

Uwe Grünewald und Dagmar Schoenheinz

# Bergbaubedingte Gewässerversauerung in der Niederlausitz – Ursachen, Ausmaß und Minderungskonzepte

**Acidification of water bodies due to mining activities in the Lower Lusatia region – causes, severity and remedial conceptions**

Die Versauerung von (Kippen-)Böden, Grundwasser sowie von Stand- und Fließgewässern infolge bergbaulicher Tätigkeit ist ein weltweites – nach wie vor kaum beherrschtes – Problem. Am Beispiel des Niederlausitzer Braunkohlereviers und der Flusseinzugsgebiete von Spree und Schwarzer Elster wird auf die bergbaubedingten Versauerungsursachen sowie auf deren Aus- und Nebenwirkungen eingegangen. Auf die Unterschiede zu der durch atmosphärische Stoffeinträge bedingten Gewässerversauerung wird hingewiesen. Die sich im Rahmen des Sanierungsbergbaus abzeichnenden Minderungsmaßnahmen z.B. durch Wasserbewirtschaftung und durch technisch-technologische Einflussnahme werden erläutert.

**Schlagwörter:** „Acidic Mine Drainage“, Grundwasserabsenkung, Grundwasserwiederanstieg, Maßnahmen, Tagebaue, Verockerung, Versauerung

The acidification of (postmining) soils, groundwater as well as standing and flowing waters due to mining activities is a global problem that is still largely uncontrolled. Using the example of the Lower Lusatian brown coal field and the catchments of the rivers Spree and Schwarzer Elster, the acidification causes due to mining as well as their impacts and secondary effects are analysed. Reference is made to the distinctions between acidification caused by atmospheric discharge of materials. The effects of remedial actions within the scope of land rehabilitation e.g. water management and engineering-technological measures, are explained.

**Keywords:** „Acidic Mine Drainage“, acidification, groundwater drawdown, groundwater rebound, iron clogging, open-pit mining, remedies

## 1 Einleitung

Weltweit werden mehr als 80 % der Mineralgewinnung im Tagebaubetrieb realisiert (YOUNGER 2004). Das betrifft Metallerze, Stein- oder Braunkohle und Rohstoffe für die Bauindustrie wie Sand oder Kies. Dort, wo die aktiven Tagebaue in die Grundwasserkörper eingreifen, zerstören sie ganz oder teilweise deren Struktur und Wechselwirkung, deren Speicher- und Pufferungsvermögen. Gleichzeitig unterliegen derart betroffene Regionen bergbaubedingter Versauerung und Kontamination. Damit existiert weltweit eine stoffhaushaltliche Herausforderung, die vor allem auf der Freilegung, Oxidation und Lösung von sulfidischen und metallischen Mineralen z.B. von Kohlebegleitern bzw. -bestandteilen beruht („Acidic Mine Drainage – AMD“).

In den weltmarktführenden Bergbauländern wie Australien oder Südafrika mit gewaltigen Kupfer-, Gold-, Uran-, Steinkohle- und Bauxit-Tagebauen existiert seit langem eine Vielzahl von bergbaulichen Hinterlassenschaften wie Kippen und Halden, Gruben und Bergbaufolgeseen. Vielfach gehen von ihnen beträchtliche Gefahren und Risiken für die Umwelt aus. Im Jahr 2000 formulierte die Weltbank in ihrem Bericht „It's not over when it's over“ die Notwendigkeit, Konzeptionen zur Wiedernutzbarmachung von Bergbaulandschaften bereits von Beginn an in die Aufschlussplanung von Tagebauen einzubeziehen (WORLD BANK 2002). Häufig kann aber die vielerorts bestehende Bergbau- und Umweltgesetzgebung wenig Druck ausüben und zur Aufarbeitung der bergbaulichen Hinterlassenschaften beitragen (z.B. DRAD 2012, KUMAR et al. 2012). Damit ist auch verbunden, dass noch relativ wenige systematische wissenschaftliche und technische Untersuchungen zum großräumigen Umgang mit der AMD-Problematik existieren. Noch im Juni 2003 wurde z.B. auf einer Tagung

zum Grundwassermanagement in Bergbauregionen (PROKOP et al. 2004, S. 26) auf die Frage: „*Can we predict the quality of mine drainage water?*“ geantwortet: „*Well, no, not really.*“

Die Wasser- und Stoffflüsse in den Lausitzer Grund- und Oberflächengewässer-Systemen der Spree und der Schwarzen Elster sind durch die Jahrzehntelangen, tief- und weitreichenden Eingriffe des Bergbaus nachhaltig gestört (GELLER et al. 2012, GRÜNEWALD 2001, GRÜNEWALD & UHLMANN 2004). Insbesondere die abrupte Stilllegung einer Vielzahl von – nicht nur wirtschaftlich, sondern auch hydrologisch verknüpften – Großtagebauen in Nordsachsen und Südbrandenburg führte in den Jahren nach 1990 zu besonderen ökonomischen und sozialen, aber auch zu großen wissenschaftlichen und praktischen Herausforderungen bei der angestrebten Wiederherstellung sich weitgehend selbst regulierender wasser- und stoffhaushaltlicher Kreisläufe. Zunächst standen die Herstellung der Böschungssicherheit, die Wiederauffüllung des Grundwasserabsenkungstrichters, die Flutung der verbliebenen Hohlformen zu Seen und die Sicherung einer ausleitfähigen Seewasserbeschaffenheit im Vordergrund der Bemühungen. Gegenwärtig rücken zunehmend der Anschluss des wiederansteigenden Grundwassers an die Fließgewässer und die damit verknüpften quantitativen und qualitativen Beeinflussungen in das Blickfeld der Öffentlichkeit.

Ziel des vorliegenden Beitrags ist es, an ausgewählten Beispielen in den Einzugsgebieten von Spree und Schwarzer Elster die teilweise extrem starken, bergbaubedingten Gewässerversauerungen darzustellen und auf geeignete Gegenmaßnahmen der Wasserbewirtschaftung sowie der Wassertechnik und -technologie hinzuweisen. Die Analyse beruht vor allem auf Ergebnissen des wissenschaftlich-technischen Projekts „Gewässergüte

Tagebauseen Lausitz", das von 1994 bis 2012 im Auftrag der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbauverwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) an der BTU Cottbus angesiedelt war (GRÜNEWALD et al. 2012).

## 2 Großräumige Störung des Wasser- und Stoffhaushaltes in der Niederlausitz

Großräumiger und tiefgreifender Braunkohleabbau, wie er in den von der Eiszeit überprägten Landschaften der Lausitz (NOWEL et al. 1994) betrieben wird, ist ohne entsprechende Entwässerungsmaßnahmen nicht möglich. Bei einer durchschnittlichen Förderung von ca. 6 m<sup>3</sup> Wasser pro Tonne geförderter Braunkohle kumulierte bis zum Jahr 1990 das Grundwasserdefizit im Lausitzer Revier auf ca. 13 Milliarden Kubikmeter.

In den Jahren um 1990 waren die lokalen Grundwasserabsenkungen der einzelnen Lausitzer Tagebaue südwestlich von Cottbus in den Flussgebieten von Spree und Schwarzer Elster zu einem rund 2.100 km<sup>2</sup> großen, zusammenhängenden Absenkungstrichter – „fachumgangssprachlich“ oft als LAUBAG-Löwe (LAUBAG: Lausitzer Braunkohle Aktiengesellschaft) bezeichnet – zusammen gewachsen (Abb. 1). Damit ging einher, dass Oberflächen gewässer und Niedermoorstandorte (insbesondere südlich des Spreewaldes) trocken fielen. Andererseits lieferte das vor allem über Filterbrunnen gehobene und aufbereitete Sümpfungswasser über viele Jahrzehnte einen überregionalen Überschuss an „künstlichem Abfluss“ z.B. in der Spree für den Spreewald und für die Hauptstadt Berlin (GRÜNEWALD 2001).

Die umfangreiche und abrupte Stilllegung einer Vielzahl großer Tagebaue und der damit verbundene drastische Rückgang der Sümpfungswassermengen nach 1990 führte zwangsläufig zu regionalen und überregionalen Wassermengenproblemen in Form einer drastischen Durchflussverringerung in den Fließgewässern.

Mit dem gleichzeitig einsetzenden großräumigen Grundwasserwiederanstieg und dem damit einhergehenden, absehbaren Anschluss der Bergbaufolgeseen an die Fließgewässer stellt sich zudem ein AMD-Problem in einer in Europa bislang nicht bekannten Dimension ein. Der wichtigste wasserbeschaffungsrelevante Einfluss des Braunkohlebergbaus geht von der Versauerung als Folge der Oxidation der in den kohlebegleitenden Schichten vorhandenen Sulfidminerale (Pyrit und Markasit) aus. Insbesondere beim Abtragen und Umlagern der Deckschichten in den Tagebauen erfolgen eine intensive Belüftung und eine Oxidation dieser Mineralien. Im Zuge der Wasserabsenkung und Wasserhaltung bei der Trockenlegung der Kohleflöze setzt sich die Oxidation fort, wird unter dem Einfluss von Mikroorganismen beschleunigt und führt bei Mangel an puffernden Materialien zu einer Versauerung und Mobilisierung von Metallen wie gelöstem Eisen und (fischtoxischem) gelösten Aluminium (LUA 2001). Die damit einhergehenden Probleme werden meist erst nach dem Wiederanstieg des Grundwassers bzw. mit der Wiedernutzbarmachung der von den Tagebauen betroffenen Gebiete in vollem Umfang sichtbar.

Im Rahmen der wasser- und stoffhaushaltlichen Sanierung besteht daher nicht nur die Aufgabe, die regionalen Grundwasserdefizite auszugleichen und die Restlöcher mit Wasser zu füllen. Vielmehr geht es darum, in den betroffenen Flusseinzugsgebieten nachteilige Auswirkungen auf die Gewässer sowie die Ökosysteme und auf die unterschiedlichen Wassernutzungen während und nach der Flutung zu vermeiden bzw. zu vermindern.

## 3 Ableitung von Prognosen zur Entwicklung der Gewässerbeschaffenheit

Im „Rahmenkonzept Wasserhaushalt“ (UMK 1994) heißt es, „unter Berücksichtigung der ökologischen Bedingungen und notwendiger Wassernutzungen [sind] solche Verhältnisse herzustellen,

die einen weitgehend sich selbst regulierenden Wasserhaushalt ermöglichen“. Dies setzt belastbare Prognosen voraus, aus denen sowohl die wassermengen- als auch die wassergütewirtschaftlichen Effekte von Sanierungsmaßnahmen in den betroffenen Flusseinzugsgebieten ersichtlich werden.

Die Prognosen der Wasserbeschaffenheit vor allem in den entstehenden, ca. 130 km<sup>2</sup> umfassenden Bergbaufolgeseen bedürfen daher neben der differenzierten Erfassung der Beschaffenheit der Grund- und Flutungswasser auch der Erfassung der verschiedenen Wechselwirkungen zwischen den Seen und dem Grundwasser. Dazu sind zunächst für die einzelnen Restlöcher bzw.

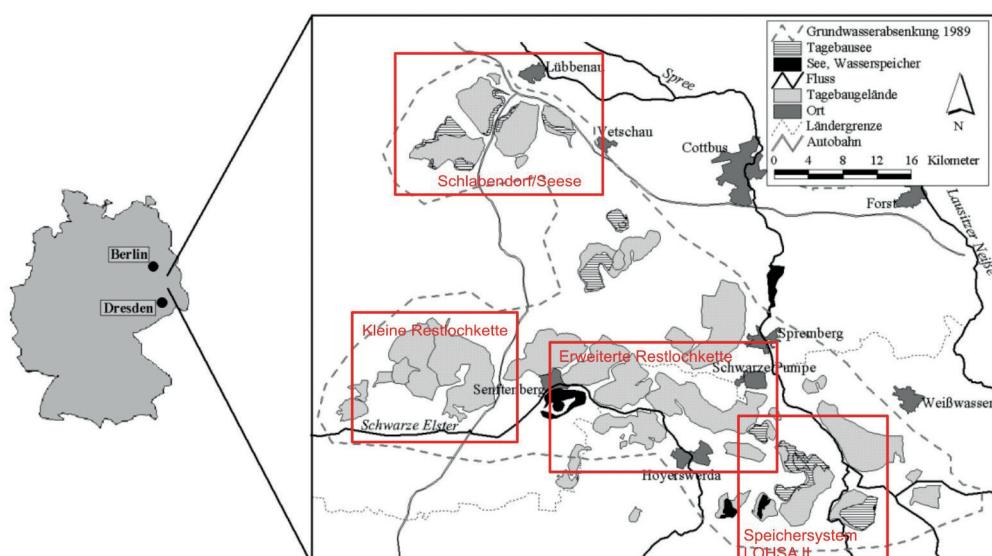


Abbildung 1

Braunkohle-Bergbauregion Niederlausitz (HANGEN-BRODERSEN et al. 2005) mit (ehemaligen und aktiven) Tagebauen und der größten Ausdehnung des Grundwasserabsenkungstrichters von 1989  
Brown coal mining region Lower Lusatia (HANGEN-BRODERSEN et al. 2005) with (former and active) open-pit mining sites and the maximum expanse of the groundwater depression cone in 1989

Bergbaufolgeseen und in Abhängigkeit von den hydrogeologischen und hydrochemischen Umfeldbedingungen

- die Grundwasserzu- und -abströme,
- die klimatische Wasserbilanz als Differenz aus Niederschlag und Verdunstung der freien Wasserfläche,
- die Zuflüsse zum See aus dem oberirdischen Einzugsgebiet, das im Wesentlichen durch die Böschungsflächen gebildet wird, sowie
- die Einleitung von Oberflächenwasser bei der Fremdflutung bzw. die Ausleitung von Seewasser in die Vorflut nach dem Erreichen der Stauziele

problembezogen zu prognostizieren. Das erfordert detaillierte Grundwasserströmungsmodelle, welche auch die großräumigen Variationen der Grundwasserströmungen in und zwischen den Gewässereinzugsgebieten erfassen.

Inzwischen wurden im Rahmen des wissenschaftlich-technischen Projektes „Gewässergüte Tagebauseen Lausitz“ für die 26 großen Bergbaufolgeseen in der Niederlausitz belastbare Prognosen der Beschaffenheitsentwicklung (zum Teil in Etappen von einfachen zu komplexen, vom Einzelsee zu Seensystemen) erstellt. Ziel der Prognosen war und ist es, für den Zeitraum der Füllung, aber auch der sich anschließenden Nachsorge

- die Wasserbeschaffenheit in den Bergbaufolgeseen bzw. Bergbaufolgeseen-Systemen festzustellen und deren potenzielle Entwicklung modellgestützt zu ermitteln (Prognosehorizont objekt- und problemspezifisch bis 2020 bzw. 2030),
- die jeweils bestehenden Risiken bei der Entwicklung der Wasserbeschaffenheit zu bewerten,
- den zum Erreichen der jeweils angestrebten Gewässergüte erforderlichen Handlungsbedarf aufzuzeigen und
- relevante Maßnahmen abzuleiten.

Aus der Verknüpfung der sich daraus ergebenden vielfältigen einzugsgebietsbezogenen Wasserbewirtschaftungs-Alternativen wird es dann möglich, günstige Szenarien auszuwählen und in entsprechende Maßnahmen z.B.

- der Wasserverteilung („Flutungskonzeptionen“),
- der Wasserspeicherung („Speicherkonzeptionen“) und
- der Wasseraufbereitung („Konditionierungskonzeptionen“)

umzusetzen, wobei auch der jeweils erreichte Sanierungsfortschritt berücksichtigt wird. Durch diese Maßnahmen sollte möglichst verhindert werden, dass stark saures, nicht den länderübergreifend abgestimmten Ausleitkriterien (s. z.B. GRÜNEWALD et al. 2012, S. 50) entsprechendes Wasser unkontrolliert aus den Bergbaufolgeseen austritt.

Weiterhin waren heutige und zukünftige Anforderungen an Maßnahmen für die Wasserbehandlung der Bergbaufolgeseen abzuleiten, um bestmögliche Verhältnisse der Wasserbeschaffenheit bei günstigen Aufwands-Nutzen-Verhältnissen durch Gewässergütesteuering und -bewirtschaftung erreichen zu können. Die Methodik zur Prognose der Wasserbeschaffenheit in Bergbaufolgeseen wurde innerhalb der vergangenen zwei Jahrzehnte schrittweise (weiter-)entwickelt und ist u.a. in LUA (1995), LUA (2001) und GRÜNEWALD & UHLMANN (2004) dargestellt. Einen umfassenden und aktualisierten Überblick zu den Verfahren, Methoden und zum erreichten Stand der Entwicklung der Bergbaufolgeseen in der Niederlausitz enthält GRÜNEWALD et al. (2012).

Das favorisierte Verfahren zur Wiederherstellung eines ausgeglichenen Wasser- und Stoffhaushaltes ist die Flutung der Bergbaufolgeseen mit Oberflächenwasser, die sogenannte Fremdflutung, die allerdings mengenmäßig stark limitiert ist (GRÜNEWALD et al. 2001). Aufgrund des eingeschränkten regionalen Wasserdargebots sowie sich ändernder Rahmen- und Randbedingungen bei der wasser- und stoffhaushaltlichen Sanierung, zum Beispiel infolge von Verzögerungen bei Genehmigungsverfahren, veränderten Fertigstellungsterminen bei Flutungs- und Überleitungsbauwerken, unvorhergesehenen geomechanischen bzw. geotechnischen Einschränkungen, gewinnen Verfahrenstechnologien zur Aufbereitung bergbaubeeinflusster Wässer, wie z.B. In-lake Verfahren, an Bedeutung. Die mit der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie, dem Wasserhaushaltsgesetz und den jeweiligen Landeswassergesetzen verbundenen rechtlichen Anforderungen an den Schutz und insbesondere an die Wiederherstellung eines guten chemischen Zustands und guten ökologischen Potenzials der aquatischen Ökosysteme und der direkt von ihnen abhängenden Landökosysteme und Feuchtgebiete in der Bergbaufolgelandchaft waren und sind flussgebietsübergreifend zu berücksichtigen.

#### 4 Quellen der bergbaubedingten Versauerung in der Lausitz

Die bergbaubedingte Versauerung ist maßgeblich auf die vielfach untersuchte und dokumentierte Pyritverwitterung (u.a. LUA 2001, STUMM & MORGAN 1996) zurückzuführen: Die tertiären Deckgebirge, in die der aktive Braunkohlebergbau eingreift, enthalten Pyrit und Markasit ( $FeS_2$ ). Bei Kontakt mit Luftsauerstoff und Wasser verwittern diese, nur im anoxischen Milieu stabilen, Eisendisulfidminerale. Drei Phasen der Oxidation sind im Zusammenhang mit Bergbauaktivitäten zu unterscheiden (GRÜNEWALD et al. 2012):

- Belüftung der Deckgebirgsedimente während der Vorfeldentwässerung,
- wesentlich intensivere Belüftung während Abbaggerung, Transport und Verkippung der Abraumsedimente beim Aufschluss des Deckgebirges im Tagebaubetrieb,
- Belüftung der abgesetzten Kippe durch diffusen Sauerstoffeintrag von der Oberfläche.

Bei Sauerstoffüberschuss entstehen in der oberflächennahen Oxidationszone der Abraumkippen in Abhängigkeit vom pH-Wert mobile (Tab. 1, Gleichung (1)) und immobile (Tab. 1, Gleichung (2)) Eisen(III)-verbindungen (oxisches Finale, LUA 2001). Die ebenfalls gebildete freie Schwefelsäure verringert den pH-Wert bis in Bereiche um  $pH \approx 1$  („Versauerungsprozess“). Nach vollständigem Sauerstoffverbrauch wirkt Eisen(III) als Oxidationsmittel (Tab. 1, Gleichungen (3) und (4)) und es kommt zur Anreicherung von gut löslichem Eisen(II), Sulfationen und säurebildenden Protonen im Kippengrundwasser.

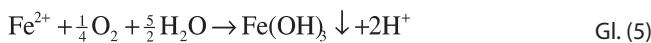
Die Pyritverwitterung setzt sich fort, bis kein mobiles, dreiwertiges Eisen mehr verfügbar ist (anoxisches Finale, LUA 2001). Im anoxischen Milieu tiefer Kippenbereiche liegt der pH-Wert bei  $pH \approx 4$  bis 6. Die im anoxischen Grundwasser angereicherten Verwitterungsprodukte gelöstes Eisen(II), Protonen und Sulfationen werden durch den Grundwasseranstieg ausgewaschen und in Richtung Vorflut transportiert. Beim Austritt in den Vorfluter (oder an der Böschung eines Bergbaufolgesees) wird das

**Tabelle 1**

Verwitterung von Eisendisulfid-Mineralien (z.B. GRÜNEWALD et al. 2012)  
Weathering of iron disulphide minerals (GRÜNEWALD et al. 2012)

Prozess	Reaktionsgleichung		
Pyritverwitterung	$\text{FeS}_2 + \frac{15}{4} \text{O}_2 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 2\text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+$	pH < 3,5	Gl. (1)
mit oxischem Finale	$\text{FeS}_2 + \frac{15}{4} \text{O}_2 + \frac{7}{2} \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow + 2\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$	pH < 3,5	Gl. (2)
Pyritverwitterung mit anoxischem Finale	$\text{FeS}_2 + \frac{7}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$		Gl. (3)
	$\text{FeS}_2 + 14\text{Fe}^{3+} + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 15\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+$		Gl. (4)

zweiwertige Eisen durch Luftsauerstoff oxidiert und fällt als Eisen(III)hydroxid aus (Gleichung 5):



Dieser sogenannte „Verockerungsprozess“ führt zur sichtbaren Verfärbung bzw. Verschlammung sowie weiteren Versauerung der Fließ- oder Standgewässer. Die Pufferreaktionen sowie die Prozesse der Eisenoxidation, -hydrolyse und -fällung in den Kippen und Bergbaufolgeseen sowie beim Grundwasserwiederanstieg werden in GRÜNEWALD et al. (2012) ausführlich erläutert.

Im Kontext der Bergbaufolgelandschaften wurde insbesondere das Versauerungspotenzial der belüfteten Kippen und ihr Einfluss auf die Bergbaufolgeseen diskutiert (u.a. BILEK 2012, CREMER & HÜSENER 2009, LUA 2001, SOCHER et al. 2009). Obwohl auf die Bedeutung der Wasser- und Stoffquellen ehemals grundwassergeprägter Moorstandorte z.B. durch HANGEN-BRODERSEN et al. (2005) aufmerksam gemacht wurde, ist die Bedeutung der Pyritverwitterung in entwässerten und wieder-aufgefüllten, unverwitterten, gewachsenen Grundwasserleitern im Bereich der Süduflüsse zum Spreewald vor allem auch von den „bürokratieverschlankten“ Behörden (HÜTTL & BENS 2012)

lange unterschätzt worden. Mit der weitergehenden Wieder-auffüllung bzw. Neuentwicklung von Grundwasserleiter- und Gewässereinzugsgebietsstrukturen in den unverwitterten Bereichen der Bergbaufolgelandschaft kam es allerdings u.a. zum immer stärkeren Wiederanschluss von Fließgewässern an den Grundwasserleiter. Folglich werden besonders die seit ungefähr 2008 zunehmenden, bergbaubedingten Stoffbelastungen z.B. mit Sulfat (u.a. GEOS 2009, IWB 2012a, S. 17) und gelöstem Eisen (IWB 2012a, S. 18) an der Spree und ihren Zuflüssen südlich des Spreewaldes durch die Öffentlichkeit wahrgenommen und infolge dessen vertiefende Untersuchungen initiiert (u.a. IWB 2010c, LBGR 2014).

Den Zusammenhang zwischen pH-Wert und Löslichkeit von Metallen stellt Abbildung 2 am Beispiel von Aluminium für 1.400 Einzelproben aus den Lausitzer Bergbaufolgeseen sowie am Beispiel von 35 Stichproben des Gänsebaches, eines durch atmosphärischen Stoffeintrag von der Gewässerversauerung bedrohten Zuflusses zur Trinkwassertalsperre Neunzehnhain im Erzgebirge (UHLMANN & GRÜNEWALD 1992), dar.

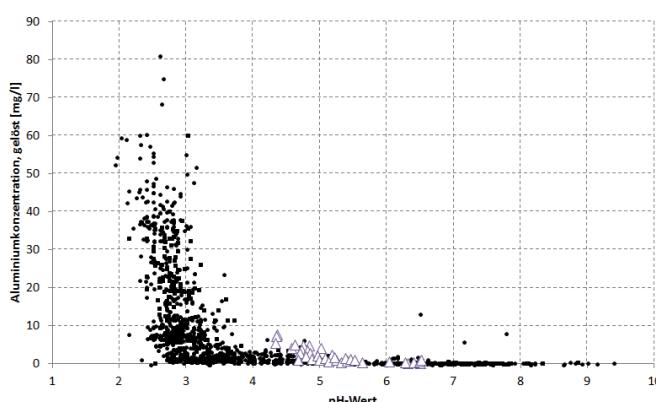
Damit werden die wesentlich stärkere bergbaubedingte Gewässerversauerung bis auf pH-Werte von 2 gegenüber der atmosphärisch bedingten mit pH-Werten > 4,4 sowie über zehnfach höhere Gehalte an gelöstem Aluminium in den Bergbaufolgeseen gezeigt.

## 5 In der Lausitz begann der großräumige Grundwasserwiederanstieg im „Kopf des LAUBAG-Löwen“

Besonders deutlich ließ sich die Wirkung des seit etwa 1997 wieder ansteigenden Grundwasserspiegels im „Kopf des LAUBAG-Löwen“ südlich der Ortslage Lübbenau/Spreewald (Abb. 1), d.h. im Bereich der Bergbaufolgerregion Schlabendorf (Nord und Süd) sowie Seese (West und Ost), beobachten (Abb. 3).

Die mit der Grundwasserabsenkung einhergehende Belüftung und Oxidation von pyrithaltigen Substraten geht mit einer starken potenziellen Versauerung einher, die sich beim Grundwasserwiederaufgang in z.T. extrem niedrigen pH-Werten von 2 bis 3 in den sich entwickelnden Bergbaufolgeseen äußern kann (Abschn. 3).

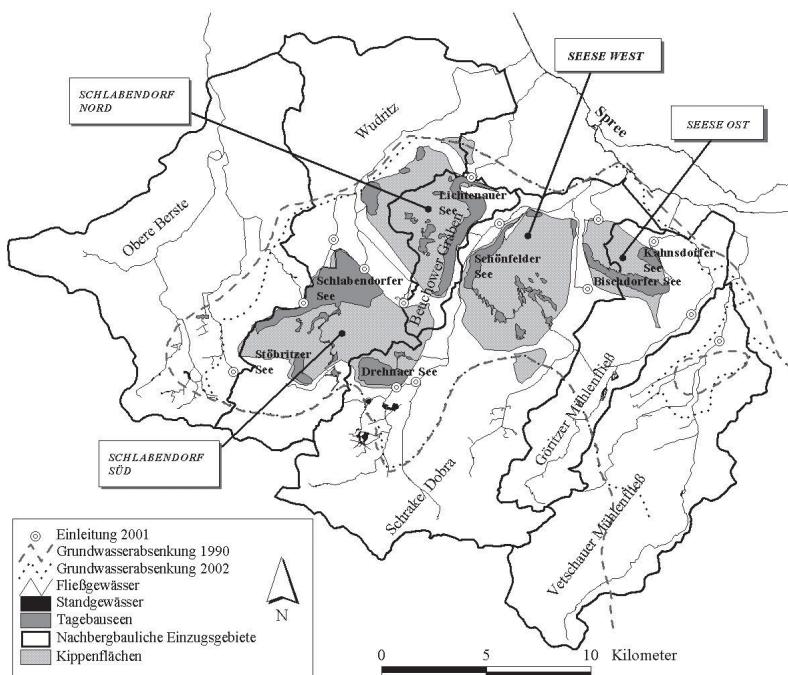
Die Basenkapazität  $K_{\text{B}4,3}$  (gemäß Säure-Basenkonzept berechenbar als  $K_{\text{S}4,3} \approx [\text{HCO}_3^-] - [\text{H}^+]$  mit  $K_{\text{B}4,3} \approx -K_{\text{S}4,3}$ ) liegt in den Kippen Schlabendorf-Süd und -Nord, d.h. im Zustrom zu Schlabendorfer und Lichtenauer See, überwiegend bei 10 bis 20 mmol/l (Abb. 4). Demgegenüber ist die Mehßow-Beuchower Rinne (zwischen dem Lichtenauer und dem Schönfelder Bergbaufolgesee) mit

**Abbildung 2**

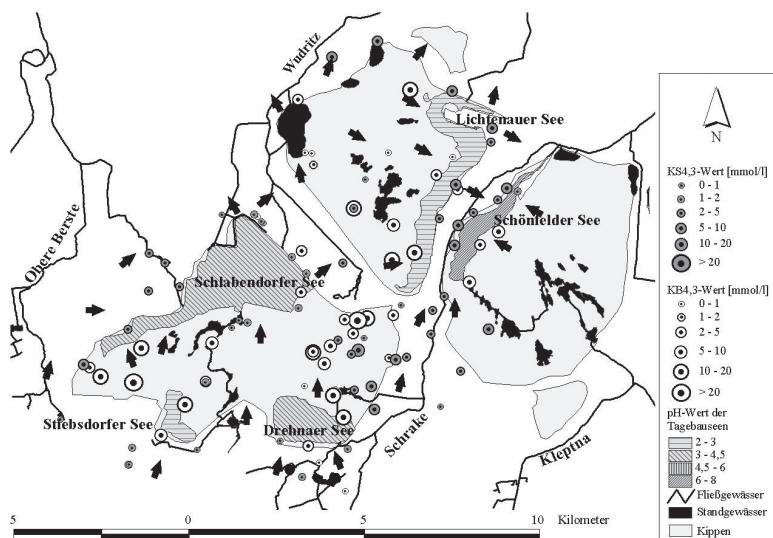
pH-Wert-Abhängigkeit der Aluminiumkonzentration am Beispiel von 1.400 Stichproben in Bergbaufolgeseen (Punktmarkierung), Zeitraum 1996 bis 2010 (Daten: LMBV) sowie von 35 Stichproben im Gänsebach (Dreiecksmarkierung; Daten: UHLMANN & GRÜNEWALD 1992)  
pH-value dependency of aluminium concentration using the example of 1,400 samples taken in post-mining lakes (dot marking), period 1996–2010 (data: LMBV) as well as of 35 samples taken in the Gänsebach (triangle marking; data: UHLMANN & GRÜNEWALD 1992)

Säurekapazitäten  $K_{S4,3}$  bis zu 10 mmol/l schwach alkalisch und gut gepuffert (Abb. 4).

Offensichtlich ist die hydrochemische Entwicklung der Bergbaufolgeseen entsprechend der hydrologischen und hydrogeologi-



**Abbildung 3**  
Hydrologische Übersichtskarte der Bergbauregion Schlabendorf/Seese im „Kopf des LAUBAG-Löwens“ (BTU 2004) südlich Lübbenau/Spreewald  
Hydrologic survey map of mining region Schlabendorf/Seese in the area referred to as „Kopf des LAUBAG-LÖWENS“ (BTU 2004) south of Lübbenau/Spreewald



**Abbildung 4**  
Säure- und Basenkapazität  $K_{S4,3}$  und  $K_{B4,3}$  (mmol/l) der Grundwasserkörper sowie prognostizierte pH-Wert-Entwicklung einiger Bergbaufolgeseen nach abgeschlossenem Grundwasserwiederanstieg in der Region Schlabendorf/Seese (BTU 2004). Pfeile in Grundwasserfließrichtung  
Predicted development of pH-value of several post-mining lakes as well as acid and base capacity,  $K_{S4,3}$  and  $K_{B4,3}$  (mmol/l) of groundwater bodies in the Schlabendorf/Seese region following concluded groundwater rebound (BTU 2004). Arrows in the direction of groundwater flow

schen Gegebenheiten differenziert. So erfährt z.B. der Schöpfeler See aufgrund seiner günstigen hydrogeologischen Position keine Versauerung, da der östlich angrenzende Kippenbereich des Tagebaus Seese-West und die auf der westlichen Seite im Unverritzten, d.h. im bergbaulich nicht direkt beanspruchten, natürlich gewachsenen Grundgebirge verlaufende pleistozäne Erosionsrinne aus säurepuffernden Sedimenten bestehen. Dagegen sind Bergbaufolgeseen im Grundwasserabstrom von Kippen wie z.B. der Lichtenauer See mit hohem Säurepotenzial akut und langfristig durch Versauerung bedroht (BTU 2002). Die Prognose für die zu erwartenden pH-Werte (Abb. 4) stimmt gut mit den Messungen 2011 überein, wonach z.B. der pH-Wert des Schöpfeler Sees bei 6,8, der des Lichtenauer Sees bei 3,2 liegt (GRÜNEWALD et al. 2012). Der Schöpfeler See erreichte im Jahr 2008, der Lichtenauer See im Jahr 2011 seinen jeweiligen Zielwasserstand.

Der zuerst im südwestlichen Bereich des „Kopfs des LAUBAG-Löwens“ deutlich schrumpfende Grundwassersenkungstrichter führte im Unverritzten zu einem Wiederanspringen der trockengefallenen Fließgewässer im Einzugsgebiet der Oberen Berste (SAFETEC/LMBV 2001). Gleichzeitig zeigten diese Fließgewässer z.T. Versauerungsphänomene mit pH-Werten zwischen 2 und 3, die in Verbindung mit hohen Sulfatkonzentrationen (z.T. > 1.000 mg/L) auf Pyritverwitterung als Ursache hinwiesen (BTU 2004, DE LA CRUZ 2002). Verstärkende Wasser- und Stoffquellen sind hierbei vor allem die ehemals grundwassergeprägten Moorstandorte (HANGEN-BRODERSEN et al. 2005).

## 6 Die Gewässer sind so beschaffen wie die Gesteine, das Land oder die Böden, durch die sie fließen

“Tales sunt aquae qualis terra per quam fluunt” (Enzyklopädie Naturalis historia). Diese PLINIUS dem Älteren (23–79 n. Chr.) zugesprochene Erkenntnis ist eng mit der Namensgebung unserer Flüsse verknüpft. So leitet sich der Flussname „Schwarze Elster“ aus der für organisch geprägte Bäche oft typischen, aufgrund von Huminstoffen häufig auftretenden Braunfärbung des Wassers ab. Bei solchen „Schwarzwasserbächen“ ist der Wasserspiegel bei Mittelwasser nur gering unter Flur und diese geringe Einschnitttiefe führt zu einer engen Verzahnung von Gewässern und Umfeld, z.B. mit gewässerbegleitenden Mooren (z.B. POTGIESSER & SOMMERHÄUSER 2008). Folglich ändert sich auch die Beschaffenheit der Gewässer, wenn sich die umgebenden Gesteine oder die Landschaft ändern. Deutlich wird dies u.a. am Beispiel der Erweiterten Restlochkette.

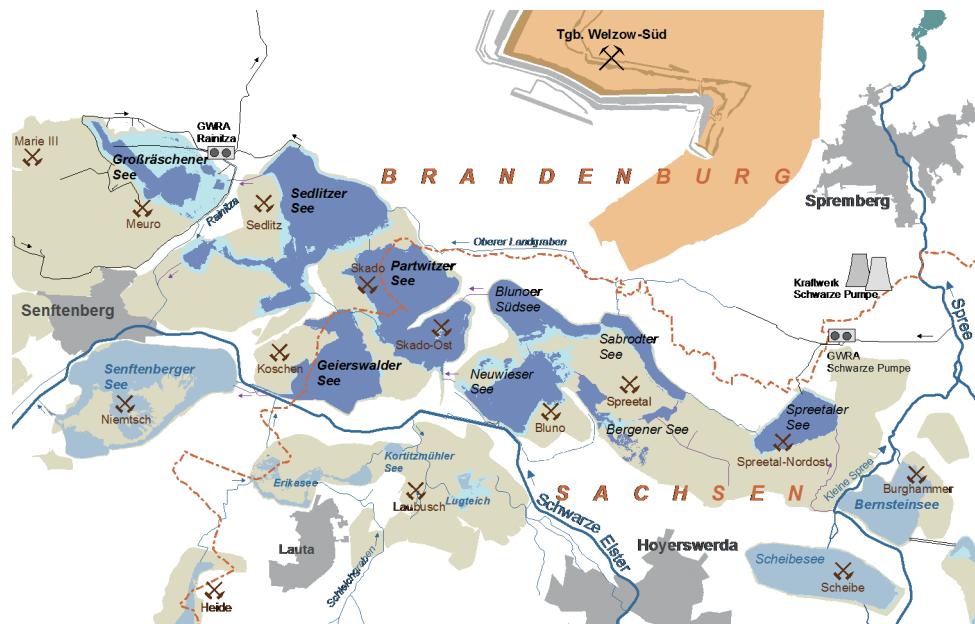
## 6.1 Flächenhafte Konzepte zur Minderung der Gewässerversauerung in den Bergbaufolgeseen der „Erweiterten Restlochkette“ an der Schwarzen Elster

Die Bergbaufolgeseen der Erweiterten Restlochkette (Abb. 5) liegen im Lausitzer Urstromtal. Hier befinden sich in den Kohlebecken des 2. Lausitzer Flözes tertiäre, pyrit- und markasitreiche Sedimente.

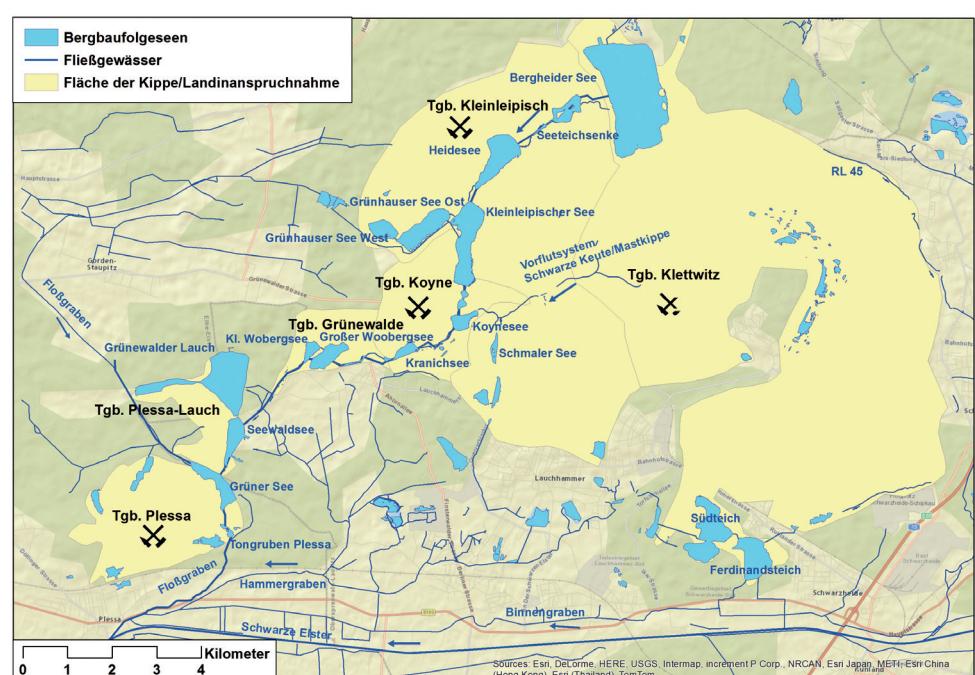
Im quartären Deckgebirge dominieren kalkarme und gut durchlässige Ablagerungen der Talsandfolgen. Kalkhaltige Grundmoränensedimente sind meist nur geringmächtig über der Quartärbasis und lokal in den kohlefeldbegrenzenden, pleistozänen Erosionsrinnen abgelagert. Wegen der fehlenden Karbonate sind im Bereich der Erweiterten Restlochkette das Kippengrundwasser und oft auch die Grundwässer in den belüfteten gewachsenen Grundwasserleitern weniger gut gegenüber den Säuren der Pyritverwitterung gepuffert. Die Bergbaufolgeseen der Erweiterten Restlochkette waren deshalb anfangs stark sauer mit  $\text{pH} \approx 2,7 \dots 2,9$  und hohen Basenkapazitäten  $K_{\text{B8,2}}$  bis ca. 20 mmol/l. Durch die zusätzliche Flutung überwiegend mit Oberflächenwässern konnte die Acidität besonders im Spreetal See und Sabrodtener See sowie im Geierswalder See und Großräschener See deutlich gesenkt werden und lag zum Jahresende 2011 in diesen Seen zwischen 4,7 und 0,1 mmol/l.

Gemäß den Prognosen zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit wird das Wasser in der Erweiterten Restlochkette langfristig überwiegend sauer sein (GRÜNEWALD et al. 2012). Zur Sicherung der gewässerchemischen Ausleitkriterien z.B. auch im Sinne der EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL 2000) wird am Auslauf der Erweiterten Restlochkette seit mehreren Jahren die praktische und wirtschaftliche Durchführbarkeit chemischer Wasserbehandlungsverfahren geprüft. Favorisiert werden inzwischen mobile Konditionierungsschiffe, deren Einsetzbarkeit in der jüngeren Vergangenheit durch mehrere Pilot- und Demonstrationsvorhaben zur chemischen

In-lake-Neutralisation saurer Bergbaufolgeseen praktisch nachgewiesen wurde. Im Rahmen des Projektes „Gewässergüte Tagebauseen Lausitz“ (GRÜNEWALD et al. 2012) wurden ab dem Jahr 2009 orientierende Prognosen zum Kalkbedarf einer In-lake-Neutralisation an der Erweiterten Restlochkette vorgenommen. Die modellgestützten Variantenuntersuchungen ergaben für



**Abbildung 5**  
Lage der Erweiterten Restlochkette im Einzugsgebiet der Schwarzen Elster (GRÜNEWALD et al. 2012)  
*Location of the "Erweiterte Restlochkette" (extended range of residual pits) in the catchment of the Schwarze Elster (GRÜNEWALD et al. 2012)*



**Abbildung 6**  
Übersicht zu den Bergbaufolgeseen der Kleinen Restlochkette im Einzugsgebiet der Schwarzen Elster, Hydroisohypsen 2011 [m NHN] (GRÜNEWALD et al. 2012)  
Overview of the post-mining lakes of the "Kleine Restlochkette" (small range of residual pits) in the catchment of the Schwarze Elster river, hydroisohyps 2011 [m NHN] (GRÜNEWALD et al. 2012)

eine Initialneutralisation einen Bedarf von rund 100.000 Tonnen Kalksteinmehl  $\text{CaCO}_3$  sowie 12.000 Tonnen Kalkhydrat  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , für die Nachsorge bis zum Jahr 2020 weitere rund 170.000 Tonnen Kalkhydrat. Der Einsatz modifizierter Schiffstypen und verschiedener Neutralisationsmittel in der Nachsorgephase zur Sicherung der Erfordernisse der EG-Wasserrahmenrichtlinie wird gegenwärtig geprüft.

## 6.2 Punktförmige Konzepte zur Minderung des Versauerungsflusses aus der „Kleinen Restlochkette“ in die Schwarze Elster

Die Kleine Restlochkette im südbrandenburgischen Sanierungsraum Lauchhammer umfasst eine Vielzahl kleinerer, vergleichsweise flacher Bergbaufolgeseen. Die Seen sind über Grabensysteme miteinander verbunden und entwässern das Gebiet in südliche Richtung über den Floßgraben und den Hammergraben bei Plessa in die Schwarze Elster (Abb. 6).

Die Füllung der Kleinen Restlochkette erfolgt fast ausschließlich durch Grundwasseraufgang. Infolge des großräumigen Zustroms von bergbaulich geprägtem (Kippen-)Grundwasser besaßen die Bergbaufolgeseen der Kleinen Restlochkette im Jahr 2011 eine saure Wasserbeschaffenheit um  $\text{pH} \approx 3$ . Die Aciditäten wiesen eine größere Spannweite im Bereich von 0,8 bis 16 mmol/l auf (GRÜNEWALD et al. 2012).

In den letzten Jahren kam es zwischenzeitlich zu einer leichten Abnahme der bergbaubedingten Beeinflussung der Wasserbeschaffenheit aufgrund der Einleitung von alkalischem Eisenhydroxidwasser und Ablaufwasser aus einer Grubenwasserreinigungsanlage. Diese Abnahme bleibt jedoch ohne weitere Wasserbehandlung langfristig nicht erhalten. Seit Einstellung dieser Maßnahmen im Frühjahr 2010 führen vermehrte Stoff- und Säureeinträge durch Niederschlags- und Wellenerosion in

den Uferbereichen sowie den Zustrom sauren Grundwassers zur Wiederversauerung. Die Prognoserechnungen zeigen, dass der pH-Wert z.B. des Bergheider Sees von zwischenzeitlichen pH-Werten um 7 auf rund 3,2 absinken wird (BTU 2011).

Auch in den stromunter gelegenen Bergbaufolgeseen der Kleinen Restlochkette bleiben langfristig saure bis stark saure Verhältnisse bestehen. Demzufolge stellt der Oberflächenwasserablauf der Kleinen Restlochkette in die Schwarze Elster einen Schwerpunkt der wasserwirtschaftlichen Sanierung dar. Zur gemeinsamen Reinigung der Abflüsse von Floßgraben, Binnengraben und Hammergraben ist daher am Gebietsauslass der Kleinen Restlochkette in die Schwarze Elster bei Plessa eine Wasserbehandlungsanlage geplant (LMBV 2012). Damit besteht für die Seen der Kleinen Restlochkette ein klares Konzept, wie die Wasserbeschaffenheit am punktförmigen Systemablauf bzw. am Einlauf in die Schwarze Elster EG-WRRL-konform gestaltet werden kann.

## 7 Konzepte zur Minderung der Gewässerverversauerung für die Obere und Mittlere Spree

Analog zur Schwarzen Elster haben sich im Einzugsgebiet der Oberen und Mittleren Spree und entlang des sächsisch-brandenburgischen Spreeverlaufs in den vergangenen Jahrzehnten erhebliche Veränderungen ergeben (z.B. GRÜNEWALD 2001, BAYERL & MAIER 2002). Bisher allerdings blieb der Spreewald mit seinen geringen Gefälleverhältnissen, künstlichen Stauen und Kanälen, seiner überwiegend wasserwirtschaftlichen und touristischen Nutzung mehr oder weniger erhalten (z.B. ROLLAND & ARNOLD 2002). Vor allem im sächsischen Teil des „LAUBAG-Löwen“-Absenkungstrichters südlich von Schwarze Pumpe (Abb. 1) prägen Großtagebaue, großräumige Kippenstrukturen und Tagebaufolgeseen das Bild der verritzten Bergbaufolgelandschaft.

### 7.1 Wassergütewirtschaftliche Einflussnahme auf die Bergbaufolgeseen der Oberen Spree

Eines der wasserwirtschaftlichen Kernstücke in der Oberen Spree stellt das Speichersystem LOHSA II (Abb. 7) dar, das aus den Bergbaufolgeseen Dreiweibern, Lohsa II und Burghammer gebildet wird. Weitere bedeutsame Bergbaufolgeseen sind das Speicherbecken (SB) Bärwalde sowie der Scheibesee.

Der Bergbaufolgesee Dreiweibern wird schon seit 1996 kontinuierlich aus der Kleinen Spree geflutet, so dass sich bereits im Jahr 2001 eine neutrale Wasserbeschaffenheit einstellte (GRÜNEWALD et al. 2012). Durch die günstige hydrogeologische Lage des Bergbaufolgesees und die regelmäßige Wasserzufuhr durch Einleitung aus der Kleinen Spree ist eine Wiederversauerungsgefahr nicht mehr gegeben.

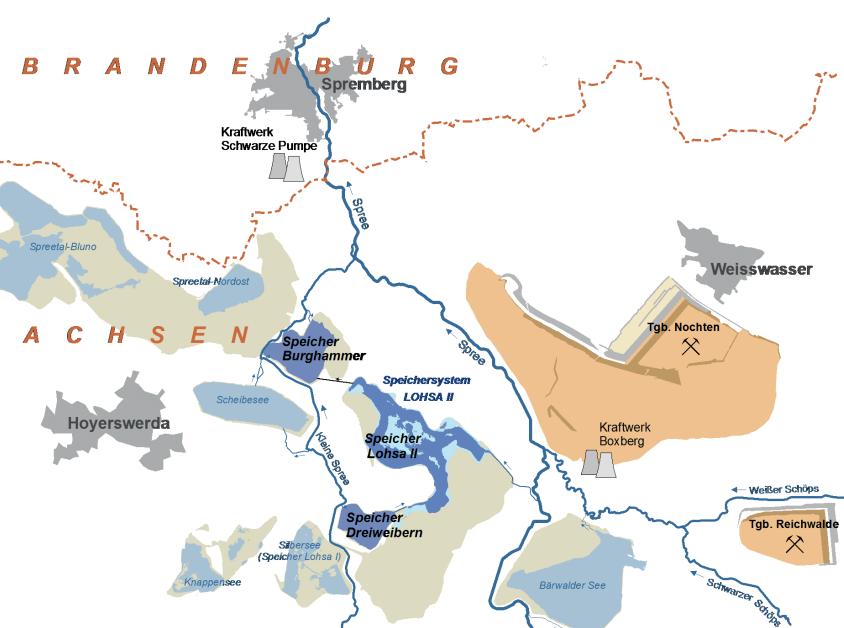


Abbildung 7

Übersicht zum Speichersystem LOHSA II im Bereich der Oberen Spree (GRÜNEWALD et al. 2012)  
Overview of the LOHSA II reservoir system in the Obere Spree region (GRÜNEWALD et al. 2012)

Die Sicherstellung einer nachhaltig ausleitfähigen Wasserbeschafftheit in den Speicherbecken (SB) Lohsa II und Burghammer ist schwieriger. Das volumenanteilig größte SB Lohsa II mit einer geplanten Bewirtschaftungslamelle zwischen 109,5 und 116,4 m NHN erfährt starke Grundwasserzuflüsse aus den Kippenbereichen mit hohen Sulfat- und Eisenkonzentrationen sowie einem bedeutenden Versauerungspotenzial. Trotz zeitweiliger Flutung aus der Spree ist die Wasserbeschafftheit im SB Lohsa II mit  $\text{pH} \approx 3$  bis heute stark sauer.

Dem SB Burghammer mit einer zu bewirtschaftenden Staulamelle von 107,5 bis 109,0 m NHN strömte seit 1999 zunehmend bergbaulich geprägtes Grundwasser zu. Der Wasserstand stieg innerhalb von 10 Jahren bis zum maximalen Stauziel von +109,0 m NHN an und der pH-Wert sank von  $\text{pH} \approx 9$  auf  $\text{pH} \approx 3$ . Der hohe Wasserstand und weiterer Grundwasserzufluss erfordern seit 2009 die Ausleitung aus dem SB Burghammer in die Kleine Spree. Durch die Initialneutralisation im Jahr 2009 wurde der pH-Wert des Sees vorübergehend auf  $\text{pH} \approx 8$  angehoben. Wegen des anhaltenden Grundwasserzuflusses und der damit einhergehenden Wiederversauerung waren bis Dezember 2011 bereits neun weitere Neutralisationen notwendig, um die Ausleitkriterien einzuhalten.

Das regelmäßige montanhydrologische und verfahrensbegleitende Monitoring ermöglicht eine detaillierte Anpassung des Prognosemodells zur Ausweisung von Behandlungshäufigkeit und Mittelbedarf künftiger Neutralisationen (GRÜNEWALD et al. 2012). Das mittelfristige Ziel der Wassergütebewirtschaftung ist es, die Bekalkungsmaßnahmen zu minimieren bzw. die Alkalinität vollständig durch neutrales Flutungs- und Spülungswasser aus der Kleinen Spree zu kompensieren.

Das begrenzte, diskontinuierlich zur Verfügung stehende Angebot aus der Kleinen Spree macht die Überleitung eines neutralen, möglichst gepufferten Wassers aus dem SB Lohsa II zum SB Burghammer notwendig. Menge und Beschaffenheit dieses Überleitungswassers hängen wiederum vom Durchsatz an Spreewasser und von der bewirtschafteten Speicherlamelle ab. Eine Bewirtschaftung im oberen Bereich der nutzbaren Staulamelle verringert das Grundwassereigenaufkommen des SB Lohsa II und erzielt damit eine vergleichsweise günstige Wasserbeschafftheit. Gleichzeitig wird dabei aber das Potenzialgefälle zum tiefer gelegenen SB Burghammer erhöht, was sich aufgrund der dann höheren Kippendurchströmung und der damit verbundenen Stoffausträge negativ auf dessen Wasserbeschafftheit auswirkt.

Mehrjährige Untersuchungen zum optimalen Bereich der zu bewirtschaftenden Staulamellen anhand modellgestützter Szenarienbetrachtungen ergaben, dass sich am Überleiter zum SB Burghammer für den Fall eines mittleren Zuflusses von Spreewasser mit  $\text{MQ} \approx 100 \text{ m}^3/\text{min}$  langfristig, d.h. über das Jahr 2020 hinaus, saure Verhältnisse um  $\text{pH} \approx 3,3$  (BTU 2005) einstellen. Hier ermöglicht nur regelmäßiger Kalkhydrateinsatz mittels In-lake-Verfahren oder im Überleiter eine neutrale Wasserbeschafftheit.

Insgesamt zeigt sich für die Bergbaufolgeseen der Oberen Spree, dass relativ klare Konzepte zur Minderung der Versauerung während der Flutung und Nachsorge existieren (z.B. LMBV 2012). Deinen Umsetzung verlangt aber eine langjährige und konsequente wasserwirtschaftliche Nachsorge in Verknüpfung mit einer Optimierung der Wasserressourcenbewirtschaftung der Bergbaufolgeseen gemeinsam mit den im Einzugsgebiet und darü-

ber hinaus vorhandenen Optionen der Wasserbewirtschaftung. Letztlich wäre damit aber prinzipiell deren EG-WRRL-konforme Bewirtschaftung und Steuerung zu erreichen.

## 7.2 Die vergleichsweise schwierige Situation mit der „Braunen Spree“ und den verfärbten Fließgewässern im Bereich der Mittleren Spree

Parallel zum wissenschaftlich-technischen Projekt „Gewässergüte Tagebauseen Lausitz“ (GRÜNEWALD et al. 2012) beauftragte die LMBV als Projektträger andere wissenschaftliche Institutionen mit der Bearbeitung des Themas „Grundwassergüte Lausitz“. Im Rahmen dieser Arbeiten konnte jedoch die seit Ende 2008 im Bereich der Kleinen Spree/nördlich des Speichers Burghammer im unverritzten Bereich auftretende deutliche Zunahme der Sulfat-, insbesondere aber auch der (gelösten) Eisenbelastung, die ab Konzentrationen größer 3 mg/L sichtbar wird, nicht erklärt werden. Da die LMBV durch das Sächsische Oberbergamt im Rahmen der Zulassung des Betriebsplanes „Folgen des Grundwasserwiederanstieges – ehemalige Tagebaue Burghammer und Lohsa II“ zur Klärung verpflichtet wurde, beauftragte diese zusätzlich das IWB Dresden mit einer Reihe von weiteren Untersuchungen (z.B. IWB 2010a, b; IWB 2012a, b). Inzwischen sind diese Ergebnisse der Öffentlichkeit zugänglich. Als eine der Hauptquellen mit dem höchsten Eisenpotenzial wurde dabei entgegen bisheriger Erfahrungen bezüglich der Versauerungsdominanz tertiärer Grundwasserleiter der wieder ansteigende pleistozäne Grundwasserleiter entlang der Spree zwischen den Speichern Lohsa II/Burghammer und dem aktiven Tagebau Nohchten (s. Abb. 7) identifiziert. „Das Stoffpotential der Pyritverwitterung wurde durch die mehrfach wechselnde Grundwasserströmungsrichtung in Verbindung mit der guten hydraulischen Durchlässigkeit des Grundwasserleiters und weitgehend fehlender Stauhorizonte bis in die tiefen Bereiche des pleistozänen Grundwasserleiters der Spreewitzer Rinne eingewaschen. Die gleiche Tiefenabhängigkeit wie Eisen zeigen auch die Sulfatkonzentration und die Acidität“ (IWB 2012a, S. 9). In IWB (2012b) werden diese flächenhaften Belastungen des aufsteigenden Grundwassers weiter identifiziert und quantifiziert: „Im pleistozänen Grundwasserleiter der Spreewitzer Rinne werden stellenweise bis zu 400 mg/L Eisen gemessen“ (IWB 2012b, S. 3). Daraus folgend werden lang- und mittelfristig wirkende Maßnahmen (z.B. bis hin zum Bau von Dichtwänden und zur Errichtung unterirdischer Wasserbehandlungsmaßnahmen über heterotrophe Sulfatreduktion zur sulfidischen Eisenfestlegung) vorgeschlagen.

Relativ kurzfristig wirksam werden könnten dagegen die Ertüchtigung von Grubenwasserreinigungsanlagen sowie vor allem die Einleitung des flussnah gehobenen eisenreichen Grundwassers in geeignete Bergbaufolgeseen (z.B. SB Burghammer), die dann entsprechend Abschnitt 6.1 und 7.1 verstärkt zu behandeln wären. Vorteilhaft bei Letzterem wäre vor allem die Ausfällung des Eisenhydroxidschlammes direkt in die Bergbaufolgeseen, so dass eine gesonderte Verbringung nicht erforderlich ist.

Dass sich diese stofflichen Belastungen der Spree noch über Jahrzehnte hinziehen werden, leitet sich aus dem PLINIUSschen Leitgedanken (Abschnitt 6) ab. Demzufolge gilt es, den komplexen Verschlechterungsursachen mit ebenso komplexen Maßnahmen zu begegnen.

Im Gegensatz zu den Bergbaufolgeseen in der Oberen Spree sind z.B. im Bereich Schlabendorf-Süd und -Nord Planfeststellungs-

verfahren für die Herstellung der Bergbaufolgeseen noch nicht geführt worden (LMBV 2012). Insofern existieren hier noch keine klaren Konzepte bezüglich der Minderung bzw. Verhinderung einer „signifikanten Schädigung der im Maßstab der Wasserrahmenrichtlinie als relevant ermittelten grundwasserabhängigen Landökosysteme“ bzw. „in Verbindung stehender Oberflächen Gewässer“ (FGG ELBE 2009, S. 42/43).

## 8 Fazit und Ausblick

Es zeigt sich, dass eine große Anzahl von Gewässersystemen der Niederlausitz bergbaubedingt einer starken Versauerung unterworfen ist. Ursprünglich dominierte die Annahme (z.B. LUCKNER et al. 1995), dass diese Herausforderung im Mitteldeutschen Braunkohlerevier keine Rolle spielen wird. Inzwischen zeigt sich, dass im Einzugsgebiet der Pleiße – wenn auch nicht so großräumig – ebensolche Versauerungsphänomene auftreten (BENTHAUS et al. 2010). Im Rheinischen Revier treten sie auf Grund anderer (hydro)geologischer, hydrogeochemischer und hydrologischer Rand- und Rahmenbedingungen eher lokal, aber hinsichtlich des Stoffspektrums außerordentlich differenziert auf (AHRENS & CHRISTMANN 1993), und verlangen vor allem zukünftig besondere Aufmerksamkeit (CREMER & HÜSENER 2009).

Insbesondere hat sich auch gezeigt, dass Verfahren zur Kalkung von Seen, wie sie seit längerem in den regenversauerten Gebieten Skandinaviens angewendet werden, nicht einfach auf die bergbaubedingt versauerten Tagebauseen der Niederlausitz übertragbar sind. Einerseits ist die Ursache für die in Skandinavien angetroffene Versauerung der Ferntransport saurer Industrie- und Kraftwerksabgase, deren Quellen inzwischen weitgehend beseitigt wurden. Andererseits stellen die aciditätsbeeinflussten Bodenoberflächen nur gering mächtige, oberflächennahe Schichten dar. Diese sind der Kalkung relativ gut zugänglich. Darüber hinaus ist die Acidität der skandinavischen Weichwasserseen 100 bis 1.000 mal geringer als die der extrem sauren Bergbaufolgeseen der Lausitz. Schließlich ist die bergbaubürtige Acidität in der Lausitz in den zum großen Teil 40–100 Meter mächtigen Kippenkomplexen sowie in den belüfteten Bereichen des „Gewachsenen“ angelagert, die sich einer oberflächlichen Kalkung weitgehend entziehen.

Insgesamt zeigt sich für den Bereich der „Schwarzen Elster“ und der „Oberen Spree“, dass durchaus „klare Konzepte“ zur Umsetzung der Maßnahmen der EG-WRRL entwickelt wurden. Für den Bereich der „Braunen Spree“ und der „verfärbten“ Fließgewässer südlich des Spreewalds wird dagegen deutlich, dass noch erhebliche Herausforderungen für die (Weiter-)Entwicklung eindeutiger, EG-WRRL-konformer Konzepte bestehen. Dazu gehören vor allem die Ertüchtigung/der Neubau von Grubenwasserreinigungsanlagen, die Einrichtung von eisenrückhaltenden Feuchtgebieten und die Nutzung gezielt bewirtschafteter Bergbaufolgeseen als Umsatz- und Absetzbecken.

Für die Wasserwirtschaftler im aktiven Bergbau verstärken sich die bereits jahrzehntelang bestehenden Herausforderungen, auch weiterhin dem „anspruchsvollen Wasserthema“ (VATTENFALL 2013) ihre besondere Aufmerksamkeit zu widmen (ARNOLD 1997). Dazu dürfte gehören, dass sie sich intensiv, aktiv und kooperativ in die Präzisierung der in FGG ELBE (2009) fixierten Strategien und Maßnahmen einbringen und diese in ihrem Verantwortungsbereich umsetzen.

Nach wie vor gilt es u.E., konsequenter als bisher, gemeinsam getragene länderübergreifende Konzepte zur Wasserressourcenbewirtschaftung in den Einzugsgebieten von Spree und Schwarzer Elster weiter zu entwickeln. Das betrifft vor allem „die Handlungsschnittstellen zwischen der LMBV und dem Land vertreten z.B. durch die Sächsische Landestalsperrenverwaltung“ (LUCKNER 1997, S. 13), oder durch die Schaffung eines länderübergreifenden „Wasserwirtschaftsverbandes Lausitz“ (GRÜNEWALD 2013) analog der Wasserwirtschaftsverbände bzw. -genossenschaften in Nordrhein-Westfalen. Damit wäre auch der Frage nach der zukünftigen Finanzierung, z.B. der sogenannten „Ewigkeitskosten“ in der Lausitz, ein geeigneter Rahmen gegeben.

Zweifellos erfordert dies auch wesentlich intensivere und vielfältigere, akteurs- und ressortübergreifende Kommunikation, z.B. zwischen den Umwelt- und Bergbehörden der beteiligten Bundesländer sowie den Wasser-, Boden- und Tourismusverbänden u.a. über das „Wie“ der Kommunikation mit den Bürgerinnen und Bürgern in den Regionen. Es sollte allen Beteiligten nicht gleichgültig sein, wenn auf dem 13. Workshop zum Flussgebietsmanagement im November 2012 in Essen erstmals bei Umfragen bezüglich des Interesses der deutschen Bevölkerung am Erreichen eines guten Zustands der Gewässer „die Gleichgültigkeit“ den Spaltenplatz einnahm (DÖPPNER & WEYAND 2013).

## Conclusion and Outlook

It becomes apparent that a large number of water body systems in Lower Lusatia is subject to severe acidification due to mining activities. Initially, the dominant assumption (e.g. LUCKNER et al. 1995) was that this challenge would not matter in the Middle German brown coal fields. Meanwhile, it shows that exactly the same acidification phenomena – albeit on a smaller scale – appear in the catchment of the river Pleiße (BENTHAUS et al. 2010). Although it is true indeed that these phenomena occur rather locally but greatly differentiated in terms of their substance spectrum in the Rhenish coal district, due to different (hydro)geological, hydrogeochemical and hydrological marginal and general conditions (AHRENS & CHRISTMANN 1993), they will claim special attention, primarily in future (CREMER & HÜSENER 2009).

Notably, it has become apparent that methods for liming lakes, as have been practiced in Scandinavian regions affected by acid rain for quite some time, cannot simply be transferred to the acidified post-mining lakes of Lower Lusatia. On the one hand, the acidification found in Scandinavia is caused by the long-distance transport of acid industrial and power plant fumes, the sources of which have been largely eliminated in the meantime. On the other hand, the acidity-affected soil surfaces are only near-surface layers of minor thickness. These are relatively easily accessible for liming. Eventually, the acidity of the Scandinavian soft water lakes is between 100 and 1,000 times lower than that of the extremely acid post-mining lakes of Lusatia. Moreover, the mining-induced acidity in Lusatia is stored in the mining waste dumps having an average thickness of 40–100 meters as well as in the ventilated areas of the “Gewachsenes” that are hence largely unsuitable for surface liming.

Overall, as regards the regions of the “Schwarze Elster” and the “Obere Spree”, it shows that “clear concepts” have indeed been developed to implement the measures foreseen by the EWFD. As for the “Braune Spree” region and the “miscoloured” streams

south of the Spreewald, however, it becomes evident that major challenges facing the (further) development of clear concepts consistent with the EWFD, continue to exist. Most of all, this includes the refurbishment/construction of mining water cleaning plants, the establishment of iron retaining wetlands and the controlled management of post-mining lakes for use as conversion and clarifying basins.

For water managers working in active mining, the challenges existing for decades are increasing to continue to devote their special attention (ARNOLD 1997) to the "demanding water issue" (VATTENFALL 2013). This includes, that they should actively and cooperatively engage themselves in specifying the strategies and measures stipulated in FGG ELBE (2009b) and in implementing these in their field of responsibility.

It is still necessary to further develop – and even more consistently than before – jointly agreed transboundary conceptions for water resources management in the catchments of Spree and Schwarze Elster. This is especially true of the action interfaces between the LMBV and the Land, e.g. represented by the "Sächsische Landestalsperrenverwaltung" (Saxonian reservoir administration) (LUCKNER 1997, page 13), or by creating a transnational "Wasserwirtschaftsverband Lausitz" (water management association Lusatia) (GRÜNEWALD 2013) analogous to the Water Management Associations or Cooperatives in North Rhine-Westphalia. This would also provide the question of future financing, e.g. of the so-called "eternity costs" in Lusatia, with a suitable framework.

Undoubtedly this requires much more intensive and diverse communication between players and various sectors, e.g. between environmental and mining authorities of the federal lands and the water, soil and tourism associations, i.a. on the question of how to communicate with the citizens resident in the regions. All parties concerned should not assume indifference given the fact that during the 13th Workshop on River Basin Management in November 2012 in Essen, the answer "indifference" ranked highest for the first time during a survey enquiring the interest of the German population in achieving a good condition of water bodies (DÖPPNER & WEYAND 2013).

## Danksagung

Unser Dank gilt dem Steuerungs- und Budgetausschuss für die Braunkohlesanierung (StuBA) in Berlin, dem Land Brandenburg und dem Freistaat Sachsen für die (Mit-)Finanzierung, den Mitarbeitern der Lausitzer und Mitteldeutschen Braunkohleverwaltungsgesellschaft (LMBV) mbH in Senftenberg für die langjährige konstruktive Zusammenarbeit sowie vor allem Remo Ender, Petra Fleischhammel, Egbert Gassert, Andreas Gröschke, Kai Mazur, Andrea Schapp, Sabine Schümberg, Dirk Seiler, Wilfried Uhlmann und Kai Zimmermann in Cottbus und Dresden für ihre stetige und engagierte fachliche Mitwirkung.

## Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. rer. nat. habil. U. Grünewald

Dr.-Ing. D. Schoenheinz

Professur Hydrologie und Wasserwirtschaft/Lehrstuhl Hydrologie und Wasserressourcenbewirtschaftung  
Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg  
Konrad-Wachsmann-Allee 6, 03046 Cottbus  
uwe.gruenewald@tu-cottbus.de

## Literaturverzeichnis

- AHRENS, B. & K.H. CHRISTMANN (1993): Gutachten über die Gewässerbeschaffenheit von 39 Tagebauseen im rheinischen Braunkohlenrekultivierungsgebiet „Ville“. – Hrsg. Landesamt für Wasser und Abfall NRW im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW, Düsseldorf, 49 S.; 1. Teil: Monographie der Villeseen; 2. Teil: Datensammlung
- ARNOLD, I. (1997): Umsetzung wasserwirtschaftlicher Anforderungen und Auflagen an den langfristigen Braunkohlebergbau. – 3. OLB Symposium „Sanierung Wasserhaushalt Lausitz“, Cottbus, 25.3.1997
- BAYERL, G. & D. MAIER (2002): Die Niederlausitz vom 18. Jahrhundert bis heute: Eine gestörte Kulturlandschaft? – Cottbuser Studien zur Geschichte von Technik, Arbeit und Umwelt 19. – Waxmann Verlag, Münster, 360 S.
- BENTHAUS, F.C., E. SCHOLZ, C. UHLIG, R. HEINE & O. TOTSCHÉ (2010): Die Wiederherstellung des Wasserhaushaltes in den Braunkohlenbergbaurevieren Mitteldeutschlands und der Lausitz. – Internationaler Bergbau und Umwelt Sanierungs Congress, Dresden, 1.–3. September 2010
- BILEK, F. (2012): Reinigungsverfahren von Grundwasser und Oberflächengewässern. Endbericht Ziel 3 – Projekt VODAMIN, Arbeitspaket 4. – DGFZ e.V., Dresden; [www.umwelt-sachsen.de/umwelt/download/Endbericht\\_TP\\_04\\_Reinigungsverfahren.pdf](http://www.umwelt-sachsen.de/umwelt/download/Endbericht_TP_04_Reinigungsverfahren.pdf)
- BTU (2002): Gutachtenaktualisierung zur Wasserbeschaffenheitsentwicklung in den Tagebauseen der Schlabendorfer Felder. Teil 2: Abschätzung der hydrochemischen Entwicklung. Wissenschaftlich-technisches Projekt: Gewässergüte Tagebauseen Lausitz. – BTU Cottbus, Lehrstuhl Hydrologie und Wasserwirtschaft und IWB Dresden im Auftrag der LMBV GmbH, Cottbus
- BTU (2004): Teilprojekt C1: Einzugsgebietsbezogene, GIS-gesteuerte Simulation von Wasser- und Stoffflüssen in gestörten Landschaften mit gekoppelten Sektoralmodellen – Einzugsgebietsmodell LAMBDA. – In: Hüttl, R.F., Gerwin, W. (Hrsg.) Entwicklung und Bewertung gestörter Kulturlandschaften. Fallbeispiel Niederlausitzer Bergbaufolgelandschaft. – Cottbuser Schriften zur Ökosystemgenese und Landschaftsentwicklung 2, BTU Cottbus; 424 S., ISBN 978-3-937728-01-8
- BTU (2005): Untersuchungen zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit im Speichersystem LOHSA II für verschiedene Varianten der Speicherbewirtschaftung. Wissenschaftlich-technisches Projekt: Gewässergüte Tagebauseen Lausitz. – BTU Cottbus, Lehrstuhl Hydrologie und Wasserwirtschaft und IWB Dresden im Auftrag der LMBV GmbH, Cottbus
- BTU (2011): Gutachten zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit in den Bergbaufolgeseen der Kleinen Restlochkette (Lauchhammer). Wissenschaftlich-technisches Projekt: Gewässergüte Tagebauseen Lausitz. – BTU Cottbus, Lehrstuhl Hydrologie und Wasserwirtschaft und IWB Dresden im Auftrag der LMBV GmbH, Cottbus
- CREMER, N. & D. HÜSENER (2009): Abraumkippen des Braunkohlebergbaus – ein Problem für die Zukunft. – Wasser und Abfall 11 (9), 18–22

- DE LA CRUZ, J. (2002): Water quantity and quality characteristics of watercourses in the post-mining region Schlabendorf/Seese. – Master Thesis, BTU Cottbus
- DÖPPNER, T. & M. WEYAND (2013): Dem guten Zustand auf der Spur. – 13. Workshop Flussgebietsmanagement. – Korrespondenz Wasserwirtschaft (KW) 5, 238–243
- DRAD (2012): Study on Reclamation and Rehabilitation of Mine Residue Areas for Development Purposes: Phase II Strategy and Implementation Plan. –Department of Agriculture and Rural Development, Guateng Province South Africa, 38 pp.; [www.gard.gpg.gov.za](http://www.gard.gpg.gov.za)
- FGG ELBE (2009): Begründung von Ausnahmen von Bewirtschaftungszielen, -fristen und -anforderungen für die im deutschen Teil der Flussgebietseinheiten Elbe und Oder durch den Braunkohlebergbau und den Sanierungsbergbau beeinflussten Grundwasserkörper in Übereinstimmung mit der EG-Wasserrahmenrichtlinie; [www.fgg-elbe.de/hintergrundinformationen.html](http://www.fgg-elbe.de/hintergrundinformationen.html)
- GEOS (2009): Sulfatstudie Brandenburg. Durchführung von speziellen Untersuchungen bezüglich Sulfat im brandenburgischen Einzugsgebiet der Spree unter den Bedingungen des Sanierungs- und des aktiven Bergbaus. – G.E.O.S. Freiberg Ingenieurgesellschaft mbH, Halsbrücke; [www.mugv.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/sulfat\\_studie\\_bb.pdf](http://www.mugv.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/sulfat_studie_bb.pdf)
- GELLER, W., M. SCHULTE, R. KLEINMANN & C. WOLKERSDORF (Hrsg.) (2012): Acidic Pit Lakes. The legacy of Coal and Metal Surface Mines. – Springer Verlag, Berlin-Heidelberg. 525 S.; ISBN 978-3-642-29383-9 (eBook)
- GRÜNEWALD, U. (2001): Water resources management in river catchments influenced by lignite mining. – Ecological Engineering 17, 143–152
- GRÜNEWALD, U. (2013): Zur Lösung der Lausitzer Wasserprobleme braucht es einen länderübergreifenden Wasserwirtschaftsverband. – Presseinformation 028/2013 der BTU Cottbus zum Weltwassertag 2013: Wasser und Zusammenarbeit, Cottbus; [www-docs.tu-cottbus.de/hydrologie/public/files/Weltwassertag2013.pdf](http://www-docs.tu-cottbus.de/hydrologie/public/files/Weltwassertag2013.pdf)
- GRÜNEWALD, U., M. KALTOFEN, S. KADEN & M. SCHRAMM (2001): Länderübergreifende Bewirtschaftung der Spree und der Schwarzen Elster. – KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 48 (2), 205–213
- GRÜNEWALD, U., D. SCHOENHEINZ, P. FLEISCHHAMMEL, R. ENDER, A. SCHAPP, W. UHLMANN, D. SEILER & K. ZIMMERMANN (2012): Perspektive See. Stand der Entwicklung der Wasserbeschaffenheit in den Lausitzer Bergbaufolgeseen. Abschlussbericht zum Projekt: Gewässergüte Tagebauseen Lausitz. – BTU Cottbus, Lehrstuhl Hydrologie und Wasserwirtschaft und IWB Dresden im Auftrag der LMBV GmbH, Cottbus; [www.lmbv.de/index.php/forschung-zuseen.html](http://www.lmbv.de/index.php/forschung-zuseen.html)
- GRÜNEWALD, U. & W. UHLMANN (2004): Zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit in den Lausitzer Tagebauseen. Ausgangspunkt, Stand und Perspektiven. – World of Mining – Surface and Underground 56 (2), 115–125
- HANGEN-BRODERSEN, C., P. STREMPEL & U. GRÜNEWALD (2005): Characteristics of catchments disturbed by lignite mining – case study of Schlabendorf/Seese (Germany). – Ecological Engineering 24, 37–48
- HÜTTL, R.F. & O. BENS (Hrsg.) (2012): Georesource Wasser – Herausforderung Globaler Wandel. – Beiträge zu einer integrierten Wasserbewirtschaftung in Deutschland. – acatech Studie. – Springer Verlag, Heidelberg
- IWB (2010a): 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 1: Erkundung. – Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden; [www.lmbv.de/index.php/lmbv-studien-braune-spree.html](http://www.lmbv.de/index.php/lmbv-studien-braune-spree.html)
- IWB (2010b): 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; [www.lmbv.de/index.php/lmbv-studien-braune-spree.html](http://www.lmbv.de/index.php/lmbv-studien-braune-spree.html)
- IWB (2010c): Studie zu den Auswirkungen des Grundwasserwiederanstiegs auf die Beschaffenheit der Oberflächengewässer in den Sanierungsgebieten B1 (Seese/Schlabendorf) und B2 (Greifenhain/Gräbendorf). Abschlussbericht. – Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden; [www.lmbv.de/index.php/lmbv-studien-braune-spree.html](http://www.lmbv.de/index.php/lmbv-studien-braune-spree.html)
- IWB (2012a): Weiterführende Untersuchungen zu hydrochemischen und ökologischen Auswirkungen der Exfiltration von eisenhaltigem, saurem Grundwasser in die Kleine Spree und in die Spree. Projektphase 2: Präzisierung der Ursachen und Quellstärken für die hohe Eisenbelastung des Grundwassers. Teil 1: Erkundung. – Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden; [www.lmbv.de/index.php/lmbv-studien-braune-spree.html](http://www.lmbv.de/index.php/lmbv-studien-braune-spree.html)
- IWB (2012b): Weiterführende Untersuchungen zu hydrochemischen und ökologischen Auswirkungen der Exfiltration von eisenhaltigem, saurem Grundwasser in die Kleine Spree und in die Spree. Projektphase 2: Präzisierung der Ursachen und Quellstärken für die hohe Eisenbelastung des Grundwassers. Teil 2: Maßnahmen. – Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden; [www.lmbv.de/index.php/lmbv-studien-braune-spree.html](http://www.lmbv.de/index.php/lmbv-studien-braune-spree.html)
- KUMAR, R.N., C.D. MCCULLOUGH & M.A. LUND (2012): Pit Lakes in Australia. – In: Geller, W., Schultze, M., Kleinmann, R. und Wolkersdorfer, C. (Hrsg.) Acidic Pit Lakes. The Legacy of Coal and Metal Surface Mines. – Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 342–362; ISBN 978-3-642-29384-9 (eBook)
- LBGR (2014): FAQ „Verockerung und Sulfatbelastung in den Fließgewässern der Lausitz“. – Internetauftritt des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe; [www.lbgr.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.330494.de](http://www.lbgr.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.330494.de)
- LMBV (2012): Flutungs- und Wasserbehandlungskonzept Lausitz. Teil 1: Herstellung und Nachsorge von Bergbaufolgeseen in Tagebaurestlöchern. Fortschreibung 2012. – Hrsg. Lausitzer

- und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg; 54 S.
- LUA (1995): Wasserbeschaffenheit in Tagebaurestseen – Analyse, Bewertung und Prognose – Untersuchungen im Lausitzer Braunkohlerevier. – Hrsg. Landesumweltamt Brandenburg. – Studien und Tagungsberichte 6, 86 S.; [www.lugv.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.304634.de](http://www.lugv.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.304634.de)
- LUA (2001): Tagebauseen. Wasserbeschaffenheit und wasserökonomische Sanierung – Konzeptionelle Vorstellungen und erste Erfahrungen. – Hrsg. Landesumweltamt Brandenburg. – Studien und Tagungsberichte 35, 77 S.; [www.lugv.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/lua\\_bd35.pdf](http://www.lugv.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/lua_bd35.pdf)
- LUCKNER, L. (1997): Flutungskonzept Lausitz. – 3. OLB Symposium „Sanierung Wasserhaushalt Lausitz“, Cottbus, 25. März 1997
- LUCKNER, L., B. HAVERKORN, H. MANSEL, D. SAMES & F. REHFELD (1995): Rehabilitierung des Wasserhaushaltes im Braunkohlenrevier Mitteldeutschland. – UniMedia GmbH, Leipzig und Dresden
- NOWEL, W., R. BÖNISCH, W. SCHNEIDER & H. SCHULZE (1994): Geologie des Lausitzer Braunkohlenreviers. Gewidmet dem 500. Geburtstag von Georgius Agricola. – Selbstverlag Lausitzer Braunkohle AG Senftenberg, 102 S.
- POTTGIESER, T. & M. SOMMERHÄUSER (2008): Erste Überarbeitung Steckbriefe der bundesdeutschen Fließgewässertypen, Typ 11: Organisch geprägte Böden; [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de), Stand: 22.4.2013
- PROKOP, G., P.L. YOUNGER & K.E. ROEHL (Hrsg.) (2004): Groundwater Management in Mining Areas. – Proceedings of the 2nd IMAGE-TRAIN Advanced Study Course. Pécs, Hungary, June 23-27, 2003. Conference Papers/Tagungsberichte CP-035. – Umweltbundesamt GmbH Wien/Vienna, 110 S.
- ROLLAND, W. & I. ARNOLD (2002): Der Wasserhaushalt im Mittenlauf der Spree und seine Beeinflussung durch den Menschen. – In: Bayerl, G., Maier, D. (Hrsg.) Die Niederlausitz vom 18. Jahrhundert bis heute: Eine gestörte Kulturlandschaft. – Cottbuser Studien zur Geschichte von Technik, Arbeit und Umwelt. – Waxmann Verlag, Münster, 199–235
- SAFETEC/LMBV (2001): Gutachten zur Verbesserung der Situation im Naherholungsgebiet Bornsdorf. – Berlin
- SOCHER, M., F. SANDER & F. HERBST (2009): Die Braunkohlefolgelandschaft in Sachsen und ihre Integration in das natürliche Gewässersystem. – Wasser und Abfall 11 (9), 6–17
- STUMM, W. & J.J. MORGAN (1996): Aquatic chemistry. Chemical equilibria and rates in natural waters. – John Wiley & Sons, New York
- UHLMANN, W. & U. GRÜNEWALD (1992): Auswirkungen des sauren Regens auf die Wasserressourcen. – DVGW-Schriftenreihe Wasser 72, 129–152
- UMK (1994): Rahmenkonzept zur Wiederherstellung eines ausgeglichenen Wasserhaushalts in den vom Bergbau beeinträchtigten Flussgebietseinzugsgebieten in der Lausitz und Mitteldeutschland – kurz: Rahmenkonzept Wasserhaushalt. – Umweltministerkonferenz der neuen Länder 17./18. März 1994
- VATTENFALL (2013): Hinterfragt. Lignite Mining & Generation. – Vattenfall Europe, Cottbus
- WORLD BANK (2002): Mining and Development: It's not over when it's over: mine closure around the world. – The World Bank Group's Mining Department; <http://siteresources.worldbank.org/INTOGMC/Resources/notoverwhenover.pdf>
- WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. – Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften
- YOUNGER, P.L. (2004): Impacts of Mining on Physical Hydrology. – In: Prokop, G., Younger P. & Roehl K. E. (Hrsg.) Groundwater Management in Mining Areas. – Proceedings of the 2nd IMAGE-TRAIN Advanced Study Course. Pécs, Hungary, June 32-37, 2003. Conference Papers/Tagungsberichte CP-035. – Umweltbundesamt GmbH Wien/Vienna