

The Groundwater Raise in Lignite Mining Induced Areas in Lusetia – Actions taken to reduce the Follows Ups

While mining of lignite in opencast ceased in Lausitz and Leipzig area, groundwater level raises fast. Housing areas and roads partly were erected without considering former ground water levels. In the drained soil strata, pyrite oxidized and formed vast quantities of iron hydroxide and sulphate. These substances are now carried out into nearby water courses. Investigations show some areas endangered from groundwater raise. Water quality problems occur along rivers and creeks due to inflowing iron hydroxide and sulphate. The Lausitzer and Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV), Senftenberg/Germany, de-

veloped dewatering wells as well as draining systems in order to lower water table. Innovative concepts were developed to reduce occurrence of ochre. This requires cleaning up the river course as well as running settling ponds along the streams. At hot spot areas the iron rich groundwater will be collected by drains and filtering wells. In the medium term the iron load of the ground waters will be reduced before entering the streams. Iron reduction by enhancing bacteria activities is a challenging approach. The economic reuse of the iron hydroxide is to be investigated.

Auswirkungen des Grundwasserwiederanstiegs in den vom Braunkohlenbergbau beeinflussten Gebieten in der Lausitz und Maßnahmen zur Minderung

Mit dem Ende der Förderung in den Braunkohlentagebauen der Lausitz und Mitteldeutschlands stieg das Grundwasser schnell bis nahe an die Oberfläche an. In den Jahrzehnten zuvor wurden teilweise ohne Berücksichtigung des zu erwartenden Grundwasserstands Gebäude, Verkehrswege und Infrastruktur errichtet. Systematische Untersuchungen zeigen die Gefährdung der grundwassernahen Bebauung. Auch bildeten sich in den entwässerten Grundwasserleitern erhebliche Mengen an wasserlöslichen Sulfaten und Eisenhydroxiden, die nun diffus in die Oberflächengewässer eingetragen werden. Die Wasserqualität in den Flüssen und Bächen wird durch den Eisen- und Sulfat-belasteten Grundwasserzustrom massiv beeinflusst. Die Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbauverwaltungsgesellschaft (LMBV), Senf-

tenberg/Deutschland, entwickelte Entwässerungsanlagen und Drainagen, um den Grundwasserspiegel niedrig zu halten. Innovative Konzepte werden verfolgt, um ockerfarbene Eisenhydroxid-Ausfällungen zu reduzieren. Dieses erfordert auch das Beräumen der Flussläufe sowie das Betreiben von Absetzbecken im Nebenschluss der Flüsse. An Belastungsschwerpunkten werden eisenbelastete Grundwasserströme vor Übertritt in die Gewässer durch Brunnengalerien und Drainagen abgefangen. Mittelfristig wird eine Behandlung des Grundwassers vor Eintritt in die Fließgewässer angestrebt. Die Versuche mit eisenreduzierenden Bakterien liefern inzwischen vielversprechende Ergebnisse. An der rohstofflichen Verwertung der abgeschiedenen Eisenhydroxide wird intensiv gearbeitet.

1 Introduction

Lignite mining hugely contributes to the supply of electrical energy in Germany. In the Lusatian district, the area between Dresden and Cottbus, nearly 65 mt of lignite were extracted in 2014, in order to generate 70 TWh electricity.

The lignite seams are embedded in horizontal strata of soft rock sand and silt of Tertiary and Pleistocene age. In order to extract this coal from depths of 30 to 50 m, the water in the overlying strata has to be lowered by draining. In the past a depression cone of approximately 2,100 km² occurred (Figure1), extending well over the borders of the opencast mining area.

1 Einleitung

Der Braunkohlenbergbau in Deutschland leistet einen wichtigen Beitrag zur Sicherung der Stromerzeugung. Im Lausitzer Revier zwischen Dresden und Cottbus wurden 2014 knapp 65 Mio. t Braunkohle gewonnen, um daraus 70 TWh Strom zu produzieren. Die Braunkohlenflöze sind horizontal in Lockergesteinsschichten aus tertiärem Sand und Schluff eingebettet. Um die Braunkohle aus ca. 30 bis 50 m Tiefe gewinnen zu können, ist es notwendig, die darüber liegenden Schichten zu entwässern. Dabei entstand in der Vergangenheit ein Absenkungstrichter von ca. 2.100 km², der weit über die Tagebaugrenzen hinausreichte (Bild 1).

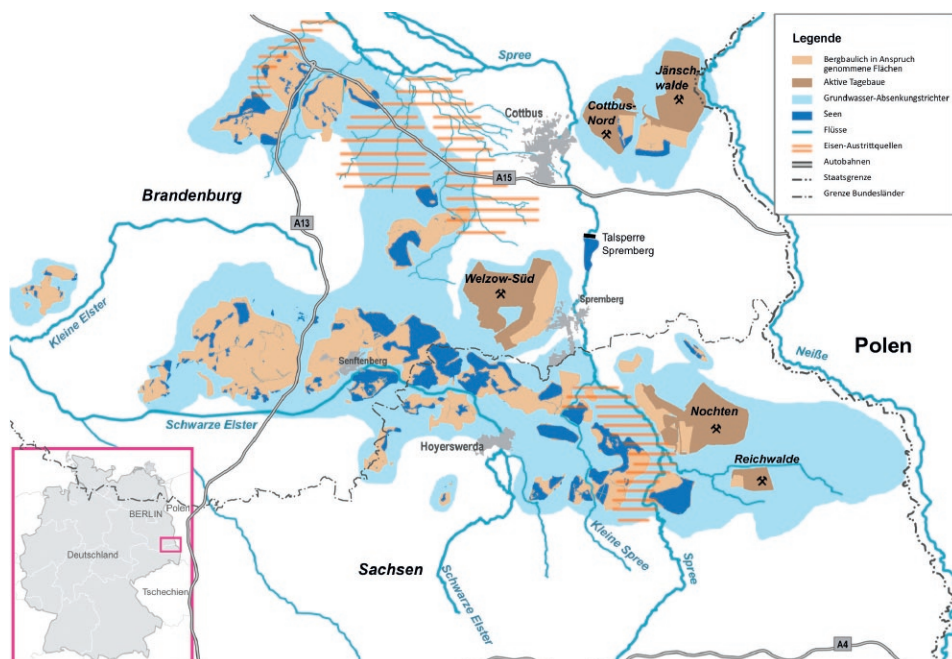


Fig. 1. Lusatian lignite mining district with ground water depression cone.
Bild 1. Lausitzer Braunkohlenrevier mit Grundwasserabsenkungstrichter.

Since 1990 a total of 32 lignite mines have had to be closed down in Lusatia. Either deposits have been depleted or the economic and competitive conditions have changed dramatically. The mining legislation requires all mines to be rehabilitated. Lausitzer and Mitteldeutsche Bergbauverwaltungs GmbH (LMBV), Senftenberg/Germany, has taken charge of the rehabilitation liability. LMBV carries out the removal of all installations, the stabilisation of slopes, the flooding of the opencast mining areas and restoring the water resources, induced by mining activities (1).

2 Problems occurring while ground water rise

For about 100 years, ground water had been pumped out of open cast mines in order to allow lignite mining. Ground water had been lowered about 30 to 50 m below surface. In this time, vast housing areas and townships like Hoyerswerda Neustadt had been erected in areas ground water had formerly been near surface.



Fig. 2. Iron burden in the "Kleine Spree" river.
Bild 2. Eisenbelastung in der Kleinen Spree.
Photo / Foto: Theiss, 2012

Seit 1990 mussten durch Erschöpfung der Lagerstätten und durch Veränderung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen 32 Braunkohlentagebaue geschlossen werden. Die Pflicht der Wiedernutzbarmachung nach Bergrecht wird durch die Lausitzer und Mitteldeutsche Braunkohlen-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV), Senftenberg, wahrgenommen. Dazu gehören der Rückbau der Anlagen, die Stabilisierung der Böschungen, die Flutung der offenen Tagebaue und die Wiederherstellung des Wasserhaushalts, soweit dieser bergbaubedingt verändert wurde (1).

2 Probleme infolge des Grundwasseranstiegs

Während mehr als 100 Jahren bergbaulicher Gewinnung von Braunkohle im Tagebau wurde der Grundwasserspiegel flächenhaft bis zu 30 bis 50 m tief abgesenkt. In dieser Zeit sind zahlreiche Wohngebäude, Straßen und unterirdische Leitungen in ehemals trockenen Bereichen verlegt worden. So ist die Neustadt Hoyerswerda in einem Gebiet errichtet worden, in dem früher das Grundwasser flurnah anstand. Mit dem nun erfolgten Grundwasseranstieg kam es zu Problemen sowohl in der Höhe des Grundwasserstandes als auch in der Qualität des sich bildenden Grundwassers.

Durch die Belüftung der entwässerten Bodenschichten im Absenkungstrichter wurde Pyrit, das vorher unter Luftabschluss darin fein verteilt lagerte, zu Eisenhydroxid und Sulfat oxidiert. Mit dem ansteigenden Grundwasser werden diese wasserlöslichen Stoffe in die Fließgewässer eingetragen. Während Sulfat im Fließgewässer in Lösungsphase bleibt, wird das gelöste zweiwertige Eisen oxidiert und fällt aus. Der dadurch entstehende Eisenocker stellt eine starke Belastung der Fließgewässerökosysteme dar (Bild 2). Wasserpflanzen werden durch die Trübung in ihrer Entwicklung wegen Lichtmangels gehemmt, Muscheln durch den feinen Schlamm erstickt und Fische verlieren ihr Laichhabitat durch Verschlammung.

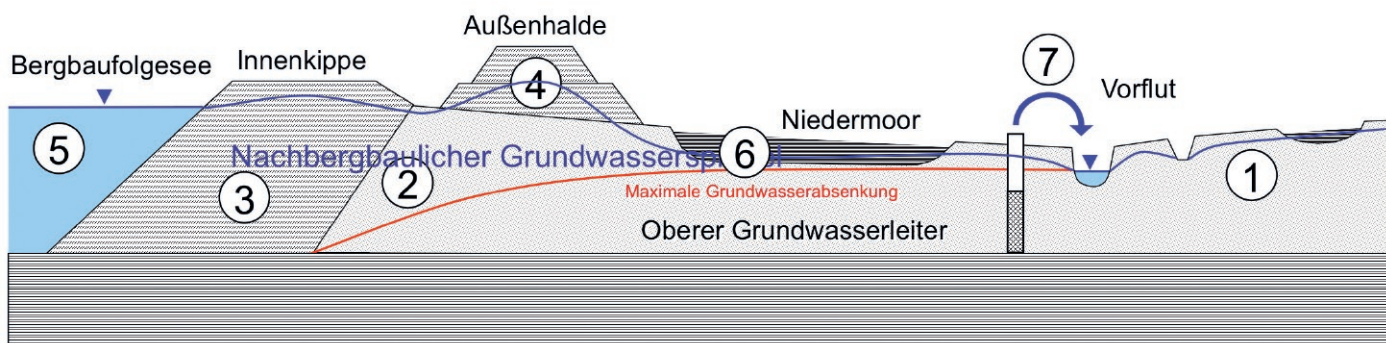


Fig. 3. Sources of iron contamination in watercourses in Lusatian district (4).
Bild 3. Ursachen der Eisenbelastung in den Fließgewässern (4).

While lowering ground water, the oxidation of the drained strata in the depression cone has resulted in soluble iron and sulphate compounds. As the ground-water level rises, these substances are now carried into the water courses. While sulphate remains in solution in these waters, iron oxidises further, forming iron precipitate. Heavy loads of the resultant iron ochre represent a serious burden for the water course ecosystems affected (Figure 2). As a consequence, i.e., water plants lack light because of suspended solids. Mussels are smothered by the fine silt and the turbidity deprives fishes of their spawning grounds through the accumulation of mud.

Investigations by consulting firm IWB in 2013 have shown that there are various sources for accumulation of iron ochre in water courses (2, 3). Lignite mining in Lusatia has resulted in large disturbance of the catchment (Figure 3). Besides this, agricultural improvements such as surface draining (no. 1) or turf cutting or even bog iron ore extraction in the last century causes an "initial load".

The aeration of aquifers following the groundwater depression takes place even far outside the immediate opencast mining area (no. 2). Oxidation in these aquifers is relatively weak compared to that in material that was relocated in inner dumps (no. 3) or in outer dumps (no. 4) during mining operations. The inner dumps will be submerged again once the water table has been restored. At least in the long term this will result in the cessation of the oxidation process. The outer dumps will become completely oxidised in long terms. These substances will be carried into the groundwater as well as surface water bodies by precipitation.

Groundwater outflows from acid post-mining lakes (no. 5) partly are polluted with iron. In Lusatia numerous moorlands are a very significant source of iron (no. 6) because large quantities of iron sulphide minerals have formed as they developed. As the ground water rises the oxidised iron compounds are washed out.

3 Iron Stress and Hot Spot Areas

In the river Kleine Spree the concentration of iron till 2010 rose continuously up to approximately 10 mg/l while mean low water level in summer time. After a period of heavy precipitation in 2010 and 2011, high concentrations of iron could be measured along some inflow areas of 20 km of the river Spree (5).

This iron originates from the Pleistocene aquifer in the depression cone of the former Lohsa and Burghammer lignite opencast mines. The ground-water level in the Pleistocene aquifer had been lowered by as much as 50 m. As a result the soil layers had

Untersuchungen des Ingenieurbüros IWB im Jahr 2013 haben gezeigt, dass es je nach örtlicher Gegebenheit unterschiedliche Quellen für die Verockerung der Fließgewässer gibt (2, 3). Der Bergbau auf Braunkohle hat massiv in den Wasserhaushalt eingegriffen. Aber auch zur landwirtschaftlichen Melioration, zum Torfabbau oder zur Raseneisenerzgewinnung wurden lokale Grundwasserabsenkungen vorgenommen. Diese vom Bergbau unabhängigen Ursachen werden in Bild 3 als Vorbelastung (Ziffer 1) dargestellt.

Die Belüftung gewachsener Grundwasserleiter durch die Grundwasserabsenkung im Umfeld der Tagebaue (Ziffer 2) ist eine wesentliche Quelle der Sulfat- und Eisenhydroxidbildung. Durch die Grundwasserabsenkung gelangte Luftsauerstoff an vorher unter Luftabschluss liegende Bodenschichten. Auch in den Innenkippen (Ziffer 3) und Außenhalden (Ziffer 4) wurden die Eisensulfide oxidiert. Die Innenkippen werden nach Abschluss des Grundwasserwiederanstieges zwar wieder unter Wasser liegen, womit die Oxidation in der Zukunft gestoppt werden wird. Die Stofffrachten der Außenhalden jedoch, die über dem Grundwasserleiter liegen, werden durch den Niederschlag weiterhin in die Gewässer ausgetragen.

Auch der Grundwasserabstrom aus sauren Bergbaufolgeseen (Ziffer 5) kann eisenbelastet sein. Eine sehr bedeutsame Eisenquelle sind die Niedermoore in der Lausitz (Ziffer 6), die bei Ihrer Genese große Mengen an Eisensulfidmineralen gebildet haben. Durch die Grundwasserabsenkung wurden diese Niedermoore belüftet und das darin enthaltene Eisensulfid oxidiert. Mit der Wiedervernässung im Zuge des Grundwasserwiederanstieges werden hieraus bedeutende Frachten ausgetragen.

3 Eisenbelastungen an Schwerpunktbereichen

In der Kleinen Spree stieg die mittlere Eisenkonzentration bei Niedrigwasser bis 2010 kontinuierlich auf etwa 10 mg/l an. Nach einer niederschlagsreichen Periode in den Jahren 2010 und 2011, die zu einem hohen Grundwasserstand führte, wurden schließlich auch in der Spree auf einer Strecke von etwa 20 km Länge sichtbar hohe Eisenkonzentrationen gemessen.

Das Eisen stammt aus dem unverritzten, pleistozänen Grundwasserleiter im Absenkungstrichter der ehemaligen Braunkohlentagebaue Lohsa und Burghammer. Das Grundwasser in den pleistozänen Grundwasserleitern war seinerzeit um bis zu 50 m abgesenkt worden. Infolgedessen wurden die Bodenschichten für viele Jahrzehnte belüftet. Die klastischen pleistozänen Sedimente der „Spreewitzer Rinne“ enthalten etwa 0,01 bis maximal

been aerated for many decades. There are no aquitards in the upper level of the aquifer. The clastic Pleistocene layers show between 0.01% and, at most, 0.05% of pyrite by mass, while they do not contain any carbonate minerals whatsoever.

The pyrite weathered significantly because of the good permeability of the coarse, dewatered aquifer. Because of this, groundwater locally contains up to 400 mg/l of iron and 1,400 mg/l of sulphate. Groundwater that is so severely polluted had previously only been encountered in well-aerated lignite opencast mine dumps. Following the raising of the ground water level, this ground water now flows into water courses (Figure 4).

The historic level of iron in Lusatian water courses is quite high of approximately 1 mg/l. The iron comprises of differing proportions of dissolved iron(II), iron(II, III) humic acids and iron(III) hydroxide in suspension. The adsorption of daylight is so strong that even relatively low concentrations of iron(III) hydroxide result in high degrees of turbidity. Above concentrations of about 3 mg/l, the iron(III) hydroxide can be seen colouring bodies of water and water courses ochre and making them turbid.

The iron is transferred from the ground water as iron(II). The oxidation of iron(II) in the water courses depends on temperature and pH value. The hydrolysis of iron(III) lowers the pH value so that conditions for iron oxidation in the water courses deteriorate further. As a result, particularly in winter time when through flows are higher, the dissolved iron(II) is transported over considerable distances. At present iron(II) at a pH value ranging from 5 to 6 is being found in the river Kleine Spree because of the pH-limited oxidation. Because of the high quantity of groundwater inflow (1.0 m³/s) along the river Spree, the concentration of iron has risen up to 10 and 20 mg/l. The majority of the iron occurs as iron(III) hydroxide. During the winter months as much as 50% of the iron is found as dissolved iron(II). The iron oxide sludge is deposited along the banks and stagnant water zones of the affected watercourses. It is resuspended during high water periods and carried further by the flow. Consequently the total concentration of iron in the river Spree can reach 10 to 20 mg/l.

Iron can currently be identified along Spree River as far as the Spremberg reservoir (Figure 5). At present the Spremberg reservoir is providing reliable protection to downstream stretches of the river Spree. This includes the Spreewald biosphere reserve and tourism destination.

The high iron load of the river Spree is harmful to its ecology. German water legislation (Wasserhaushaltsgesetz) in § 27 do not permit the deterioration of a body of water or of a water course. It requires to localise the sources of contamination precisely so that targeted preventive measures can be planned and implemented.

4 Implementation of Monitoring

The localisation and quantification of inflow presents a challenge to hydrogeological monitoring. The diffuse iron-loaded inflows can be measured directly at very few sites. Depending on the local and hydrological conditions there are various methods that are suitable for measuring diffuse material discharges:

- hydrochemical groundwater exploration;
- flow monitorings in the entire watercourses on particular days.

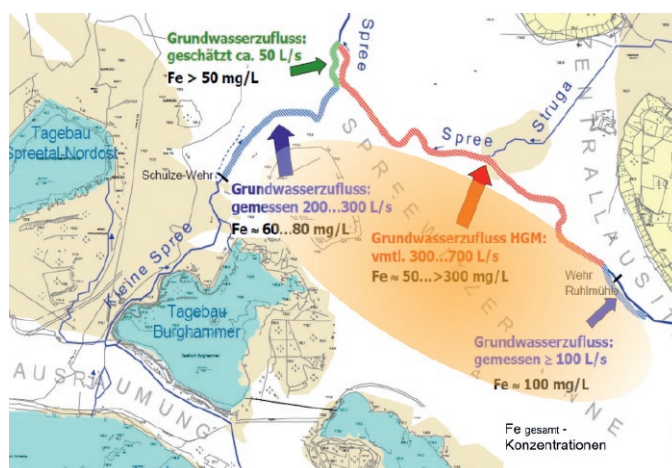


Fig. 4. Iron loaded groundwater inflow into the river Spree and the river Kleine Spree.

Bild 4. Eisenbelastete Grundwasserzuflüsse zur Spree und zur Kleinen Spree.

0,05 Masse-% Pyrit. In diesen Sedimenten fehlen jedoch puffernde Karbonatminerale.

Das Pyrit wurde aufgrund der guten Durchlässigkeit der entwässerten Grundwasserleiter stark durchoxidiert. Das wieder steigende Grundwasser enthält heute lokal bis 400 mg/l Eisen gesamt und bis 1.400 mg/l Sulfat. Infolge des Grundwasseranstiegs infiltriert dieses Grundwasser nunmehr in die Fließgewässer Spree und Kleine Spree (Bild 4) und trägt diese Stoffe ein. Ein so stark beeinflusstes Grundwasser wurde bisher nur an den gut durchlüfteten Kippen beobachtet.

Die Hintergrundbelastung der Fließgewässer in der Lausitz liegt bei 1 mg/l Eisen gesamt. Das Eisen setzt sich zusammen aus gelöstem Eisen(II), aus huminstoffkomplexiertem Eisen(II) und Eisen(III) sowie aus suspendiertem Eisen(III)hydroxid. Ab einer Konzentration von etwa 3 mg/l tritt Eisen(III)hydroxid im Gewässer als Ockerfärbung und Trübung in Erscheinung.

Das Eisen wird aus dem Grundwasser als Eisen(II) ausgetragen. Die Oxidation des Eisens(II) in den Fließgewässern ist vor allem von der Temperatur und vom pH-Wert abhängig. Aufgrund der erhöhten Durchflüsse im Winter werden die gelösten Eisenbestandteile über weite Entfernungen flussabwärts getragen. Die Hydrolyse des Eisens(III) senkt den pH-Wert. Gegenwärtig wird in der Kleinen Spree ein pH-Wert von 5 bis 6 gemessen. Aufgrund der hohen Anteile des zuströmenden Grundwassers von 1 m³/s am mittleren Durchfluss von 14 m³/s werden aktuell Eisen-gesamt-Gehalte von 10 bis 20 mg/l gemessen. Das Eisen liegt hier überwiegend als Eisen(III)hydroxid vor. Im Uferbereich und in den Stillwasserzonen der betroffenen Fließgewässer lagert sich dieser Eisenhydroxidschlamm ab. In den Wintermonaten wird – bei höheren Durchflüssen – das gelöste Eisen(II) resuspendiert und über große Entfernungen transportiert. Die Eisen-gesamt-Konzentration in der Spree kann dadurch auf 10 bis 20 mg/l ansteigen.

Die Eisenbelastung der Spree ist derzeit bis zur Talsperre Spremberg nachweisbar (Bild 5). In den Vorbecken der Talsperre wird das Eisen gegenwärtig weitgehend zurückgehalten. Die Talsperre Spremberg bewahrt zur Zeit die Gewässerunterlieger der Spree – dazu zählt das Biosphärenreservat Spreewald – zuverlässig vor den Folgen der Verockerung durch die Eisenbelastung.



Fig. 5. Iron load carried into the Spremberg reservoir.
Bild 5. Eiseneintrag in die Talsperre Spremberg. Photo / Foto: Rauhut, 2013

Hydro chemical ground water surveys in the immediate neighbourhood of the river allow the inflow area to be delimited. This requires a close-meshed network of ground-water wells. In the entire river Kleine Spree, monitoring of flows and water quality on particular days are promising. When a section of the water course is closely covered with flow monitoring and sampling points, the volume and material inflows can be spatially defined with a high level of resolution. To determine the loads of dissolved substances the monitoring was made on a particular day at low outflow rates and under stable hydraulic and geohydraulically conditions. To determine the hydraulic conditions, the water levels in the water courses and the ground-water level near the river are measured with load cells and continuously logged.

A diffuse ground water inflow of between 50 and 300 l/s was identified along a stretch of the river Kleine Spree of approximately 4 km (Figure 4). The emerging groundwater had a mean iron concentration of between 70 and 80 mg/l. An iron concentration ranging from 3 to 450 mg/l was measured at about 20 monitoring points in the ground water surrounding the river Kleine Spree. The median for iron concentration in the ground water is between 50 and 60 mg/l.

In the river Spree with comparatively high flow rates ($5-10 \text{ m}^3/\text{s}$), the water quality has been successfully monitored at short intervals. The hydrochemical results have been associated with flow rates at continuously monitored wells. This allows a reliable determination of iron loads over a longer monitoring period. Drawing up an overall balance involves a number of specific problems. At low rates of flow, there is a relatively high proportion of diffuse inflows from ground water. Some of the iron remains in the riverbed as iron sludge (Figure 6). That iron is not registered by discrete monitoring. Usually the sedimented iron sludge is remobilised during a high water event. On the other hand, during such event the diffuse inflow of ground water is pushed back. Consequently during high waters, in spite of the short flow times, mainly iron(III) hydroxide and hardly any dissolved iron(II) are found. In the Spremberg Reservoir three monitoring campaigns were set up: upstream of the auxiliary dam,

Die hohe Eisenbelastung der Spree beeinträchtigt nicht nur die optische Erscheinung des Gewässers, sondern beeinflusst auch den ökologischen Zustand. Gemäß § 27 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) sind die Gewässer so zu bewirtschaften, dass eine Verschlechterung vermieden, ein negativer Trend umgekehrt und eine Verbesserung ermöglicht wird. Daher ist eine präzise Lokalisierung der Quellen durch ein Monitoring notwendig, um Abwehrmaßnahmen gezielt planen und durchführen zu können.

4 Durchführung eines Monitorings

Die Lokalisierung und Quantifizierung der diffusen Stoffeinträge entlang der Fließgewässer stellen eine besondere Herausforderung für die hydrogeologische Erkundung dar. Die eisenbelasteten, diffusen Zuflüsse lassen sich nur an wenigen Stellen direkt messen. Je nach den örtlichen und hydrologischen Bedingungen sind unterschiedliche Methoden zur Erfassung der diffusen Stoffeinträge durchgeführt worden:

- hydrochemische Erkundung des Grundwassers,
- Stichtagsmessungen der Durchflüsse im Fließgewässer.

In den Fließgewässern der Spree und Kleinen Spree wurden Stichtagsmessungen zu den Durchflüssen und zur Wasserbeschaffenheit durchgeführt. Bei einer dichten Auflösung des Gewässerabschnitts mit Durchfluss- und Probenahmestellen konnten die Eintragsbereiche räumlich aufgelöst ermittelt werden. Stichtagsmessungen zur Ermittlung von Stofffrachten wurden bei niedrigen Abflüssen und bei stationären hydraulischen und geohydraulischen Verhältnissen durchgeführt. Der Wasserstand in den Fließgewässern und der flussnahe Grundwasserstand wurden durch Druckmessdosen erfasst und kontinuierlich aufgezeichnet.

In der Kleinen Spree wurde durch Messungen auf einem Abschnitt von etwa 4 km ein diffuser Grundwasserzutritt zwischen 50 und 300 l/s ermittelt (Bild 4). Das zutretende Grundwasser hat eine mittlere Eisenkonzentration von 70 bis 80 mg/l. Im umgebenden Grundwasser der Kleinen Spree wurde an etwa 20 Messstellen eine Eisenkonzentration zwischen 3 und 450 mg/l gemessen. Der Medianwert der Eisenkonzentration lag im Grundwasser bei 50 bis 60 mg/l.

In der Spree, einem Fließgewässer mit vergleichsweise hohen Durchflüssen ($5-10 \text{ m}^3/\text{s}$), ist ein zeitlich dichtes Monitoring der Wasserbeschaffenheit durchgeführt worden, um über einen längeren Messzeitraum Stofffrachten des Eisens zu ermitteln. Die Bilanzierung der Stofffrachten ist jedoch mit spezifischen Problemen behaftet. Bei niedrigen Durchflüssen, wenn die diffusen Stoffeinträge aus dem Grundwasser anteilig hoch sind, bleibt ein Teil des Eisens im Flussbett als Eisenschlamm liegen (Bild 6). Dieses Eisen wird durch die diskreten Messungen nicht erfasst. Der sedimentierte Eisenschlamm wird in der Regel bei einem Hochwasser remobilisiert, andererseits der diffuse Grundwasserzutritt zurückgedrängt. Bei Hochwasser werden deshalb trotz der kurzen Fließzeiten überwiegend Eisen(III)hydroxid und kaum gelöstes Eisen(II) gemessen. An der Talsperre Spremberg wurden drei Messstellen eingerichtet, an denen täglich Stichproben genommen werden: vor der Vorsperre, nach der Vorsperre und nach der Hauptsperre. Da an diesen Stellen auch die Durchflüsse bekannt sind, können die Transformation und der Rückhalt des Eisens in der Vorsperre und in der Hauptsperre bewertet werden. Anhand

downstream of it, and downstream of the main dam. As the flows at these positions are known, it was possible to assess the transformation and the retention of iron in the reservoir. Using the results from the monitoring point above the Spremberg Reservoir the seasonal and hydrological influences on iron transport can be identified.

In the river Spree, the volumetric flows of the diffuse groundwater inflow into the river Spree cannot be measured directly. Taking the regional water balance into account, and applying the values of a geohydraulic ground-water and runoff-model, the volume of flow is estimated to be between 300 and 700 l/s (Figure 4). The concentration of iron can be captured here at a few selected locations where groundwater monitoring wells have been installed.

A few local surface tributaries to the river Spree can be reliably measured. An oxbow parallel to the river Spree drains groundwater over a stretch of about 1 km. The ground-water inflow into the oxbow is most stable during low and medium water periods. At an inflow between 100 and 130 l/s; here the iron concentration is about 150 mg/l. Another 600 m long ditch for lowering local ground water draws off about 20 l/s of ground water containing over 350 mg/l of iron load.

Planning preventive measures it is important to know the diffuse ground water peak inflows into water courses. This issue has both a hydraulic and a hydrochemical aspect. The maximal ground-water inflow into water courses is expected when the ground-water rise will be completed in some years. Ground water hydrographs show that the increase in ground-water levels has progressed far, but is not yet complete in all parts of the area under investigation.

In most places where ground water is monitored the iron concentration has been stable for a long time. In some monitoring wells near the river the concentration of iron increases as the ground-water level rises. At present, about 600 to 1,200 l/s of iron-loaded ground water flows into the rivers Kleine Spree and Spree. The volume of iron-loaded ground water in the Spreewitz groove is estimated to be between 600 and 800 m³. The balance also shows that flows of iron-loaded groundwater into the watercourses must be expected to continue at least for the next 50 years.

5 Remediation Approaches

To reduce the iron load in the river Spree different approaches are followed:

- water treatment in or near the river;
- water retention, drainage; and
- treatment.

A water treatment plant and a natural wetland area in or near the river are being examined as potential solutions. Such treatment plant on the river Spree would have to be dimensioned for a volume flow of 12 m³/s at initial inflow values of between 4 and 8 mg/l of iron. An appropriately dimensioned technical plant of this size and for these inputs would be very expensive to build and operate. A natural retention wetland on the other hand would require an area of between 30 and 60 ha for treatment by sedimentation. Such areas are not available in the intensively

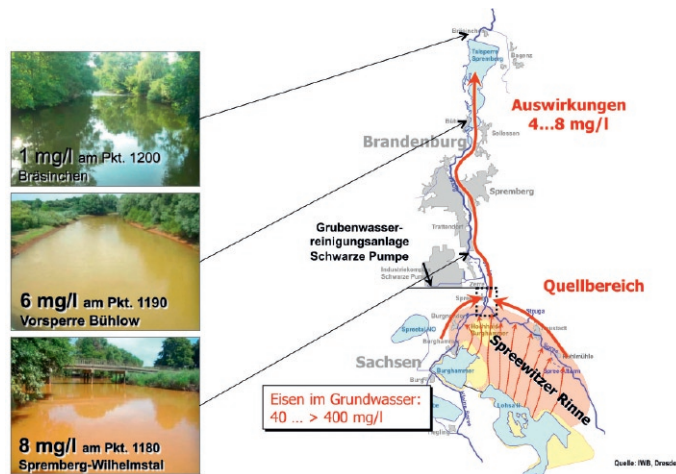


Fig. 6. Iron impact along the river Spree.
Bild 6. Eisenbelastung entlang der Spree.

der Befunde zur Messstelle vor der Talsperre Spremberg können die jahreszeitlichen und hydrologischen Einflüsse auf den Eisen-transport gekennzeichnet werden.

Der Volumenstrom der diffusen Grundwasserzuflüsse zur Spree ist nicht direkt messbar. Er wurde aus der Gebietswasserbilanz unter Verwendung von Messwerten und von Modellwerten eines geohydraulischen Großraummodells mit 300 bis 700 l/s geschätzt (Bild 4). Die Eisenkonzentration lässt sich hier punktuell in Grundwassermessstellen erfassen.

Der Grundwasserzutritt zu einem Altarm der Spree liegt bei Niedrigwasser und mittlerem Hochwasser vergleichsweise stabil zwischen 100 und 130 l/s. Die Eisenkonzentration beträgt hier derzeit etwa 150 mg/l. Ein Graben zur lokalen Grundwasserabsenkung erfasst auf einer Länge von 600 m etwa 20 l/s Grundwasser mit einer hohen Eisenfracht von 350 mg/l.

Wichtig für die Planung von Abwehrmaßnahmen ist die Kenntnis des zeitlichen Verlaufs der diffusen Grundwasserzutritte zu den Fließgewässern. Die maximale Fracht im Grundwasserzustrom zu den Fließgewässern ist mit dem Abschluss des Grundwasserwiederanstiegs zu erwarten. Grundwasserganglinien zeigen, dass der Grundwasserwiederanstieg zwar weit fortgeschritten, jedoch noch nicht in allen Teilbereichen des Untersuchungsgebiets abgeschlossen ist.

Während an den meisten Grundwassermessstellen die Eisenkonzentration seit langer Zeit stabil ist, nimmt sie an einzelnen flussnahen Grundwassermessstellen mit dem Grundwasseranstieg zu. Insgesamt fließen der Kleinen Spree und der Spree derzeit etwa 600 bis 1.200 l/s eisenbelastetes Grundwasser zu. Das Volumen des eisenbelasteten Grundwassers in der Spreewitz Rinne wird mit 600 bis 800 Mio. m³ geschätzt. Die Bilanz zeigt weiterhin, dass mit dem Austritt eisenreichen Grundwassers in die Fließgewässer in den nächsten 50 Jahren gerechnet werden muss.

5 Ansätze zur Eisenhydroxid Minderung

Die Eisenbelastung in der Spree wird schutzgutbezogen mit unterschiedlichen Verfahren angegangen:

- Wasserbehandlung am Fließgewässer,
- Wasserfassung, -ableitung und -behandlung und
- Wasserbehandlung im Grundwasser.

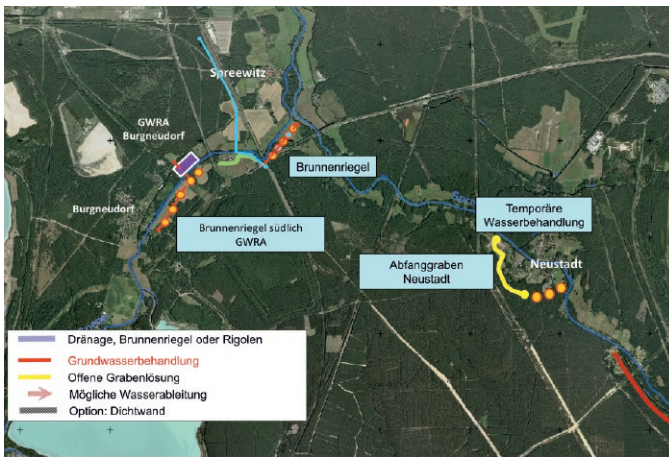


Fig. 7. Actions to reduce iron discharge into the River Spree.
Bild 7. Maßnahmen zur Minderung der Eisenbelastung an der Spree.

used landscape near to the river Spree.

Nevertheless the technical effort to reduce iron load is considerable. A barrier concept had been developed (Figure 7). The technology includes four stages: extraction the raising ground water, transfer it to a treatment plant, cleaning the iron-loaded ground water, and finally treating the iron sludge. Cleaning the iron-loaded ground water is ideally carried out in a water treatment facility using alkaline and polymer flocculants. As an alternative to a treatment plant, the iron-rich ground water can be pumped (no. 6) into the deep, anoxic area of a nearby post-mining lake.

A remediation of the entire Pleistocene aquifer contaminated with iron is out of question because of its enormous quantities as well as very high costs. Legal exemption from water management plans are asked for to water authorities according §31 German water law.

Quite apart from the fact, there is no state-of-the-art ground water treatment technology for dealing with the iron load mentioned. It is acknowledged that there are possibilities for developing subsurface water treatment using microbiological iron

Zur Wasserbehandlung unmittelbar an der Spree wird die Errichtung einer Flusskläranlage im Nebenstrom geprüft. Diese ist für einen Volumenstrom von $12 \text{ m}^3/\text{s}$ bei Eiseneingangswerten von 4 bis 8 mg/l auszulegen. Diese technische Flusskläranlage erfordert jedoch einen hohen Aufwand für Errichtung und Betrieb. Für eine naturräumliche Flusskläranlage (Wetlands) gleicher Leistung sind die Kosten geringer, jedoch sind etwa 30 bis 60 ha Fläche zur Behandlung erforderlich.

Zur Abwehr der diffusen Stoffeinträge aus dem Grundwasser in die Fließgewässer wird deshalb ein sogenanntes Barrierenkonzept favorisiert (Bild 7). Das eisenbelastete Grundwasser wird kurz vor dem Austritt in die Fließgewässer abgefangen. Hierfür werden vor allem hydraulische Abfangmaßnahmen mit Drägen oder Brunnen geprüft. Das dort gefasste Wasser soll dann in einen nahegelegenen Bergbaufolgesee eingeleitet und dort bei der Inlake-Wasserbehandlung mitbehandelt werden. Dadurch werden keine zusätzlichen Wasserbehandlungsanlagen benötigt und der entstehende Eisenschlamm am Seeboden abgelagert.

Dennoch ist der technische Aufwand hoch. Die Technologie umfasst die Schritte Fassung und Hebung des Grundwassers, seine Ableitung und die Reinigung des eisenbelasteten Grundwassers. Die Reinigung des eisenreichen Grundwassers erfolgt vorzugsweise durch Verwendung von alkalischen Flockungsmitteln und polymeren Flockungshilfsmitteln. Alternativ wird geprüft, wie das eisenreiche, anoxische Grundwasser in den tiefen, anoxischen Bereich eines benachbarten Bergbaufolgesees gespült werden kann.

Eine flächenhafte Sanierung des eisenbelasteten pleistozänen Grundwasserleiters ist wegen der enormen Frachten, die im Grundwasser gelöst sind, technisch nur bedingt durchführbar und mit unverhältnismäßig hohem Aufwand verbunden. Daher wird hier eine Ausnahme von den Bewirtschaftungszielen nach §31 WHG angestrebt.

Im Rahmen des Barrierenkonzepts werden auch innovative Verfahren der Untergrundwasserbehandlung (6) durch mikrobielle Eisenreduktion und Bildung von sulfidischem Eisen getestet (Bild 8). Das gehobene Grundwasser wird mit Nährstoffen an-

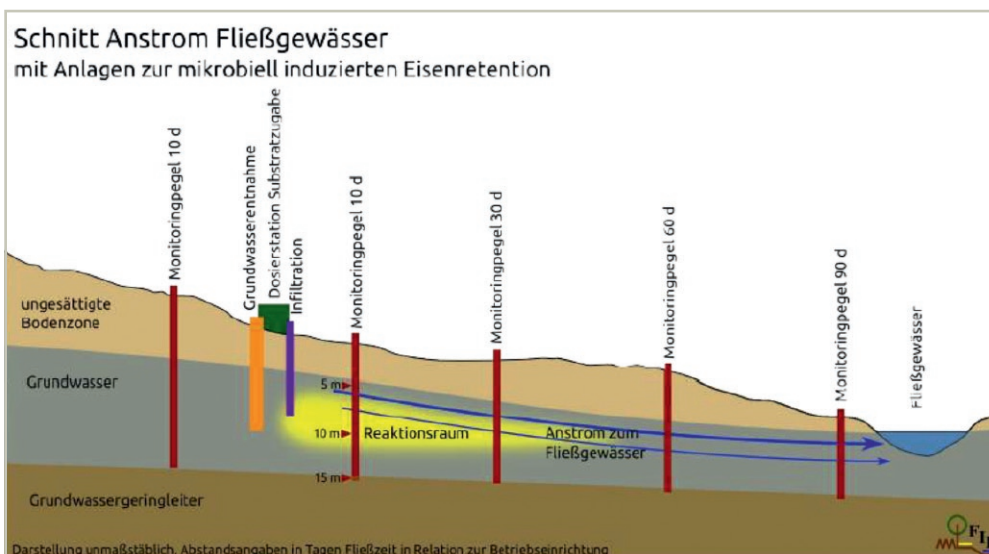


Fig. 8. Microbiological iron reduction.
Bild 8. Mikrobielle Eisenreduktion.

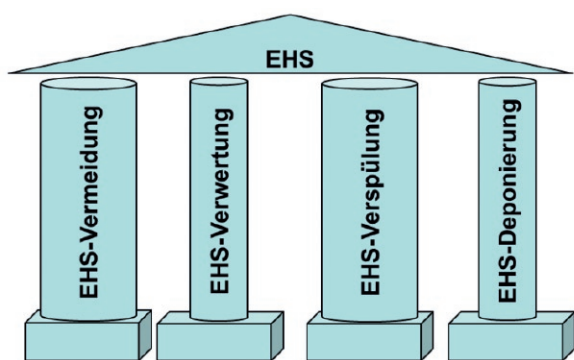


Fig. 9. Concept of Reutilization of iron hydroxide.
Bild 9. Konzept zum Umgang mit EHS.

reduction (6). In an on-going test, nutrients are added to raised waters (Figure 8). Injected to the groundwater shed on a length of about 100 m, bacteria convert iron hydroxide to iron sulfate. The result up to now are challenging: on the flow of about 100 days to Spree River, iron is reduced for about 40%, sulfate of about 15%. The significantly greater expense characteristic of this process is partly made up for by the absence of drainage, water treatment, and iron sludge treatment. Large-scale field trials in this context are underway (4).

As an hydraulic alternative the installation of a barrier wall on the northern border of the Lohsa post-mining lake is being examined. The intention would be to achieve a substantial reduction of the groundwater outflow, and thus of the iron loads being carried to the river Spree. A barrier solution could reduce measures near the river in the medium term.

6 Recovery of Iron Hydroxide

According to the concept mentioned, technical and economic ways of the reutilization of the iron hydroxide bogs are investigated. The iron bog taken out of the streams varies very much in content and form. New approaches are to be investigated. The reutilization is preferred instead of dumping (Figure 9). Actually, new utilization forms are investigated with partners from industries as well as from scientific organizations.

7 Summary

The soil strata in the Lusatian lignite basin contains pyrite which oxidized as a consequence of lowering the ground water in previous decades. This has resulted in the formation of ground water that contains up to 400 mg/l of iron in some places. This ground water is now diffusely flowing into the water courses of Spree River. A specific exploration scheme has been implemented to determine the loads along the river flow. Hydrochemical surveying of the groundwater at numerous monitoring well near to the river permits local differences in load levels to be determined. Varying loads were identified by repeating monitorings on specific days in summer and winter.

A barrier concept has been developed to reduce the load along the course of the rivers Spree and Kleine Spree respecting varying loads of the inflow. A substantial reduction of these discharges can be achieved economically over the medium term.

gereichert und durch Lanzen auf 100 m Länge dem Grundwasser wieder zugeführt. Während des 100 Tage dauernden Fließwegs setzen die Bakterien die Eisenhydroxide zu Eisenmonosulfid um. Der verfahrensspezifisch etwas höhere Aufwand der Infiltration und Überwachung wird durch den Verzicht auf die Wasser- und Schlammbehandlung kompensiert. Hierzu laufen derzeit großmaßstäbliche Feldversuche (4).

Als hydraulische Alternative wird der Bau einer Dichtwand an der Nordtangente des Bergbaufolgesees Lohsa geprüft. Damit sollen eine substantielle Verringerung des Grundwasserabstroms und letztlich eine Reduzierung der Eisenfrachten zur Spree erreicht werden. Mit der Dichtwand können die flussnahen Maßnahmen mittelfristig entlastet werden. Der Bau von Grundwasserdichtwänden ist Stand der Technik im Lausitzer Braunkohlenbergbau.

6 Konzept der Eisenhydroxidverwertung

Im Rahmen des Konzepts wurden auch mögliche technisch und wirtschaftlich umsetzbare Maßnahmen zur Vermeidung, Verwertung und sicheren Verbringung des anfallenden Eisenhydroxids geprüft. Grundsätzlich wird die Strategie Vermeidung vor Verwertung vor Verspülung vor Deponierung verfolgt (Bild 9). Eisenhydroxidschlamm (EHS) aus Fließgewässern stellt aufgrund seiner heterogenen Zusammensetzung und der Verbreitung über das weitverzweigte Gewässernetz die größte Herausforderung dar, der durch eine Kombination aus Vermeidung und Verspülung in Bergbaufolgeseen begegnet werden soll. Dazu werden zurzeit mit Partnern der Industrie und Wissenschaft neue Verfahren und weitere Vertriebswege untersucht.

7 Fazit

Die tertiären und pleistozänen Lockergesteinsschichten der Lusatitz enthalten erhebliche Anteile an Pyrit. Durch die Grundwasserabsenkung wurde dieser Pyrit in den vergangenen Jahrzehnten oxidiert. In der Folge ist ein Grundwasser entstanden, das örtlich bis 400 mg/l Eisen gesamt und bis 1.400 mg/l Sulfat enthält und diffus den Fließgewässern zuströmt. Zur Feststellung der Belastungen wurde ein spezielles Erkundungsprogramm durchgeführt, das mit zahlreichen Durchfluss- und Beschaffenheitsmessungen die Bereiche mit hohen Einträgen entlang der Fließgewässer Spree und Kleine Spree ermittelt. Durch mehrfache Stichtagsmessungen sind unterschiedlich hohe Einträge im Sommer und Winter festgestellt worden.

Der unterschiedlichen Belastung entlang der Fließstrecke entsprechend werden mit einem Barrierekonzept zielgerichtet Maßnahmen zur Minderung der diffusen Stoffeinträge geplant und umgesetzt. Dazu zählen Flusswasserreinigungsanlagen sowie naturräumliche Absetzbecken. Das entlang der Fließstrecke gehobene Grundwasser wird vor Übertritt in den Fließgewässern abgefangen und in das Tiefste eines Bergbaufolgegewässers eingeleitet. Eine aussichtsreiche Alternative ist die mikrobielle Eisenreduktion. Mittelfristig wird von den Maßnahmen eine substantielle Minderung der Stoffeinträge erwartet.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Benthau, F. C., Scholz, E., Heine, R., Totsche, O.: Sanierung des Wasserhaushaltes in den Braunkohlenbergbaugebieten Mitteldeutschlands und der Lausitz. Glückauf 146 (2010), Nr.10, S. 470–474.
- (2) Uhlmann, W., Theiss, S., Nestler, W., Franke, C.: Untersuchungen der hydrochemischen und ökologischen Auswirkungen der Exfiltration von eisenhaltigem, saurem Grundwasser in die Kleine Spree und in die Spree, Teil 1 Erkundung, Teil 2 Maßnahmen. Institut für Wasser und Boden, Dr. Uhlmann, Dresden, 2010. www.lmbv.de
- (3) Uhlmann, W., Seiler, D., Zimmermann, K., Theiss, S., Engelmann, C., Lommatzsch, P.: Studie zu den Auswirkungen des Grundwasseranstiegs auf die Beschaffenheit der Oberflächengewässer in den Sanierungsgebieten Seese/Schlabendorf und Greifenhain/Gräbendorf. Institut für Wasser und Boden, Dr. Uhlmann, Dresden, 2010. www.lmbv.de
- (4) Uhlmann, W., Theiss, S., Nestler, W., Claus, T.: Studie zu den Auswirkungen des Grundwasserwiederanstiegs auf die Beschaffenheit der Oberflächengewässer in den Sanierungsgebieten Seese/Schlabendorf und Greifenhain/Gräbendorf, Vertiefung der Untersuchungen zur Präzisierung der Modellgrundlagen und der Bemessungsansätze für Wasserbehandlungsanlagen. Institut für Wasser und Boden, Dr. Uhlmann, Dresden, 2013. www.lmbv.de
- (5) Uhlmann, W., Theiss, S., Nestler, W., Zimmermann, K., Claus, T.: Weiterführende Untersuchungen zu den hydrochemischen und ökologischen Auswirkungen der Exfiltration von eisenhaltigem, saurem Grundwasser in die Kleine Spree und in die Spree, Präzisierung der Ursachen und Quellstärken für die hohe Eisenbelastung des Grundwassers. Institut für Wasser und Boden, Dr. Uhlmann, Dresden, 2012. www.lmbv.de
- (6) Gast, M., Schöpke, R., Benthau, F. C., Walko, M., Haubold-Rosar, M.: Die Behandlung von schwefelsaurem Grundwasser durch mikrobiologische Sulfatreduktion im Lausitzer Braunkohlenrevier, Glückauf 147 (2011), Nr. 9, S. 394–398.

Authors / Autoren

Dr.-Ing. Friedrich-Carl Benthau, Strategie und Entwicklung,
Dr. rer. nat. Oliver Totsche, Wasserwirtschaftliche Grundsätze,
Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft
mbH (LMBV), Senftenberg