

# Nutzung von Lysimeter- und Felddaten zur Parameterermittlung für großräumige Modelle zur Grundwassermengen- und -güteprognose

Sylke Schmidt<sup>1\*</sup>, Klaus Häfner<sup>1</sup>, Rolf Schlottmann<sup>2</sup>, Ulrike Haferkorn<sup>3</sup>,  
Claus Nitsche<sup>4</sup> und Holger Mansel<sup>5</sup>

## Zusammenfassung

Infolge des bergbaubedingten Grundwasserwiederanstiegs im Süden von Leipzig werden in die Pleiße die Pyritverwitterungsprodukte Eisen (ca. 1 t/d) und Sulfat eingetragen.

Im Rahmen eines Pilotversuches im Haupteintragsbereich Braunkohlenkippe Witznitz wurden umfangreiche Labor-, Feld-, Lysimeterversuche sowie eine versuchsbegleitende Modellierung durchgeführt, um eine Reduktion der Stoffeinträge durch Verringerung der Grundwasserneubildung zu erzielen. Die als Eingangsparameter für die Modellierung der Prozesse in der ungesättigten Bodenzone mittels HYDRUS-1D erforderlichen bodenphysikalischen und -chemischen Parameter wurden insbesondere anhand von intermittierend betriebenen Säulenversuchen (IBSV) ermittelt. Durch einen speziellen Algorithmus wurde die Zeitfunktion der Sickerwasserrate als Randbedingung „Grundwasserneubildung“ für das PCGEOFIM-Modell bereitgestellt. Damit konnte die Lage der freien Grundwasseroberfläche und der Sickerwassermengen in die Pleiße einschließlich der Stofffrachten ermittelt werden. Bei Anbau von Luzerne wurde die maximale Sickerwasserreduzierung erreicht. Die Wasserhaushaltsmodellierung für diese Bewirtschaftung zeigte, dass die Randbedingung „Grundwasserneubildung“ um 75 % reduziert werden kann. Dies bewirkt eine langfristige Verringerung der Grundwasserzuflüsse und Eiseneinträge in die Pleiße um ca. 30 %. Die Pilotversuchsergebnisse können mittels veränderter Parametrierung des Wasserhaushaltsmodells und des GW-Strömungsmodells auf andere bergbaulich beeinflusste, vorwiegend landwirtschaftlich genutzte Kippengebiete in Mitteldeutschland und der Lausitz übertragen werden.

**Schlagwörter:** Wasserhaushaltsmodellierung HYDRUS-1D, Grundwassermodellierung PCGEOFIM, Eiseneintrag in Gewässer, Lysimeterbewirtschaftung

## Summary

After the closure of the mining industry in the South of Leipzig, groundwater resurgence started and pyrite weathering was initiated, leading to iron (1t/d) and sulfate exfiltration into the Pleiße River. The pilot project on the Witznitz mine dump site involved many laboratory-, field-, lysimeter tests and a modeling investigation program. The aim of the study was a reduction of groundwater recharge and subsequently induce a decrease of the exfiltration of ferrous groundwater into the river. The parameter of modeling the water balance processes in the unsaturated soil with HYDRUS-1D were determined with intermittent laboratory column tests. A special algorithm was used for preparation time function of percolation rate as the basic condition “groundwater recharge” for the groundwater flow model PCGEOFIM. The results of modeling were current and prognostic groundwater level and quantity of percolation including the element input into the Pleiße. Maximum reduction of the amount of percolate water could be confirmed for lucerne. The water balance modeling of the lucerne cultivation will allow a reduction of 75 percent in the groundwater recharge. As a result of this the longterm groundwater inflows and the iron input into the Pleiße decrease around 30 percent. The results of the pilot test including the process know-how and tools for the projection of iron loads from groundwater inflows can be transferred to comparable mining sites for example in Lusatia after an adaptation to the site specific parameter of the water balance model and the groundwater flow model.

**Keywords:** water balance model HYDRUS-1D, groundwater flow model PCGEOFIM, iron input into waterbodies, lysimeter cultivation

<sup>1</sup> Landesdirektion Sachsen, Ref. 42L Oberflächenwasser/Hochwasserschutz, Braustraße 2, D-04107 LEIPZIG

<sup>2</sup> Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbauverwaltungsgesellschaft mbH, Sanierungsbereich Mitteldeutschland, Walter-Köhn-Straße 2, D-04356 LEIPZIG

<sup>3</sup> Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft, GB 3, Lysimeterstation, Kleinsteinberger Straße 13, D-04801 BRANDIS

<sup>4</sup> BGD ECOSAX GmbH, Tiergartenstraße 48, D-01219 DRESDEN

<sup>5</sup> Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH, Nonnenstraße 9, D-04229 LEIPZIG

\* Ansprechpartner: Dr. Sylke Schmidt, sylke.schmidt@lds.sachsen.de



### Einleitung

In der Pleiße südlich von Leipzig wird vor allem bei Niedrig- und Mittelwasserabflüssen eine orangefarbene Wasserfärbung beobachtet. Ursache dafür ist der Eintrag von eisenhaltigen Grundwässern infolge des natürlichen Grundwasserwiederanstieges nach Einstellung des Braunkohlenbergbaus. Der Kippenkomplex des ehemaligen Tagebaus Witznitz II mit drei gefluteten Tageauseen (Hainer, Haubitzer und Kahnsdorfer See) entstand im Zeitraum von 1945 bis 1993. Die Pleiße durchfließt den Kippenkörper seit ihrer Verlegung (1958-61) abschnittsweise und wirkt nach dem Grundwasserwiederanstieg als Vorfluter für das aus der Kippe austretende, stofflich stark durch Eisen und Sulfat als Produkte der Pyritverwitterungsprozesse geprägte Grundwasser. In diesem verlegten Pleißeabschnitt erfolgt der Haupteiseneintrag (*Abbildung 1*). Nach Rekultivierung wird die Kippe Witznitz seit ca. 20 Jahren landwirtschaftlich genutzt. Die Eisenfrachten führen neben der Verfärbung über lange Fließwege zur Beeinträchtigung aquatischer Lebensgemeinschaften von Fischen, Makrozoobenthos und Makrophyten. Zur Problemlösung und im Hinblick auf das durch die EG-WRRL vorgegebene Ziel des Erreichens des guten ökologischen Potenzials in der Pleiße wurde ein Pilotversuch auf der Braunkohlkippe Witznitz zur Entwicklung von Maßnahmen zur Reduzierung der Eisenfracht durchgeführt.

Der Lösungsansatz (*Abbildung 2*) geht von einer Quellstärkenreduzierung am Ort der Sickerwasserbildung aus. Die Quellstärkenreduzierung zu Beginn der Sickerwasserbil-

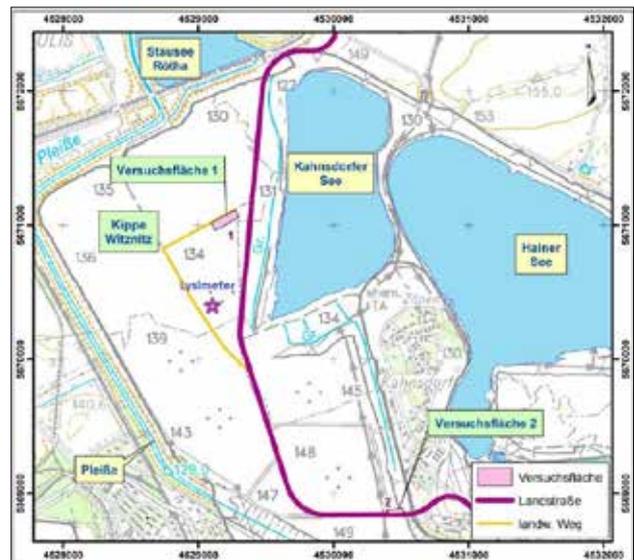


Abbildung 3: Kippenkomplex Witznitz mit Versuchsflächen und Lysimeterstation (Stern).

Tabelle 1: Hydraulische Eigenschaften der Linerkerntproben.

Parameter	IBSV VF 1.3	IBSV VF 1.4	IBSV VF 2.4
Porosität (n)	0,39	0,34	0,34
k <sub>f</sub> -Wert [m/s]	2,5 · 10 <sup>-6</sup>	3,4 · 10 <sup>-5</sup>	1,4 · 10 <sup>-5</sup>

dung sollte ausschließlich durch Erhöhung der Evapotranspiration erreicht werden, da damit eine direkte Wirkung auf die Exfiltrationswassermenge und die entsprechenden Stofffrachten erzielbar ist.

Bestandteile des Pilotversuches von 2008 bis 2011 waren analytische Untersuchungen an den auf der Kippe Witznitz seit 2003 betriebenen zwei Lysimetern und an den in 2009 entnommenen zwei weiteren Lysimetern (Anlagenbetrieb in Brandis), Bewirtschaftung von zwei Versuchsflächen, pflanzenbauliches Monitoring, Errichtung von Feldmesstechnik für das Grund- und Bodenwassermonitoring auf den Versuchsflächen, Durchführung von intermittierend betriebenen Säulenversuchen (IBSV) im Labormaßstab (s. *Abbildung 3*).

Die Quellstärkenreduzierung zu Beginn der Sickerwasserbildung sollte ausschließlich durch Erhöhung der Evapotranspiration erreicht werden, da damit eine direkte Wirkung auf die Exfiltrationswassermenge und die entsprechenden Stofffrachten erzielbar ist. Gegenstand des Pilotversuches ist die Optimierung der Wasserhaushaltsschicht sowie die Untersuchung der Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit, so dass die Pflanzen optimale Wachstumsbedingungen bei maximalem Wasserentzug aus der Wurzelzone vorfinden. Damit wird nur ein geringer Anteil der Niederschlagsmenge grundwasserneubildungswirksam.

Versuchsbegleitend erfolgte eine Modellierung der Strömungsprozesse in der ungesättigten Bodenzone (HYDRUS-1D) und der gesättigten Bodenzone (PCGEOFIM) mit dem Ziel der Ermittlung von aktuellen und zukünftigen Grundwasserexfiltrationsmengen und Stoffeintragsfrachten in die Pleiße. Erste Ergebnisse zum Nachweis der Wirksamkeit der Bewirtschaftungsmaßnahmen im Sinne einer Reduzierung der Grundwasserneubildung auf den Feldparzellen und den

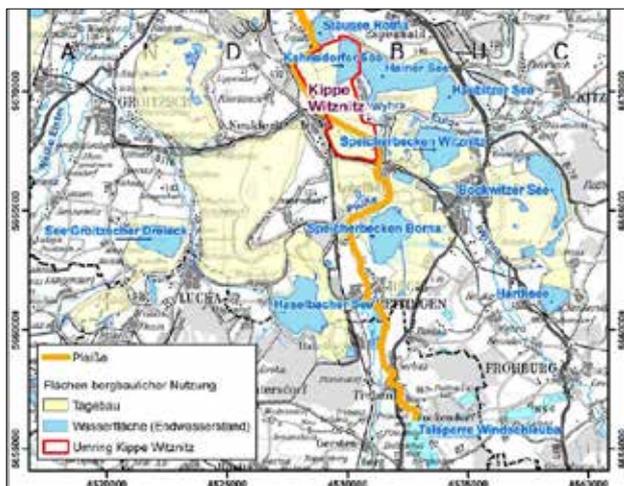


Abbildung 1: Lage Pleiße und Kippe Witznitz.

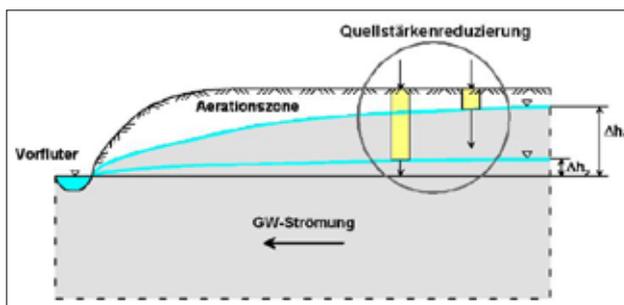


Abbildung 2: Lösungsansatz (GFI GmbH, Abschlussbericht Wasserhaushaltsmodellierung, 31.01.2012).

Lysimetern wurden durch U. Haferkorn et. al. auf der 14. Gumpensteiner Lysimetertagung 2011 vorgestellt.

## Material und Methoden

### Labor- und Felduntersuchungen zur Sickerwasserprognose

Im Rahmen des Pilotversuches wurden auf der Kippe Witznitz zwei Versuchsflächen mit mehreren Parzellen durch pH-Wert-Erhöhung, Kalkzugabe, Aufbringen von Klärschlammkompost (KSK) als Bodenverbesserungsmittel, Tiefenlockerung und Düngung so bewirtschaftet, dass optimale Wachstumsbedingungen für die als dauergrünen Bewuchs ausgewählten Pflanzen Luzerne und Knaulgras resultierten. Begleitend zu den Untersuchungen auf den Versuchsflächen und den Lysimetern wurden laborative Säulenversuche zur qualitativen und quantitativen Charakterisierung des Bodensickerwassers mit Bodensubstrat von den Feld-Versuchsflächen durchgeführt. Die Laborversuche erfolgten gemäß Materialienband „Laborative Untersuchungen zur Sickerwasserprognose im Rahmen von Detailuntersuchungen“ des LfUG Sachsen als intermittierend betriebene Säulenversuche (IBSV). Die Zielstellung bestand in der Ermittlung der aus den Kippensubstraten mit und ohne Klärschlammkompostzugabe (KSK) eluierbaren Inhaltsstoffe. Weiterhin wurden die standortspezifischen van Genuchten Parameter zur Parametrisierung eines Bodenwassertransportansatzes ermittelt. Es wurden drei Linerkerproben aus der Schicht von 0 – 1m der Versuchs-

flächen VF 1.3 (unbehandelt), VF 1.4 (unbehandelt) und VF 2.4 (mit KSK und Kalk konditioniert) entnommen. Die hydraulischen Eigenschaften der verwendeten Linerkerproben sind in *Tabelle 1* dargestellt.

Die IBSV-Methodik setzt einen Durchlässigkeitskoeffizienten nach DARCY von  $k_f > 10^{-7}$  m/s voraus, der in den verwendeten Substraten vorliegt. Als Infiltratwasser wurde synthetisches Regenwasser verwendet. Die Versuchsbedingungen wurden so gestaltet, dass sie weitestgehend den in der Bodenwasserzone ablaufenden Prozessen entsprechen. Der Austausch eines Porenvolumens der Säule erfolgte von unten nach oben mit einer Geschwindigkeit von ca. einem Porenvolumen/Tag bis zu maximal 20 Porenvolumen. Die Perkolatproben wurden auf die Leitkennwerte Sauerstoff, pH-Wert, Leitfähigkeit, Redoxspannung sowie auf KB4,3, KB8,2, Salze, Nährstoffe und Schwermetalle analysiert. Die *Abbildungen 4* und *5* zeigen die während der Säulenversuche ermittelten Eluatkonzentrationen an Stickstoffkomponenten und Metallen des unbehandelten Bodensubstrates im Vergleich zum Substrat mit Kalk- und Klärschlammkompostzugabe.

Im IBSV VF 1-3 ist ein deutliches Elutionsverhalten der Inhaltsstoffe festzustellen mit starkem Konzentrationsrückgang nach Austausch des 10. Porenvolumens. Mit abnehmender Acidität KB8,2 von 6,35 mmol/l auf 0,35 mmol/l erhöhte sich der pH-Wert von 2,65 auf 3,75. In allen Perkolatproben lagen die Arsen-, Cadmium- und Quecksilbergehalte unterhalb der Bestimmungsgrenze. In Perkolatprobe 20 wurden nur Kupfer und Zink oberhalb der Bestimmungsgrenze nachgewiesen. Im IBSV VF 2-4 liegt

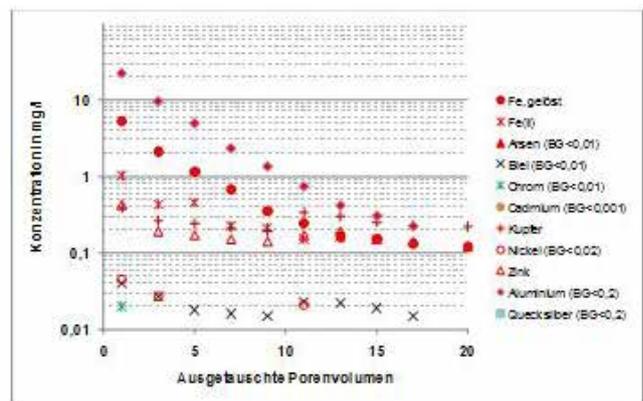
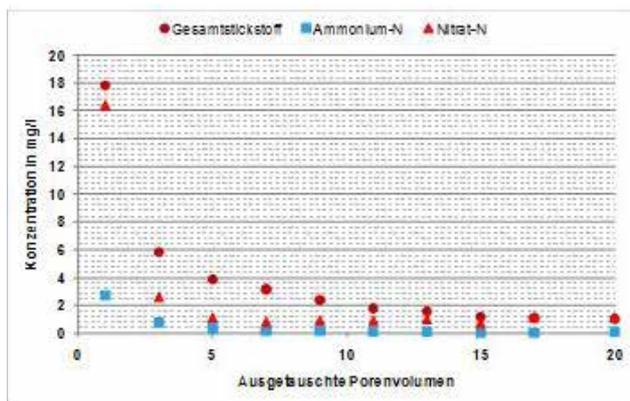


Abbildung 4: IBSV VF 1-3 Perkolatkonzentrationen an Stickstoffkomponenten und Metallen.

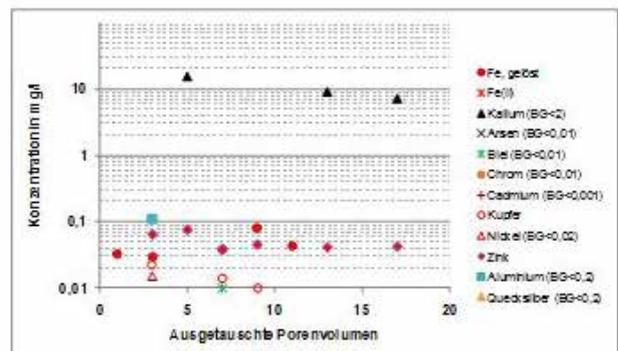
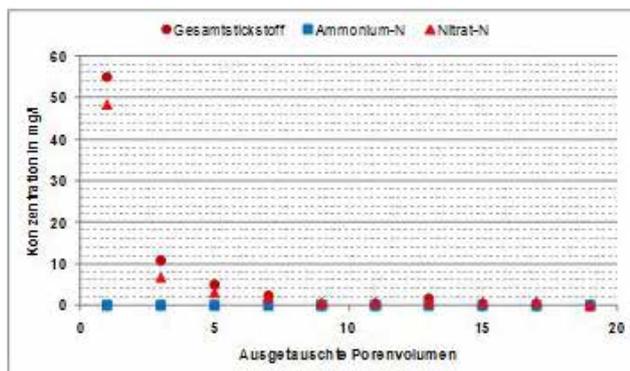


Abbildung 5: IBSV VF 2-4 Perkolatkonzentrationen an Stickstoffkomponenten und Metallen.

der pH-Wert kalkungsbedingt konstant bei 7,1 bis 7,8. Die aus der Konditionierung mit Klärschlammkompost resultierenden ca. 4fach höheren Gehalte an Gesamtstickstoff und Nitrat werden effektiv eluiert und liegen nach Austausch des 13. Porenvolumens unter der Bestimmungsgrenze. Schwermetalle wurden entgegen der Erwartungshaltung nicht eluiert (außer geringfügige Mengen an Zink und Kupfer). Durch die Ergebnisdarstellung als Funktion der ausgetauschten Porenvolumen ist ein direkter Vergleich aller IBSV-Ergebnisse möglich. Ein Vergleich mit den Feldversuchsergebnissen setzt voraus, dass die realen Sickerwasserneubildungsraten zur Verfügung stehen. Damit können die IBSV-Ergebnisse über Realzeiten in den Feldbereich übertragen werden. Dies erfolgt durch die Ermittlung der erforderlichen Zeit für den Austausch eines Porenvolumens im Linerkern bzw. im Feld-Bodensubstrat über Sickerwasserneubildung. 20 ausgetauschte Porenvolumina bedeuten beispielsweise bei einem Porenvolumen von 0,4 bei 100 mm Grundwasserneubildung im Jahr eine Realzeit  $t = 20 \times 0,4/0,1 = 80$  Jahre. Diese Betrachtungsweise verdeutlicht die langen Zeiträume, in denen mit Stoffausträgen aus Kippen zu rechnen ist.

### Lysimeteruntersuchungen

Zur Untersuchung des Wasser- und Stoffhaushaltes von Kippenböden werden in der Lysimeterstation Brandis bereits seit 1996 Untersuchungen an drei auf der Kippe Espenhain gewonnenen Lysimetern (s. *Abbildung 7* Lysimeternr. 12\_1 bis 12\_3) durchgeführt. Direkt auf der Kippe Witznitz wird seit 2005 eine Lysimeterstation mit zwei Lysimetern (s. *Abbildung 6* Lysimeternr. 13\_1, 13\_2) mit den gleichen Kulturen wie die umliegende landwirtschaftliche Nutzfläche zur Gewinnung von Daten zum Bodenwasserhaushalt und Ernteerträgen betrieben. Auf Versuchsfläche 1 wurden in 2009 zwei weitere Lysimeter 14\_2 und 14\_4 gewonnen, in eine Containerstation am Standort der Lysimeterstation Brandis eingebaut und analog zur Versuchsfläche 1 bewirtschaftet.

Sämtliche Lysimeter sind 2-3 m tief und wägbar. Die Eigenschaften der Kulturbodenschicht auf den Versuchsflächen und den Lysimetern (= Wasserhaushaltsschicht = effektive Wurzelzone) wurden mittels Tiefenmelioration, Kalkung, Klärschlammkompostgaben verbessert mit dem

Ziel, die Verdunstungsleistung zu erhöhen. Als ganzjährige Dauergrünkulturen wurden Luzerne als Tiefwurzler und Knaulgras als widerstandsfähiges, schnellwachsendes Gras ausgewählt. Lysimeter 12\_2 sowie die Lysimeter auf der Kippe Witznitz 13\_1 und 13\_2 stellen mit konventioneller Bewirtschaftung (Wintergetreide und Raps) die Referenzlysimeter dar.

Während des Pilotversuches wurden auf den behandelten Feldparzellen (Witznitz) und den Lysimetern (Witznitz und Brandis) folgende Parameter ermittelt:

- Klimaparameter, Niederschlag, Verdunstung, Bodenwasser-gehalt, Sickerwassermenge und -beschaffenheit
- bodenphysikalische und chemische Kennwerte, vor allem mit Bezug zu den Inhaltsstoffen des aufgebrauchten Klärschlammkomposts
- Ernteerträge und Pflanzeninhaltsstoffe
- Wuchshöhe, Wurzeltiefe und Blattflächenindex bei relevanten Entwicklungsstadien als Eingangsdaten für die versuchsbegleitenden Modellrechnungen.

Die klimatische Wasserbilanz für die beiden Standorte Witznitz und Brandis ist in *Abbildung 7* dargestellt. Mittels dieser klimatischen Wasserbilanz (kWB) lässt sich die potenzielle (nutzungsunabhängige) Wasserverfügbarkeit eines Standortes beschreiben. Sie wird aus der Differenz zwischen korrigiertem Niederschlag ( $N_{kor}$ ) und potenzieller Evaporation (ETP) ermittelt.

$$kWB = N_{kor} - ETP$$

Im Versuchsjahr 2010 war der Jahresverlauf der kWB mit extremen Wasserdefizit im Juni und extremen Überschuss im Sommerhalbjahr (Niederschlag > 600 mm, Normwert 376 mm) stark abweichend. Dies hatte eine hohe Grundwasserneubildung (GWN) bereits im Sommer zur Folge. Im Gegensatz dazu weist 2011 im ersten Halbjahr eine stark negative Bilanz aus, wobei das potenzielle Wasserdefizit in Brandis größer als das in Witznitz ist. Damit ist in Brandis mit einer höheren Inanspruchnahme der Bodenwasserspeicher zu rechnen als in Witznitz. Während des Pilotversuches wurden pflanzenphysiologische Parameter wie Pflanzenhöhe, Blattflächenindex sowie die Erträge ermittelt. Diese Kenngrößen stehen in engem Zusammenhang zur Verdunstungsleistung. Diese sollte möglichst hoch sein, um das



Abbildung 6: Versuchsanordnung der Lysimeter und realisierte Varianten (KSK – Klärschlammkompost) von 2008 bis 2011 (GFI GmbH, 31.01.2012).

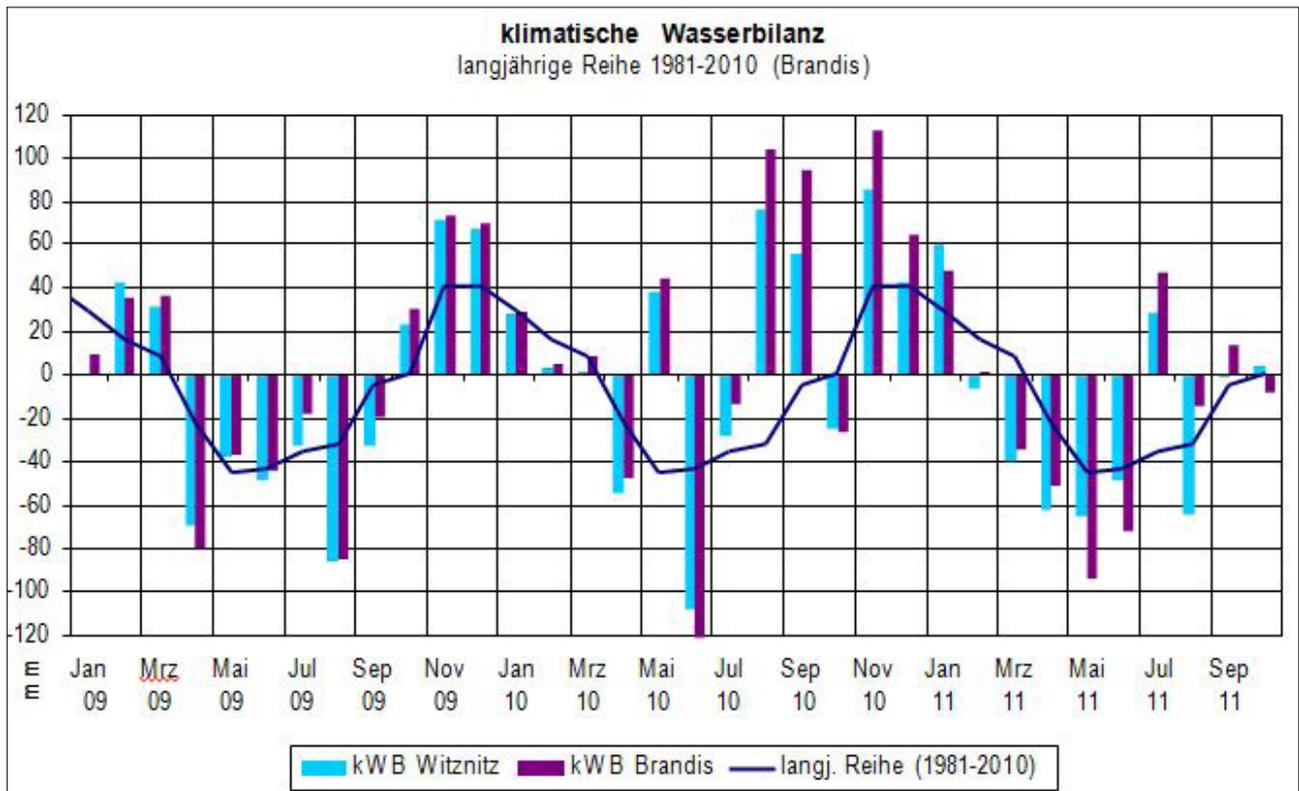


Abbildung 7: Klimatische Wasserbilanz an den Standorten Brandis und Witznitz.

Projektziel der Sickerwasserreduzierung bzw. Minimierung der Grundwasserneubildung zu erreichen.

### Wasserhaushaltsmodellierung

Innerhalb des Pilotprojektes und aktuell im Rahmen der Projektfortsetzung wurden mittels Laboruntersuchungen, Säulenversuchen, Lysimeteruntersuchungen und Untersuchungen auf den Versuchspartellen eine Vielzahl von Parametern ermittelt:

- **Bodenmonitoring** zur Ermittlung Kennwerten für die Wasserhaushaltsmodellierung wie z.B. Saugspannung und Bodenfeuchte
- **Pflanzenmonitoring** zur Ermittlung der pflanzenphysiologischen Parameter für die Wasserhaushaltsmodellierung wie Pflanzenhöhe, Blattflächenindex, Wurzeltiefe und Wurzelverteilung
- **Wassermonitoring** zur Ermittlung von Sickerwasser- und Verdunstungsmengen an den Lysimetern sowie Saugspannungen, Bodenfeuchte, Wasserstand
- **Klimamonitoring** zur Erfassung von Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeiten, Globalstrahlung in Brandis und Witznitz.

Diese Parameter und insbesondere die bodenphysikalischen Kennwerte wurden für die Modellierung des Wasserhaushaltes in der ungesättigten Bodenzone für die Lysimeter, Versuchspartellen und Hydrotöpfe sowie für die Modellierung der Grundwasserströmung im gesättigten Kippenkörper verwendet. Die Modellierung in der ungesättigten Bodenzone erfolgte mittels dem Programm HYDRUS-1D. Als bodenphysikalische Eingangsparameter wurden die  $k_f$ -Werte (Mehrzahl der Böden als schluffig-lehmiger Sand

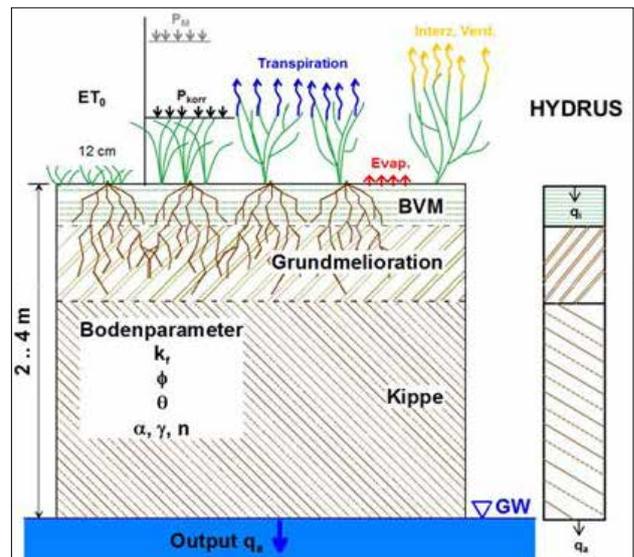


Abbildung 8: Aerationenmodell (GFI GmbH, 31.01.2012).

mit  $k_f = 1 \times 10^{-5}$  m/s bis schwach sandiger Lehm mit  $k_f = 1 \times 10^{-6}$  m/s eingestuft), die laborativ ermittelten Saugspannungs-Sättigungs-Kurven (pF-Kurven) mit Vollsättigung  $\Theta_s$ , Restsättigung  $\Theta_R$ , nutzbare Feldkapazität nFK sowie die van Genuchten Parameter  $\alpha$  und  $n$  benötigt.

In *Abbildung 8* ist das Aerationenmodell dargestellt, das mittels HYDRUS-1D simuliert wurde.

Eichgrundlage für die aufgebauten HYDRUS-1D Modelle bildeten die reale Verdunstung der Pflanzenbestände und die gemessenen Sickerwassermengen der einzelnen Lysimeter sowie Bodendaten. Der Wasserentzug der Pflanzen

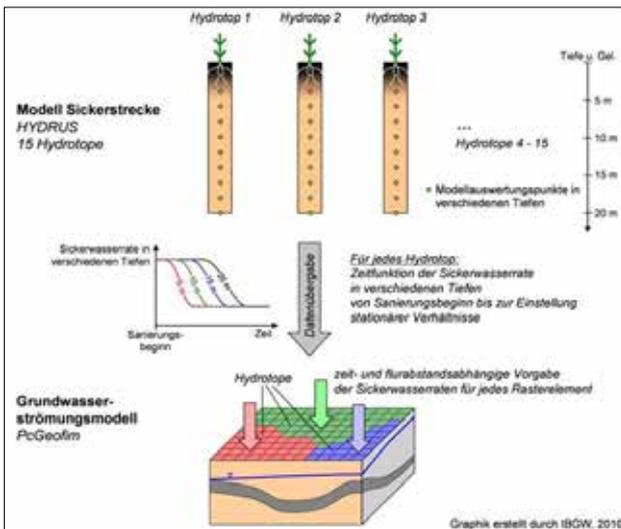


Abbildung 9: Kopplungsalgorithmus zwischen gesättigter und ungesättigter Strömung (GFI GmbH 2012).

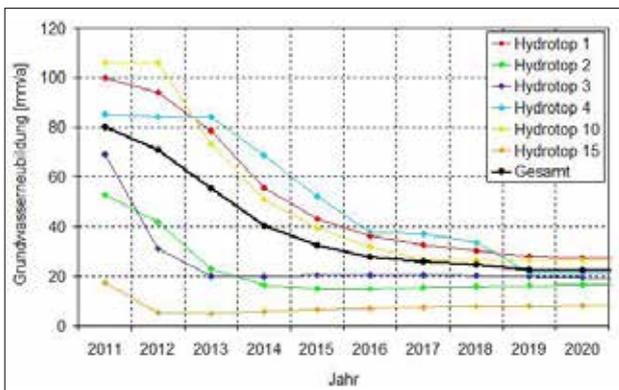


Abbildung 10: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserneubildung in den einzelnen Hydrotopen.

aus dem Boden erfolgt über die Wurzeln, die im Falle der hier verwendeten Dauergrünlandpflanzen Knaulgras und Luzerne Wurzellängen von 30 bis 50 cm bzw. 50 bis 100 cm aufweisen. Das Programm simuliert den saugspannungsabhängigen Bodenwasserentzug. Im Ergebnis sind detaillierte Aussagen zur erwartbaren Bodenwasserausschöpfung möglich. In einem weiteren Modellierungsschritt wurde die zeit- und flurabstandsabhängige Grundwasserneubildung als Eingangsparameter für die Grundwasserströmungsmodellierung mit dem Programm PCGEOFIM im gesättigten Bereich der Kippen aufbereitet. Der zugehörige Kopplungsalgorithmus zwischen ungesättigter und gesättigter Strömung ist in *Abbildung 9* dargestellt.

Die daraus resultierende zeitliche Entwicklung der Grundwasserneubildung (GWN) in den einzelnen Hydrotopen zeigt *Abbildung 10*. Der Ausgangszustand im Jahr 2011 weist mit GWN-Werten zwischen 18 und 108 mm/a eine ausgeprägte Variabilität zwischen den einzelnen Hydrotopen auf. Der Beginn der Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Reduzierung der GWN wurde im Modell auf das Jahr 2012 gelegt und zeigt im Prognosezeitraum bis 2100 bereits ab sechs Jahren nach Maßnahmebeginn ein Absinken der GWN um ca. 75 %.

## Ergebnisse

Methodisch wurde im Rahmen des Pilotversuches ein up scaling durchgeführt:

- Laboruntersuchungen des Bodens
- Intermittierend betriebene Säulenversuche IBSV (Labormaßstab)
- Lysimeteruntersuchungen (Technikums-Maßstab)
- Felduntersuchungen auf den Versuchspartellen (Feldmaßstab)
- Übertrag auf Hydrotop mit Modellierung der ungesättigten Bodenzone
- Wasserhaushaltsmodellierung der gesättigten Grundwasserströmung für die Gesamtkippe.

Der Lösungsansatz eine reduzierte Grundwasserneubildung durch erhöhte Pflanzenverdunstung zu erzielen wurde mittels Bewirtschaftung der Versuchspartellen und der Lysimeter durch eine Wasserhaushaltsschicht und Anbau von Luzerne und Knaulgras als Dauergrünpflanzen umgesetzt. Im Ergebnis der Untersuchungen der Versuchsfelder auf der Kippe Witznitz und der in der Lysimeterstation Brandis betriebenen Kippenlysimetern wurde eine Reduzierung der mittleren Grundwasserneubildung um 75 % nachgewiesen. Dies wirkt sich am Standort der Kippe Witznitz direkt auf die Exfiltrationsmenge und damit auf die Stofffrachten in die Pleiße aus, da das gesamte in die Vorflut exfiltrierende Grundwasser im Kippenbereich neu gebildet wird. Die Simulation des Wasserhaushaltes in der ungesättigten Bodenzone mittels HYDRUS-1D zeigte eine gute Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Lysimetersickerwassermengen über den Versuchszeitraum (s. *Abbildung 11*).

Die Sickerwassermengen dienen als Randbedingung für die Grundwasserströmungsmodellierung mittels PCGEOFIM. In *Abbildung 12* sind die Ergebnisse der Modellierung des IBGW Leipzig für die Nullvariante (ohne Bewirtschaftungsmaßnahme) dargestellt, die die gegenwärtig bereits messtechnisch nachgewiesenen hohen Eiseneintragsfrachten in die Pleiße aus dem Südbereich der Kippe Witznitz bestätigen.

Die Modellierungsrechnungen für die Bewirtschaftungsmaßnahme Dauergrünland ergaben eine Verringerung des Grundwasserabstroms von 0,78 m<sup>3</sup>/min auf 0,51 m<sup>3</sup>/min (34 %) aus der Kippe in die Pleiße. Auf dieser Basis erfolgte

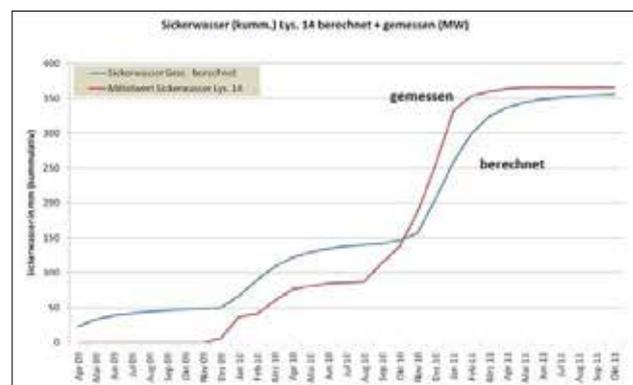


Abbildung 11: Kumulative Sickerwassermengen an den Lysimetern 14 (GFI GmbH 2012).

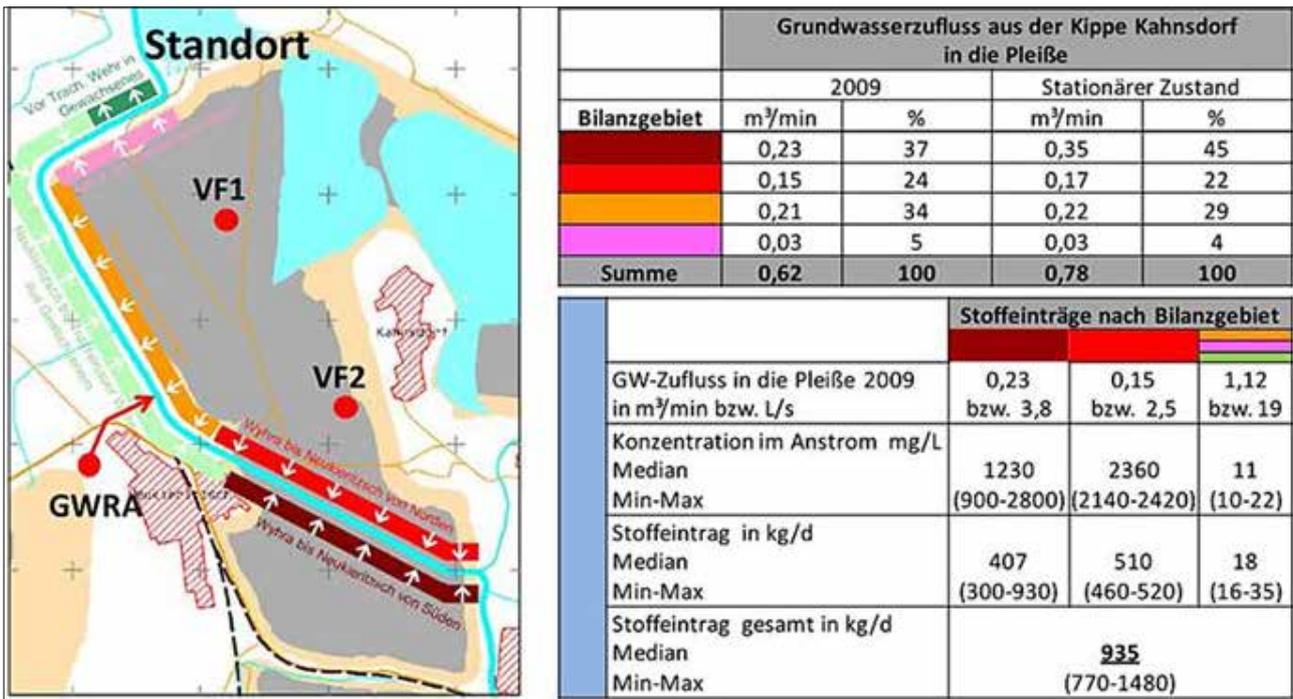


Abbildung 12: Grundwasserzfluss aus Kippe Witznitz in die Pleiße für die Nullvariante.

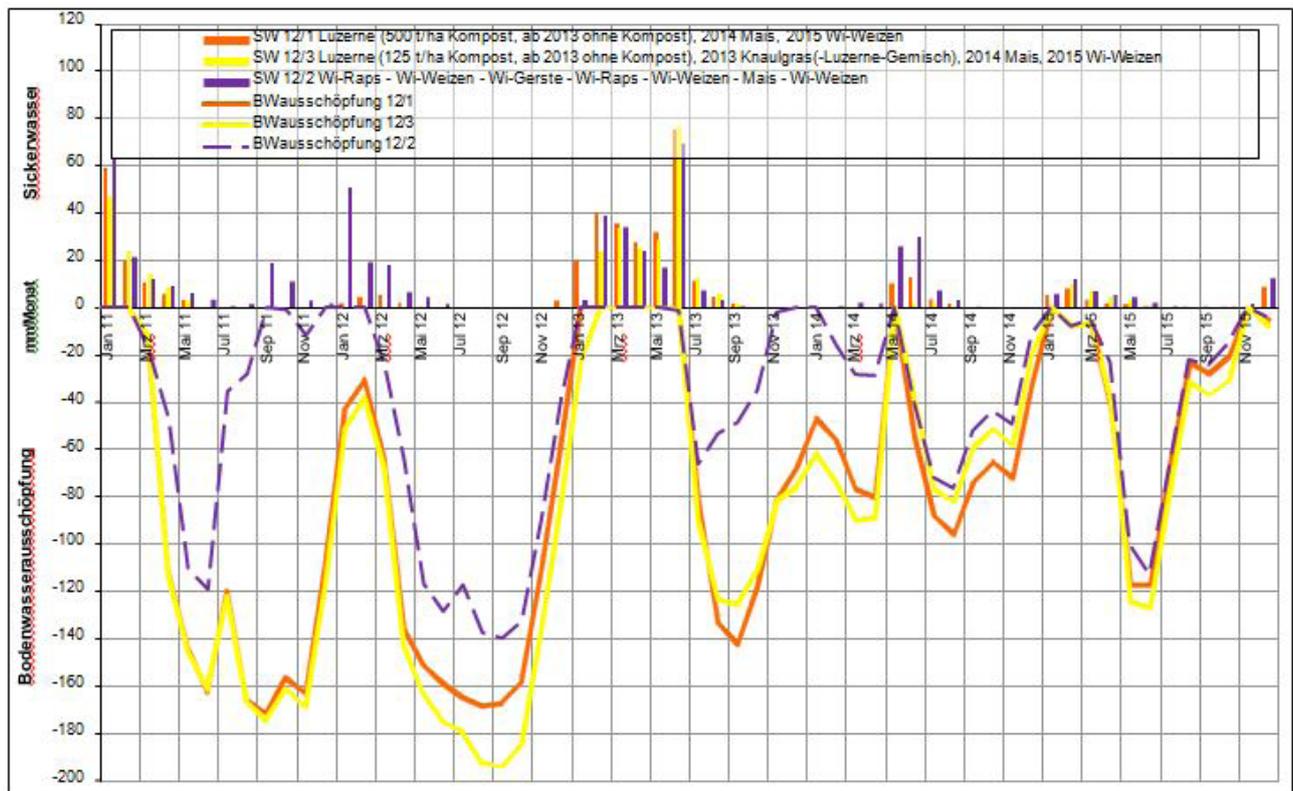


Abbildung 13: Bodenwasserausschöpfung an den Lysimetern (GFI GmbH, 25.05.2016).

anhand von Migrationsberechnungen die Abschätzung aktueller und zukünftiger Eiseneintragsfrachten sowie die Ausweisung der Haupteintragsbereiche.

Die Ermittlung der Bodenwasserausschöpfung an den wägbaren Lysimetern zeigt, dass mit Dauergrünland aus Luzerne und Verbesserung der Kippenböden durch Tie-

fenlockerung und Kalkung in der Vegetationsperiode eine starke Ausnutzung des Bodenwasserspeichers erzielt wird (s. Abbildung 13).

Damit verringert sich die Grundwasserneubildung stark, der hydraulische Gradient zur Pleiße wird reduziert und damit auch die Stoffeintragsfracht an Eisen und Sulfat in die Pleiße.

## Diskussion und Fazit

Das Ziel des Pilotversuches mittels geeigneter Bewirtschaftungsmaßnahmen eine signifikante Reduzierung der Grundwasserneubildung auf dem Kippengebiet Witznitz und damit eine Reduktion der Stoffeintragsfrachten an Eisen und Sulfat in die Pleiße zu bewirken, wurde erreicht. Mittels Luzerneanbau als Dauergrünland ließ sich die Grundwasserneubildung um 75 % reduzieren. Die Prozesse in der ungesättigten Bodenzone konnten mit dem Modell HYDRUS-1D gut nachgebildet werden. Mittels Kopplungsalgorithmus zwischen ungesättigter und gesättigter Strömung wurde die zeit- und flurabstandsabhängige Grundwasserneubildung als Randbedingung für das Grundwasserströmungsmodell PCGEOFIM ermittelt. Auf dieser Grundlage wurde die Reduzierung der Stoffeintragsfrachten an Eisen und Sulfat in die Pleiße um ca. 34 % nachgewiesen und als Haupteintragsbereich der südliche Kippenbereich identifiziert. Die Versuchsergebnisse sind auf andere Kippengebiete übertragbar. Boden, Pflanze und Bewirtschaftung sind dabei als Gesamtsystem mit all ihren Wechselwirkungen zu betrachten. Aktuell erfolgt die Fortsetzung des Pilotversuchs als Großversuch mit Anbau von Luzerne auf ca. 225 ha im sanierungsrelevanten Südteil der Kippe Witznitz. Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung werden die Versuchsfläche 1 und die Lysimeter weiter betrieben einschließlich der begleitenden Wasserhaushaltsmodellierung. Die im Rahmen des Pilotversuches untersuchte Bewirtschaftungsvariante mit Zugabe von Klärschlammkompost zwecks Ausbildung einer optimalen Wasserhaushaltsschicht zeigte keinen positiven Effekt auf die Biomasseproduktion der Dauergrünlandpflanzen. Daher

wird künftig kein Klärschlamm zur Bodenverbesserung eingesetzt. Die produzierte Biomasse wird in einer 500 kW-Biogasanlage der Osterland Agrar GmbH Kahnsdorf verwertet. Aufgrund der bisher kurzen Laufzeit der großflächigen Dauergrünlandbewirtschaftung mit dem Ziel der Senkung der Grundwasserneubildung konnte anhand von Grundwasserstandsganglinien noch kein eindeutiger Trend belegt werden. Hierfür müssen längere Zeiträume betrachtet werden.

## Literatur

- Beims U., Mansel H. (2009) Durchführung eines Pilotversuches zur Reduzierung der Exfiltration von eisenbelasteten Grundwasser aus den Kippen des ehemaligen Tagebaues Witznitz in die Fließgewässer Pleiße und Wyhra, 12. Dresdner Grundwasserforschungstage 15.7.16. Juni 2009.
- LfUG Sachsen (2004) Laborative Untersuchungen zur Sickerwasserprognose im Rahmen der Detailerkundung“, Materialienband zur Altlastenbehandlung.
- Haferkorn U., Winkler A., Bernsdorf S. (2011) Lysimetermessungen und pflanzenbauliches Monitoring zum Nachweis der bodenverbessernden Wirkung von Klärschlammkompost am Beispiel der Braunkohlekippe Witznitz II, Tagungsband 14. Gumpensteiner Lysimetertagung 2011.
- GFI Grundwasserforschungsinstitut GmbH Dresden, 31.01.2012: Abschlussbericht Durchführung eines Pilotversuches zur Reduzierung der Exfiltration von eisenbelasteten Grundwasser aus den Kippen des ehemaligen Tagebaues Witznitz in die Fließgewässer Pleiße und Wyhra.
- GFI Grundwasserforschungsinstitut GmbH Dresden, 25.05.2016: Großtechnische Umsetzung der Erfahrungen des Pilotversuchs Witznitz zur Reduzierung der Eiseneinträge in die Pleiße, Jahresbericht 2015.