwirkung und Homogenisierung	Begrenzte Einbautiefe	Absetzerbetrieb: keine Förderbrücken- betrieb: Statik begrenzte Homogenisierung	a) Absetzer- betrieb: keine Förderbrücken- betrieb: Statik b) begrenzte Tiefenwirkung und Homogenisierung c) begrenzter Wirkungsraum	

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle - Abschlussbericht

Anlage 6.1 Blatt 6

Kriterien	Alkalische Stoffe	Respiratorisch wirkende Stoffe	Inertisierende Stoffe	Bakterizide Stoffe		
Wirkungen auf:						
primäre	keine	keine	keine	a) keine		
Pyritverwitterung				b) keine		
				c) mittel		
sekundäre	gering	mittel bis hoch	gering bis mittel	a) mittel		
Pyritverwitterung				b) mittel		
				c) keine		
Versauerung	sehr hoch	gering	keine	keine		
Raumwirkung	a) sehr hoch	gering bis mittel	sehr hoch	a) hoch		
	b) sehr hoch			b) mittel		
	c) gering bis mittel			c) mittel		
Maßnahmen- dauer	lang	lang	lang	lang		
Wirkungsdauer	a) sehr lang	kurz bis mittel	sehr lang	sehr kurz bis kurz		
	b) sehr lang					
	c) mittel					
Synergien im Braunkohlen- bergbau	a, b) mittelfristige Verbesserung der Sümpfungs- wasser- beschaffenheit	Einbau in die Rekultivierungs- schicht ggf. Sulfatreduktion	mittelfristige Verbesserung der Sümpfungs- wasser- beschaffenheit			
möglicher	a) Bandanlagen	Kippenoberfläche	Bandanlagen	a) Bandanlagen		
Einsatzbereich im Tagebau	b) Bagger- böschungen, Bandanlagen			b) Kippen- oberfläche		
	c) Kippenober- fläche			c) Vorfeld		
Entwicklungs- stand	a) SdT im BB	SdT	GT	KT		
Statiu	b) E					
	c) SdT					
Forschungs- und Entwicklungs-	a) kein	gering	mittel	hoch		
bedarf	b) Förder- brückenbetrieb: sehr hoch					
	c) gering					
Eingriff in die	a) gering	gering	gering	a) gering		
Tagebau- technologie	b) hoch			b) kein		
	c) gering			c) kein		

Anlage 6.1 Blatt 7

Kriterien	Alkalische Stoffe	Respiratorisch wirkende Stoffe	Inertisierende Stoffe	Bakterizide Stoffe	
Kosten:					
Investitionen	a) gering	mittel	gering	a) gering	
	b) mittel			b) gering	
	c) gering			c) mittel	
Betrieb	a) mittel bis hoch	mittel bis hoch	mittel	mittel	
	b) mittel bis hoch				
	c) mittel				
technische Umsetzbarkeit	a) machbar	aufwendig	machbar	aufwendig	
	b) Forschungs- bedarf				
	c) machbar				
Reststoffe/ Entsorgung	ggf. Kraftwerks- aschen	Reststoffe aus der Biogasgewinnung	entfällt	entfällt	
	Eisenhydroxid- schlämme				
	Rückstände der Baustoff- und Chemieindustrie				
Genehmigungs- fähigkeit	erreichbar	mit Auflagen	nicht abschätzbar	nicht abschätzbar	



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

Abschlussbericht

Anlage 6.2

Vergleichende Bewertung der Wirkungsfaktoren der tagebaubegleitenden Maßnahmen zur Quellenbehandlung (Kategorie A im aktiven Bergbau)

Bewertung der tagebaubegleitenden Maßnahmen gegen die Kippenversauerung

Vergleichende Bewertung der Wirkungsfaktoren der tagebaubegleitenden Maßnahmen zur Quellenbehandlung (Kategorie A im aktiven Bergbau)

Wirkprinzip	Verfahren/ technische Variation		Wirkung auf primäre Pyritverwitterung	Wirkung auf sekundäre Pyritverwitterung	Wirkung auf Versauerung	Raumwirkung	erforderliche Dauer der Maßnahmen	Wirkungsdauer
	Selektive Abraum und -verkippung	ngewinnung	4	3	5	1	4	2
bergbau- techno-	Verringerung der Expositionsoberfl		4	5	5	4	4	3
logisch	Verringerung der Expositions- zeiten	a) im Tagebau	4	4	5	3	4	4
		b) Absetzerschüttung	3	3	5	3	4	3
kultur- technisch	Bodenabdeckung und Zwischenbegrünung		5	3	5	3	4	2
boden- mechanisch	Oberflächenverdichtung		5	5	5	5	2	4
hydraulisch/			5	4	5	3	3	3
pneumatisch			3	3	5	1	4	2
E		a) Absetzerbetrieb	5	4	1	1	4	1
	Einbau alkalischer Stoffe	b) Förderbrückenbetrieb	5	4	1	1	4	1
		c) Kippe	5	4	1	3	4	3
chemisch	Einbau respiratorisch wirkender Stoffe		5	2	4	3	4	3
und/oder biologisch	Einbau inertisierender Stoffe		5	3	5	1	4	1
	Bakterizide	a) Einbau in das Kippenvolumen	5	3	5	2	4	1
		b) Einarbeitung in die Kippenoberfläche	5	3	5	3	4	4
		c) Infiltration im Vorfeld	3	5	5	3	4	4

Anlage 6.2 Blatt 2

Vergleichende Bewertung der technologischen und wirtschaftlichen Faktoren der tagebaubegleitenden Maßnahmen zur Quellenbehandlung

Wirkprinzip	Verfahren/ technische Variation		Entwicklungsstand	Eingriff in die Tagebautechnologie	Investitionskosten	Betriebskosten	Technische Umsetzbarkeit	Genehmigungs- fähigkeit
	Selektive Abraumgewinnung und -verkippung		1	3	1	2	2	1
bergbau- techno-	Verringerung der Expositionsoberf		1	3	1	2	2	1
logisch	Verringerung der Expositions- zeiten	a) im Tagebau	1	3	1	2	2	1
		b) Absetzerschüttung	1	3	1	2	2	1
kultur- technisch	Bodenabdeckung Zwischenbegründ		1	2	2	3	4	2
boden- mechanisch	Oberflächenverdichtung		2	2	2	3	2	1
hydraulisch/	Beregnung/Einst	au	2	2	2	3	2	3
pneumatisch	Schutzgasinjektion		5	2	2	3	1	4
		a) Absetzerbetrieb	1	2	1	4	2	2
	Einbau alkalischer Stoffe	b) Förderbrückenbetrieb	5	4	3	4	4	2
		c) Kippe	2	2	2	3	2	2
chemisch	Einbau respiratorisch wirkender Stoffe		2	2	3	4	3	3
und/oder biologisch	Einbau inertisierender Stoffe		3	2	2	3	2	4
	Bakterizide	a) Einbau in das Kippenvolumen	4	2	2	3	3	4
		b) Einarbeitung in die Kippenoberfläche	4	1	2	3	3	4
		c) Infiltration im Vorfeld	4	1	3	3	3	4



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

Abschlussbericht

Anlage 6.3

Eignung hydraulischer Maßnahmen zur Eindämmung der räumlichen Ausdehnung der Quelle (Kategorie B im aktiven Bergbau)



Bewertung der tagebaubegleitenden Maßnahmen gegen die Kippenversauerung

Eignung hydraulischer Maßnahmen zur Eindämmung der räumlichen Ausdehnung der Quelle (Kategorie B im aktiven Bergbau)

Kriterien	Dichtwand	Schutzinfiltration
technologisches Prinzip	Herstellung eines Schlitzes im Gebirge bis zum Liegendstauer, Verfüllung des Hohlraumes mit hydraulisch dichtem Material	Schutzinfiltration
Varianten der	Schlitzfräsverfahren	Grabenversickerung
Umsetzung	Greiferfräsverfahren	Versickerungsrigolen
		Infiltrationsbrunnen
Erforderliche technische Bauwerke	Dichtwand	Pumpwerk, Brunnen, Sickerschlitze
Einsatzstoffe	Ton, Zement	Wasser
Einsatzgrenzen:		
Natürliche	Existenz eines Liegendstauers	Hohe Durchlässigkeit des Grundwasserleiters
		Versickerungsfähigkeit
technologische	Tiefe (maximal 120 m)	Wasserverfügbarkeit
		Wasserbeschaffenheit
Wirkungen auf:		
primäre Pyritverwitterung	sehr hoch (Absenkungstrichter)	hoch (Absenkungstrichter)
sekundäre Pyritverwitterung	nicht zutreffend	nicht zutreffend
Versauerung	keine	gering
Raumwirkung	sehr hoch (gesamter Grundwasserleiter im Absenkungstrichter)	hoch (Grundwasserleiter im Absenkungstrichter)
Maßnahmendauer	sehr kurz	lang
Wirkungsdauer	sehr lang	lang
Synergien	Verringerung der Sümpfung	Wiederverwendung von Sümpfungswasser
	Keine Aufwendung für Ökowasser	Verringerte Aufwendung für Ökowasser
	Verringertes Bergschadensrisiko	Verringertes Bergschadensrisiko
	Verringerte Aufwendung	Verringerte Aufwendung

Kriterien	Dichtwand	Schutzinfiltration
	für Entschädigung	für Entschädigung
möglicher Einsatzbereich im Tagebau	Im Bereich der Markscheide des Tagebaus	Im Bereich der Markscheide des Tagebaus
Eingriff in die Tagebautechnologie	kein	kein
Entwicklungsstand	SdT im BB	SdT im BB
Forschungs- und Entwicklungsbedarf	kein	kein
Kosten:		
Investitionen	hoch	mittel
Betrieb	keine	mittel
technische Umsetzbarkeit	machbar	machbar
Genehmigungs- fähigkeit	erreichbar	mit Auflagen (Wasserrecht)



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

Abschlussbericht

Anlage 6.4

Eignung von Maßnahmen zur Behandlung von Kippenwasser (Kategorie C im aktiven Bergbau)

Bewertung der tagebaubegleitenden Maßnahmen gegen die Kippenversauerung

Eignung von Maßnahmen zur Behandlung von Kippenwasser (Kategorie C im aktiven Bergbau)

Kriterien	Wasserbehandlung in technischen Anlagen	Naturräumliche Wasserbehandlung	Wassermanagement
technologisches Prinzip	Physikalische und chemische Wasserbehandlung	Physikalische, chemische und mikrobiologische Wasserbehandlung	Wassergütesteuerung durch Verschnitt
Varianten der Umsetzung	a) Grubenwasser- behandlungsanlagen mit Entsäuerungs- und Flockungstechnologien	a) Seen, Tagebaurest- seen und Becken	a) Tagebaurestseen
	b) Wasserbehandlung mit Entsäuerungs- und Filtertechnologien	b) Fließgewässer und Gerinne	b) Fließgewässer
	c) Elektrochemische Wasserbehandlung	c) Grundwasserleiter mit reaktiven Räumen	
Erforderliche technische Bauwerke	komplette Wasser- behandlungsanlage mit Pumpwerken, Rohr- leitungen, Gerinnen, Dosierstationen, Absetzbecken, Energieversorgung, MSR-Technik usw.	Pumpwerke, Rohr- leitungen, ggf. Dosier- stationen, Ausbringungs- technologien Reaktive Bodenkörper	Pumpstation, Rohrleitungen, Wehre und Überleiter
	Schlammstapelraum		
Einsatzstoffe	Calciumhydroxid, Calciumoxid, Flockungshilfsmittel	Calciumcarbonat, Calciumhydroxid Sauerstoff	keine
	Elektroenergie	Elektroenergie	
Einsatzgrenzen:			
natürliche	keine	Sedimentationsraten, chemische Kinetik, mikrobiologische Umsatzraten	Wasser- und Stoffbilanz
technologische	keine	vorhandene Geometrie	keine
Wirkungsgrad	sehr hoch	mittel	sehr hoch
Maßnahmen- dauer	lang	lang	lang
Wirkungsdauer	lang	lang	lang
Synergien	Wasserbereitstellung für Dritte (Kraftwerke)	Wasserbereitstellung für Dritte	
	Stabilisierung der Mindestdurchflüsse		

Kriterien	Wasserbehandlung in technischen Anlagen	Naturräumliche Wasserbehandlung	Wassermanagement
möglicher Einsatzort	Zentrale technische Anlage	Dezentrale natürliche Strukturen	dezentral
Entwicklungs-	a) SdT im BB	a) SdT im BB	SdT
stand	b) SdT	b) E	
	c) GT	c) GT	
Forschungs- und	a) kein	a) kein	kein
Entwicklungs- bedarf	b) kein	b) sehr hoch	
	c) mittel	c) mittel	
Kosten:			
Investitionen	hoch	a) gering bis mittel	gering bis mittel
		b) gering bis mittel	
		c) mittel	
Betrieb	hoch	mittel	gering
technische	a) machbar	a) machbar	machbar
Umsetzbarkeit	b) machbar	b) Forschungsbedarf	
	c) aufwendig	c) Forschungsbedarf	
Reststoffe/	a) Eisenschlämme	a) keine	keine
Entsorgung	b) Eisenschlämme	b) Eisenschlämme	
	c) Eisenschlämme und Konzentrat (Anolyt)	c) nicht einschätzbar	
Genehmigungs-	erreichbar	a) mit Auflagen	mit Auflagen
fähigkeit		b) nicht abschätzbar	
		c) nicht abschätzbar	



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

Abschlussbericht

Anlage 7.1

Maßnahmen der Quellenbehandlung

Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen gegen die Kippenversauerung

Vergleichende Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen zur Quellenbehandlung: Bergbaufolgesee (Kategorie A im Sanierungsbergbau)

Genehmigungsfähigkeit	8	2	ဗ
Reststoffe / Entsorgung	2	3	2
Technische Umsetzbarkeit	2	2	2
Betriebskosten	2	4	3
Investitionskosten	3	4	3
Entwicklungsstand	_	2	_
Wirkungsdauer	2	2	2
erforderliche Dauer der Maßnahmen	4	4	4
Raumwirkung	3	3	3
Wirkung auf Versauerung	1	2	3
Verfahren / technische Variation	Spülungsflutung	Wasserhaltung und externe Wasserbehandlung	In-Lake Wasserbehandlung
Wirkprinzip	hydraulisch	hydraulisch- chemisch	chemisch und/oder biologisch

Vergleichende Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen zur Quellenbehandlung: Innenkippe (Kategorie A im Sanierungsbergbau)

Genehmigungsfähigkeit	2	2	2	4
Reststoffe / Entsorgung	2	2	3	4
Technische Umsetzbarkeit	2	3	2	4
Betriebskosten	3	3	4	3
Investitionskosten	2	2	4	ဇ
Entwicklungsstand	2	1	2	3
Wirkungsdauer	4	2	2	2
erforderliche Dauer der Maßnahmen	2	4	4	4
Raumwirkung	5	3	3	ဇ
Wirkung auf Versauerung	5	2	2	3
Verfahren / technische Variation	Untergrundverdichtung	Bepflanzung und Nutzungsänderung	Wasserhebung und externe Wasserbehandlung	Untergrundwasserbehandlung
Wirkprinzip	boden- mechanisch	kultur- technisch	hydraulisch- chemisch	chemisch und/oder biologisch

Vergleichende Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen zur Quellenbehandlung: Grundwasserleiter (Kategorie A im Sanierungsbergbau)

Genehmigungsfähigkeit	2	4
Reststoffe / Entsorgung	3	4
Technische Umsetzbarkeit	2	4
Betriebskosten	4	3
Investitionskosten	4	3
Entwicklungsstand	2	3
Wirkungsdauer	2	2
erforderliche Dauer der Maßnahmen	4	4
Raumwirkung	3	3
Wirkung auf Versauerung	2	3
Wirkprinzip Verfahren / technische Variation	Wasserhebung und externe Wasserbehandlung	Untergrundwasserbehandlung
Wirkprinzip	hydraulisch- chemisch	chemisch und/oder biologisch

Vergleichende Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen zur Quellenbehandlung: Außenhalde

(Kategorie A im Sanierungsbergbau)

Genehmigungsfähigkeit	2	4
Reststoffe / Entsorgung	2	3
Technische Umsetzbarkeit	3	4
Betriebskosten	3	8
Investitionskosten	2	2
Entwicklungsstand	1	5
Wirkungsdauer	2	3
erforderliche Dauer der Maßnahmen	4	4
Raumwirkung	3	3
Wirkung auf Versauerung	9	2
nische Variation	Nutzungsänderung	lleier
Wirkprinzip Verfahren / technische Variation	Bepflanzung und Nutzungsänderu	Chemischer Schleier



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

Abschlussbericht

Anlage 7.2

Maßnahmen zur Verringerung des Stoffaustrages

der Braunkohle - Abschlussbericht

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften

Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen gegen die Kippenversauerung

Vergleichende Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen zur Verringerung des Stoffaustrages aus der Quelle Bergbaufolgesee (Kategorie B im Sanierungsbergbau)

Genehmigungsfähigkeit	3	2	4
Reststoffe / Entsorgung	2	2	3
Technische Umsetzbarkeit	2	2	4
Betriebskosten	2	1	3
Investitionskosten	3	4	3
Entwicklungsstand	2	1	4
Wirkungsdauer	3	1	2
erforderliche Dauer der Maßnahmen	4	1	4
Raumwirkung	3	1	3
Wirkung auf Versauerung	3	2	3
Wirkprinzip Verfahren / technische Variation	Veränderte Stauhaltung (Einstau/Absenkung)	Dichtwand	Auslaufwasserbehandlung
Wirkprinzip	docilicabyd	200	chemisch und/oder biologisch

Vergleichende Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen zur Verringerung des Stoffaustrages aus der Quelle Innenkippe (Kategorie B im Sanierungsbergbau)

Genehmigungsfähigkeit	2	3	2	4
Reststoffe / Entsorgung	2	2	3	4
Technische Umsetzbarkeit	2	2	2	4
Betriebskosten	1	3	4	3
Investitionskosten	4	ε	4	3
Entwicklungsstand	1	1	2	3
Wirkungsdauer	1	2	2	2
erforderliche Dauer der Maßnahmen	-	4	4	4
Raumwirkung	1	2	3	3
Wirkung auf Versauerung	2	3	2	3
Verfahren / technische Variation	Dichtwand	Hydraulische Barriere	Wasserhebung und externe Wasserbehandlung	Untergrundwasserbehandlung
Wirkprinzip	1	nyarauliscn	hydraulisch- chemisch	chemisch und/oder biologisch



Vergleichende Bewertung der Wirkungsfaktoren der nachsorgenden Maßnahmen zur Verringerung des Stoffaustrages aus der Quelle Außenhalde (Kategorie B im Sanierungsbergbau)

Genehmigungsfähigkeit	7	2	4
Reststoffe / Entsorgung	2	8	4
Technische Umsetzbarkeit	2	2	4
Betriebskosten	-	4	3
Investitionskosten	4	4	3
Entwicklungsstand	-	2	3
Wirkungsdauer	-	2	2
erforderliche Dauer der Maßnahmen	-	4	4
Raumwirkung	1	8	3
Wirkung auf Versauerung	7	2	3
Verfahren / technische Variation	Dichtwand	Wasserfassung und externe Wasserbehandlung	Untergrundwasserbehandlung
Wirkprinzip	hydraulisch	hydraulisch- chemisch	chemisch und/oder biologisch



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

Abschlussbericht

Anlage 7.3

Maßnahmen zur Verringerung der Stoffausbreitung

Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen gegen die Kippenversauerung

Vergleichende Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen zur Verringerung der Stoffausbreitung: Transportpfad Grundwasserleiter (Kategorie C im Sanierungsbergbau)

Genehmigungsfähigkeit	2	3	2	4
Reststoffe / Entsorgung	2	2	3	4
Technische Umsetzbarkeit	2	2	2	4
Betriebskosten	1	3	4	3
Investitionskosten	4	3	4	3
Entwicklungsstand	1	1	2	3
Wirkungsdauer	1	2	2	2
erforderliche Dauer der Maßnahmen	1	4	4	4
Raumwirkung	1	2	3	3
Wirkung auf Versauerung	2	3	2	3
Wirkprinzip Verfahren / technische Variation	Dichtwand	Hydraulische Barriere	Wasserhebung und externe Wasserbehandlung	Untergrundwasserbehandlung
Wirkprinzip		nyaraulisch	hydraulisch- chemisch	chemisch und/oder biologisch

Vergleichende Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen zur Verringerung der Stoffausbreitung:

Transportpfad Standgewässer (Kategorie C im Sanierungsbergbau)

Genehmigungsfähigkeit	3	2	ဇ
Reststoffe / Entsorgung	2	3	2
Technische Umsetzbarkeit	2	2	2
Betriebskosten	2	4	3
Investitionskosten	3	4	3
Entwicklungsstand	-	2	1
Wirkungsdauer	2	2	2
erforderliche Dauer der Maßnahmen	4	4	4
Raumwirkung	3	3	3
Wirkung auf Versauerung	~	2	3
Verfahren / technische Variation	Spülungsflutung	Wasserhaltung und externe Wasserbehandlung	In-Lake Wasserbehandlung
Wirkprinzip	hydraulisch	hydraulisch- chemisch	chemisch und/oder biologisch



Vergleichende Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen zur Verringerung der Stoffausbreitung: Transportpfad Fließgewässer (Kategorie C im Sanierungsbergbau)

ysbergbau)
S C im Sanierung
/ässer (Kategorie
sportpfad Fließgew

Genehmigungsfähigkeit	3	7	4
Reststoffe / Entsorgung	2	က	ю
Technische Umsetzbarkeit	7	2	4
Betriebskosten	2	4	က
Investitionskosten	3	4	3
Entwicklungsstand	2	2	4
Wirkungsdauer	2	2	2
erforderliche Dauer der Maßnahmen	4	4	4
Raumwirkung	3	3	က
Wirkung auf Versauerung	l	2	3
Verfahren / technische Variation	Wassermanagement im Flussgebiet	Wasserfassung und externe Wasserbehandlung	naturräumliche Wasserbehandlung
Wirkprinzip	hydraulisch	hydraulisch- chemisch	chemisch und/oder biologisch



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

Abschlussbericht

Anlage 7.4

Maßnahmen zur Verringerung des Eintrages in das Schutzgut

Vergleichende Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen zur Verringerung des Stoffeintrages in das Schutzgut: Standgewässer (Kategorie D im Sanierungsbergbau)

Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen gegen die Kippenversauerung

Genehmigungsfähigkeit	3	2	3	2	4
Reststoffe / Entsorgung	2	2	2	3	4
Technische Umsetzbarkeit	2	2	2	2	4
Betriebskosten	7	1	8	4	8
Investitionskosten	3	4	3	4	3
Entwicklungsstand	2	1	1	2	8
Wirkungsdauer	2	1	2	2	2
erforderliche Dauer der Maßnahmen	4	1	4	4	4
Raumwirkung	3	1	2	3	3
Wirkung auf Versauerung	1	2	3	2	3
Verfahren / technische Variation	veränderte Stauhaltung	Dichtwand	Hydraulische Barriere	Abfangen des Grundwasserzustromes und externe Wasserbehandlung	Untergrundwasserbehandlung
Wirkprinzip		hydraulisch		hydraulisch- chemisch	chemisch und/oder biologisch

Vergleichende Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen zur Verringerung des Stoffeintrages in das Schutzgut: Fließgewässer (Kategorie D im Sanierungsbergbau)

Genehmigungsfähigkeit	3	2	4
Reststoffe / Entsorgung	2	8	3
Technische Umsetzbarkeit	2	2	4
Betriebskosten	2	4	3
Investitionskosten	3	4	3
Entwicklungsstand	2	2	4
Wirkungsdauer	က	2	2
erforderliche Dauer der Maßnahmen	4	4	4
Raumwirkung	က	3	3
Wirkung auf Versauerung	-	2	3
Verfahren / technische Variation	veränderte Stauhaltung	Abfangen des Grundwasserzustromes und externe Wasserbehandlung	Flussbettauskleidung
Wirkprinzip	hydraulisch	hydraulisch- chemisch	chemisch und/oder biologisch

Vergleichende Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen zur Verringerung des Stoffeintrages in das Schutzgut Grundwasser (Kategorie D im Sanierungsbergbau)

Genehmigungsfähigkeit	3	2	3	2	4
Reststoffe / Entsorgung	2	2	2	3	က
Technische Umsetzbarkeit	2	2	2	2	4
Betriebskosten	2	l	8	4	က
Investitionskosten	3	4	3	4	3
Entwicklungsstand	2	1	1	2	3
Wirkungsdauer	2	1	2	2	2
erforderliche Dauer der Maßnahmen	4	1	4	4	4
Raumwirkung	3	1	2	3	3
Wirkung auf Versauerung	1	2	3	2	3
Verfahren / technische Variation	veränderte Stauhaltung	Dichtwand	Hydraulische Barriere	Abfangen des Grundwasserzustromes und externe Wasserbehandlung	Untergrundwasserbehandlung
Wirkprinzip				hydraulisch- chemisch	chemisch und/oder biologisch

Vergleichende Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen zur Verringerung des Stoffeintrages in das Schutzgut: Boden und Baugrund (Kategorie D im Sanierungsbergbau)

Genehmigungsfähigkeit	2	2	2	3	4
Reststoffe / Entsorgung	2	2	3	3	က
Technische Umsetzbarkeit	2	2	3	8	4
Betriebskosten	2	2	3	8	3
Investitionskosten	2	2	2	2	2
Entwicklungsstand	2	2	1	1	5
Wirkungsdauer	3	2	2	2	3
erforderliche Dauer der Maßnahmen	1	1	4	4	4
Raumwirkung	2	4	3	8	3
Wirkung auf Versauerung	2	4	4	2	2
Verfahren / technische Variation	Material- und Oberflächenvergütung	Baugrundverdichtung	Melioration (Dränage, Kalkung)	Lokale Wasserhaltung	Chemischer Schleier
Wirkprinzip	bautechnisch	boden- mechanisch	kultur- technisch	hydraulisch	chemisch und/oder biologisch



Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle

Abschlussbericht

Anlage 7.5

Maßnahmen zur Behandlung des betroffenen Schutzgutes der Braunkohle - Abschlussbericht

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften

Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen gegen die Kippenversauerung

Vergleichende Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen zur Behandlung des Schutzgutes: Standgewässer (Kategorie E im Sanierungsbergbau)

Genehmigungsfähigkeit	က	က
Reststoffe / Entsorgung	2	2
Technische Umsetzbarkeit	2	2
Betriebskosten	2	3
Investitionskosten	3	3
Entwicklungsstand	1	1
Wirkungsdauer	7	2
erforderliche Dauer der Maßnahmen	4	4
Raumwirkung	3	3
Wirkung auf Versauerung	1	3
Wirkprinzip Verfahren / technische Variation	Wassermanagement im Flussgebiet	In-lake-Wasserbehandlung
Wirkprinzip	hydraulisch	chemisch und/oder biologisch

Vergleichende Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen zur Behandlung des Schutzgutes:

Fließgewässer (Kategorie E im Sanierungsbergbau)

Genehmigungsfähigkeit	3	4
Reststoffe / Entsorgung	2	3
Technische Umsetzbarkeit	2	4
Betriebskosten	2	8
Investitionskosten	3	3
Entwicklungsstand	1	4
Wirkungsdauer	2	2
erforderliche Dauer der Maßnahmen	4	4
Raumwirkung	ε	3
Wirkung auf Versauerung	l	3
Verfahren / technische Variation	Wassermanagement im Flussgebiet	naturräumliche Wasserbehandlung
Wirkprinzip	hydraulisch	chemisch und/oder biologisch

der Braunkohle - Abschlussbericht

Genehmigungsfähigkeit

Maßnahmen gegen die Kippenversauerung in Bergbaufolgelandschaften

က

2

Vergleichende Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen zur Behandlung des Schutzgutes: Grundwasser (Kategorie E im Sanierungsbergbau)

Reststoffe / Entsorgung	3	3	4
Trodisione / Entroligang	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	(,,	,
Technische Umsetzbarkeit	2	2	4
Betriebskosten	1	4	3
Investitionskosten	2	4	3
Entwicklungsstand	-	2	3
Wirkungsdauer	-	2	2
erforderliche Dauer der Maßnahmen	7	4	4
Raumwirkung	4	33	3
Wirkung auf Versauerung	2	2	3
Verfahren / technische Variation	Ersatzmaßnahme (z. B. Wasserfassung)	Wasserhebung und externe Wasserbehandlung	Untergrundwasserbehandlung
Wirkprinzip	bautechnisch	hydraulisch- chemisch	chemisch und/oder biologisch

Vergleichende Bewertung der nachsorgenden Maßnahmen zur Verringerung des Stoffeintrages in das Schutzgut: Boden und Baugrund (Kategorie D im Sanierungsbergbau)

Genehmigungsfähigkeit	က	2	2	2	2	3
Reststoffe / Entsorgung	4	2	2	2	3	3
Technische Umsetzbarkeit	3	2	7	7	3	8
Betriebskosten	1	2	1	7	3	8
Investitionskosten	3	2	2	2	2	2
Entwicklungsstand	1	2	1	2	1	1
Wirkungsdauer	2	3	2	2	2	2
erforderliche Dauer der Maßnahmen	2	1	1	1	4	4
Raumwirkung	4	2	4	4	3	3
Wirkung auf Versauerung	2	2	9	2	4	2
Verfahren / technische Variation	Ersatzmaßnahme (z. B. Ersatzneubau)	Oberflächenvergütung	Kellerverfüllung / -teilverfüllung	lokale Baugrundverdichtung	Melioration	Lokale Wasserhaltung
Wirkprinzip		1		kultur- technisch	hydraulisch	