

# Räumlich differenzierte reaktive Stofftransportmodellierung zur Prognose des Stoffaustrags aus der Braunkohlenbergbaukippe Witznitz in den Vorfluter Pleiße im Südraum von Leipzig

Heike Büttcher<sup>1</sup>, Holger Mansel<sup>1</sup>, Lutz Weber<sup>2</sup>, Christiane Uhlig<sup>2</sup>, Klaus Häfner<sup>3</sup>

Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH (IBGW), Nonnenstraße 9, 04229 Leipzig<sup>1</sup>

LMBV mbH Mitteldeutschland, Walter-Köhn-Straße 2, 04356 Leipzig<sup>2</sup>

Landesdirektion Leipzig, Braustraße 2, 04107 Leipzig<sup>3</sup>

Die Wasserbeschaffenheit in Braunkohlenbergbaugebieten ist aufgrund der Verwitterung von pyrit- und markasithaltigen Mineralen häufig durch hohe Eisen- und Sulfatkonzentrationen sowie niedrige pH-Werte gekennzeichnet. Ein Beispiel dafür stellt die ca. 15 Kilometer südlich von Leipzig gelegene Kippe Witznitz dar. Die Pleiße wurde bergbaubedingt über die Kippe verlegt, so dass sich nun durch den Grundwasserwiederanstieg eine Exfiltration des Kippengrundwassers in den Vorfluter ergibt.

Im Zuge der Erarbeitung von Sanierungskonzeptionen erfolgte der Aufbau eines reaktiven räumlich differenzierten Stofftransportmodells durch eine Modellkopplung des Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodells PcGeofim mit dem hydrogeochemischen Gleichgewichtsmodell PHREEQC. Damit lassen sich bei einem mittleren Verwitterungsgrad der kippeneigenen Eisendisulfide von 18% die gegenwärtige Kippengrundwasserbeschaffenheit modelltechnisch abbilden und die zukünftige Beschaffenheitsentwicklung sowie die zu erwartenden Stoffausträge aus der Kippe prognostizieren.

Water quality in lignite mining regions is often characterised by high concentrations of iron and sulphate as well as low pH-values due to the weathering of pyrite and marcasite containing minerals. One example is represented by the lignite dump Witznitz, which is 15 km south of Leipzig. During mining the river Pleiße was displaced and now crosses the dump. Due to the rising groundwater table dump groundwater has started to exfiltrate into the river.

With regard to the development of remediation strategies a reactive spatially distributed solute transport model has been set up by coupling the groundwater flow and solute transport model PcGeofim with the hydrogeochemical equilibrium model PHREEQC. Therewith it is possible to reproduce the present groundwater quality of the dump, whereas the average weathering degree of iron disulphides amounts to 18%. Furthermore the future development of water quality can be predicted as well as the expectable solute charge from the dump.

---

## 1 Einführung

Die Wasserbeschaffenheit der Pleiße weist im Braunkohlentagebaurevier südlich von Leipzig (Leipziger Südraum) eine deutliche bergbauliche Beeinflussung auf. Vor allem bei Niedrigwasserabflüssen zeigt sich eine intensive Trübung des Wassers mit gelbbrauner bis ockerfarbener Färbung, die auf den Eintrag von Eisen aus angrenzenden Kippengebieten schließen lässt.

Das Eisen führt im Fließgewässer neben der optischen Beeinträchtigung zu einer Verockerung des Gewässerbodens und zu negativen Auswirkungen auf die aquatische Flora, die Organismen am Gewässergrund sowie die Fische und das gesamte Gewässerökosystem und behindert damit die Herstellung eines guten ökologischen Potentials bzw. Zustands im Sinne der EU-Wasserrahmenrichtlinie.

Die ca. 15 km südlich von Leipzig gelegene Kippe des ehemaligen Tagebaus Witznitz (Betrieb zwischen 1946 und 1993) stellt gegenwärtig die bedeutende Eiseneintragsquelle für die Pleiße dar. Das Fließgewässer wurde in den 1960er Jahre bergbaubedingt über die Kippe verlegt, so dass nun bei sich vollziehendem Grundwasserwiederanstieg ein direkter Wassereintrag aus dem Kippenkörper in die Pleiße stattfindet. Zukünftig ist davon auszugehen, dass bei fortschreitendem Grundwasserwiederanstieg auch aus weiteren Kippengebieten im Leipziger Südraum ein Grundwassereintrag in Richtung Pleiße erfolgt.

Zur Prognose der zu erwartenden Beeinflussung der Pleiße wurde exemplarisch für die Kippe Witznitz ein reaktives Stofftransportmodell entwickelt, auf dessen Grundlage eine räumlich differenzierte Berechnung der zukünftigen Exfiltrationsmengen und Stofffrachten aus der Kippe in die Pleiße erfolgte.

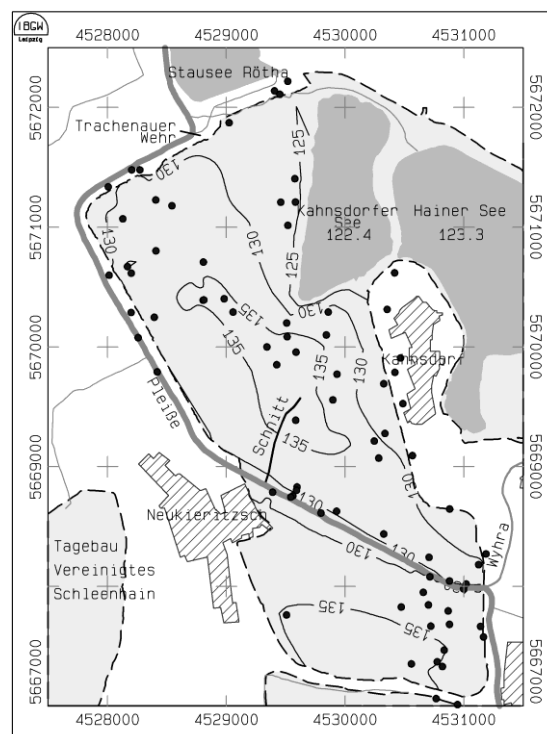
## 2 Bearbeitungsgebiet

### 2.1 Grundwasserströmung

Abb. 1 zeigt das Bearbeitungsgebiet, wobei in den dargestellten Untersuchungen speziell das Kippengebiet zwischen den Ortslagen Neukieritzsch im Westen und Kahnsdorf im Osten bis zum Kahnsdorfer See betrachtet wird (ohne die Kippenflächen östlich des Kahnsdorfer Sees). Die Pleiße durchquert das Gebiet von Südosten nach Norden, wobei sie zwischen der Mündung der Wyhra und der Ortslage Neukieritzsch direkt über die Kippe verlegt wurde und nach Neukieritzsch bis zum Trachenauer Wehr die Kippe im angrenzenden Gewachsenen umfließt.

Der Grundwasserwiederanstieg begann innerhalb der Kippe Witznitz in den bereits verkippten Bereichen noch während des Tagebaubetriebes und setzte sich nach Abschluss des Betriebes weiter fort. Die dargestellten Hydroisohypsen repräsentieren das derzeitige Strömungsregime, das sich aus gemessenen Grundwasserständen ergibt. Im Kippenteil nördlich der Pleißequerung ist eine Hochfläche ausgebildet, von der aus der Grundwasserabstrom in alle Richtungen stattfindet. Südlich der Pleißequerung erfolgt die Grundwasserströmung hauptsächlich von Süden nach Norden in Richtung Pleiße. Damit kommt es im gesamten Fließgewässerabschnitt der Pleiße zwischen der Wyhramündung und dem Trachenauer Wehr zu einer Exfiltration von Kippengrundwasser in Richtung des Fließgewässers.

Die Hydrodynamik wurde über ein dreidimensionales Grundwasserströmungsmodell mit Hilfe des Programmsystem PcGeofim (Sames 2010) abgebildet. Daraus ergibt sich für die zukünftige Entwicklung der Wasserstände ein weiterer Anstieg um maximal 2 bis 3 m im Kippenteil nördlich der Pleißequerung sowie um maximal ca. 5 m im Kippenteil südlich der Querung (IBGW 2009-2010). Folglich kommt es zu einer weiteren Erhöhung der hydraulischen Gradienten aus der Kippe in Richtung Pleiße.



**Abb. 1:** Bearbeitungsgebiet der Kippe Witznitz mit Fließ- und Standgewässern sowie Hydroisohypsen basierend auf Grundwasserständen des Jahres 2007; schwarze Punkte: Grundwassermessstellen; gestrichelt umrandete Flächen: Kippengebiete; Modellschnittspur (s. Abschnitt 4)

## 2.2 Wasserbeschaffenheit in der Kippe

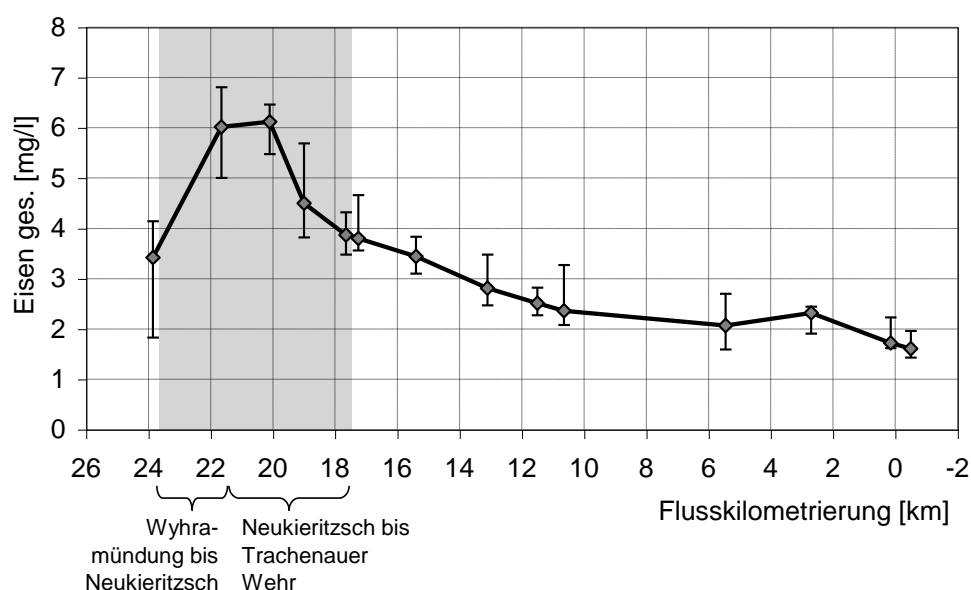
Das Grundwasser der Kippe Witznitz weist bedingt durch die Verwitterung von Eisendisulfiden  $\text{FeS}_2$  durch den Kontakt des Kippsubstrates mit Luftsauerstoff und Wasser bei der Offenlegung und Umlagerung im aktiven Tagebaubetrieb eine typische bergbauliche Prägung auf. Der pH-Wert liegt mit 5,3 im leicht sauren Bereich.

Auf der Kationenseite der Grundwasserzusammensetzung dominieren das aus Eisendisulfiden freigesetzte Eisen mit einem mittleren Gehalt von 1050 mg/l und aus kalkhaltigen Mineralen stammendes Calcium mit einem mittleren Gehalt von 480 mg/l. Daneben treten die Kationen Magnesium, Natrium, Kalium sowie bei pH-Werten unter 4,5 auch Aluminium auf, die auf die Verwitterung von Silikaten zurückzuführen sind. Das vorherrschende Anion der Grundwasserzusammensetzung ist Sulfat mit einer mittleren Konzentration von 3700 mg/l. Weiterhin treten Hydrogenkarbonat und Chlorid auf.

Die Spanne zwischen den maximalen und minimalen Konzentrationen im Kippenkörper liegt bei Eisen zwischen 26 und 4510 mg/l und verdeutlicht die hohe räumliche Variabilität der Grundwasserbeschaffenheit. Kleinräumlich ist die Variabilität hauptsächlich auf den unterschiedlich langen und starken Kontakt mit Luftsauerstoff während der Umlagerung sowie variierende Strömungsbedingungen als Folge verschiedener hydraulischer Durchlässigkeiten zurückzuführen. Größerskalig betrachtet ist der Südteil der Kippe (Höhe Ortslage Neukieritzsch und südlich davon, vgl. Abb. 1), in dem die Pleißequerung liegt, durch wesentlich höhere Eisenkonzentrationen von im Mittel 1500 mg/l als der Nordteil der Kippe mit mittleren Konzentrationen von 500 mg/l gekennzeichnet.

## 2.3 Wasserbeschaffenheit der Pleiße

Die Entwicklung der Gesamt-Eisen-Konzentrationen im Längsschnitt der Pleiße zeigt Abb. 2 für niedrige und mittlere Abflüsse, bei denen die Stoffeinträge aus dem Kippengebiet deutlich zutage treten. Die Konzentrationen liegen bei Eintritt in das Kippengebiet Witznitz auf Höhe der Wyhramündung im Mittel bei ca. 3,5 mg/l und steigen im Bereich der Kippenquerung bis zur Neukieritzsch auf ca. 6,0 mg/l an. Nach Flusskilometer 20 erfolgt ein langsamer Rückgang der Konzentrationen. Aus diesem Verhalten lässt sich schließen, dass der Eintrag von Eisen in die Pleiße maßgeblich im Gewässerabschnitt zwischen der Wyhramündung und Neukieritzsch stattfindet, in dem die Pleiße die Kippe direkt quert und die Eisenkonzentrationen im Kippenkörper im Mittel bei 1500 mg/l liegen. Zwischen Neukieritzsch und dem Trachenauer Wehr sedimentiert bereits ein Teil des eingetragenen Eisens, insbesondere im Rückstaubereich des Wehres.



**Abb. 2:** Ges.-Eisen-Konzentrationen im Längsverlauf der Pleiße zwischen der Wyhramündung (Eintritt in das Kippengebiet Witznitz) und der Mündung in das Elsterflutbett in Leipzig; Median und Quartile aus 17 Messkampagnen mit Abflüssen  $< 4 \text{ m}^3/\text{s}$  (Quelle: Monitoring der SGL GmbH)

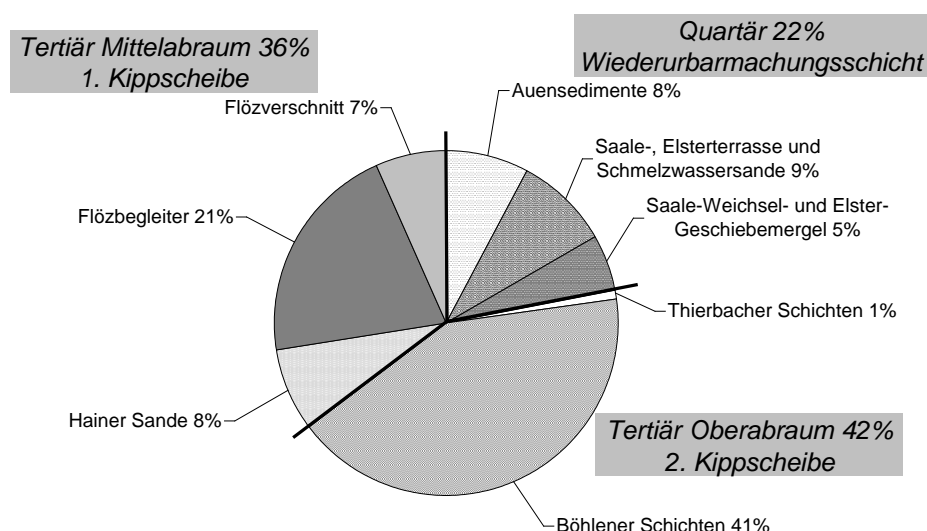
### 3 Stoffinventarisierung des Kippenkörpers

Die Inventarisierung der Ausgangsgehalte der einzelnen Mineralphasen (insbesondere Eisendisulfide und alkalische Puffer wie Calcit) im Kippsubstrat stellt eine wesentliche Voraussetzung für die Parametrisierung eines reaktiven Stofftransportmodells dar. Dazu wurde mit Hilfe einer umfangreichen Archivrecherche die Genese des Kippenkörpers rekonstruiert und daraus eine strukturelle Gliederung für die Kippe abgeleitet. Weiterhin wurde über ein vorbergbauliches geologisches Modell der historischen gewachsenen Schichten im jetzigen Kippenbereich ermittelt, welche geologischen Schichten in welchen Volumenanteilen im Kippsubstrat anzutreffen sind (Abbildung 3).

Das Kippsubstrat setzt sich gemäß der im Tagebaugebiet vorbergbaulich vorhandenen geologischen Schichtenabfolge aus den im Liegenden und Hangenden der Braunkohlenflöze vorhandenen vorwiegend schluffig-tonig ausgebildeten Flözbegleitern und technologisch bedingt geringen Anteilen Flözverschnitt sowie den zwischen den Flözen lagernden Hainer Sanden zusammen (= tertiärer Mittelabraum), weiterhin aus den darüber lagernden tertiären unter marinen bis brackischen Bedingungen abgelagerten Böhlener Schichten und untergeordnet auch den Thierbacher Schichten (= tertiärer Oberabraum) sowie darüber hinaus aus quartären Auensedimenten, Saale- und Elsterrassensedimenten und Schmelzwassersanden sowie Geschiebemergeln (= quartärer Abraum).

Die tertiären Schichten dominieren die Kippenzusammensetzung mit 78% des Gesamtvolumens der kippenbildenden Substrate, während die quartären Sedimente mit 22% an der Kippenzusammensetzung beteiligt sind. Entsprechend der Verkippungstechnologie im Tagebau Witznitz, in dem der Massentransport im Zugbetrieb erfolgte, lässt sich die Kippe idealisiert in mehrere vertikal übereinander angeordnete Kippscheiben unterteilen. Die erste unterste Kippscheibe setzt sich aus tertiärem Mittelabraum zusammen, wobei die bindigen Flözbegleiter den größten Anteil ausmachen. In der zweiten darüber lagernden Kippscheibe aus tertiärem Oberabraum dominieren die feinsandigen Böhlener Schichten. Als Geländeabschluss wurde eine Wiederurbarmachungsschicht aufgebracht, die sich vorwiegend aus quartären Sedimenten zusammensetzt. Die größten Anteile bilden dabei die Auensedimente und die rolligen Schmelzwasser- und Terrassensedimente des Saale- und Elsterglazials.

Für die Stoffinventarisierung wurde eine geochemische Charakterisierung der einzelnen gewachsenen am Aufbau der Kippe beteiligten Substrate auf der Grundlage von bodengeologischen Gutachten aus der Vorfelderkundung des Tagebaus durchgeführt. Daraus ergibt sich, dass insbesondere die tertiären Sedimente durch hohe Gesamt-Schwefel- und Disulfid-Schwefelgehalte von  $> 1 \text{ M-\%}$  (Ausnahme Hainer Sande) gekennzeichnet sind und damit die Hauptquelle für die Versauerung und Eisenbelastung des Kippengrundwassers darstellen. Die quartären Sedimente weisen hingegen nur sehr geringe Disulfid-Schwefelgehalte auf und verfügen darüber hinaus im Gegensatz zu den tertiären Sedimenten über ein calciumkarbonatisches Pufferpotential von im Mittel  $0,2 \text{ M-\%}$  Karbonat-Kohlenstoff.



**Abb. 3: Verteilung der Volumenanteile der kippenbildenden Substrate im Kippenkörper Witznitz und Zuordnung zu Kippscheiben**

Aus der Synthese der Informationen zum Kippenaufbau und der bodengeologischen Charakterisierung der daran beteiligten Substrate wurden mittlere Stoffgehalte für die Gesamtkippe sowie die einzelnen Kippscheiben abgeleitet. Demgemäß liegt der mittlere ursprüngliche Disulfid-Schwefelgehalt der Kippsubstrate bei 1,1 M-%. Durch die Umlagerung der Substrate und die Kippenbildung wird ein Teil der Eisendisulfide oxidiert, wodurch eine Freisetzung von gelöstem Eisen, Sulfat und Azidität in die flüssige Phase erfolgt. Das mittlere karbonatische Pufferpotential des Kippenkörpers liegt bei 0,06 M-% Karbonat-Kohlenstoff.

## 4 Stofftransportmodellierung

### 4.1 Konzept

Die reaktive Stofftransportmodellierung für die Kippe Witznitz wurde über eine Modellkopplung zwischen dem Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodell PcGeofim (Sames 2010) und dem hydrogeochemischen Simulator PHREEQC (Parkhurst & Appelo 1999) realisiert. Die Berechnungen erfolgten in neun in Richtung Pleiße gerichteten Schnitten für einen 400jährigen Zeitraum bis 2400. Aus den berechneten Grundwasserbeschaffenheiten im Zustrom zur Pleiße lassen sich Stoffströme aus der Kippe in die Pleiße ermitteln. Der vorliegende Beitrag stellt die Modellergebnisse exemplarisch für den in Abb. 1 dargestellten Schnitt im Nordanstrom zur Pleiße gegenüber der Ortslage Neukieritzsch dar.

### 4.2 Modellaufbau

#### 4.2.1 Schnittparametrisierung

Die Geometrie und Parametrierung der Schnitte wurde dem bestehenden Grundwasserströmungsmodell (IBGW 2009-2010) entnommen. In Richtung der Schnittpur wurde eine Diskretisierung von 50 m gewählt, in z-Richtung (Höhe) wurde die Diskretisierung mit 5 m angesetzt.

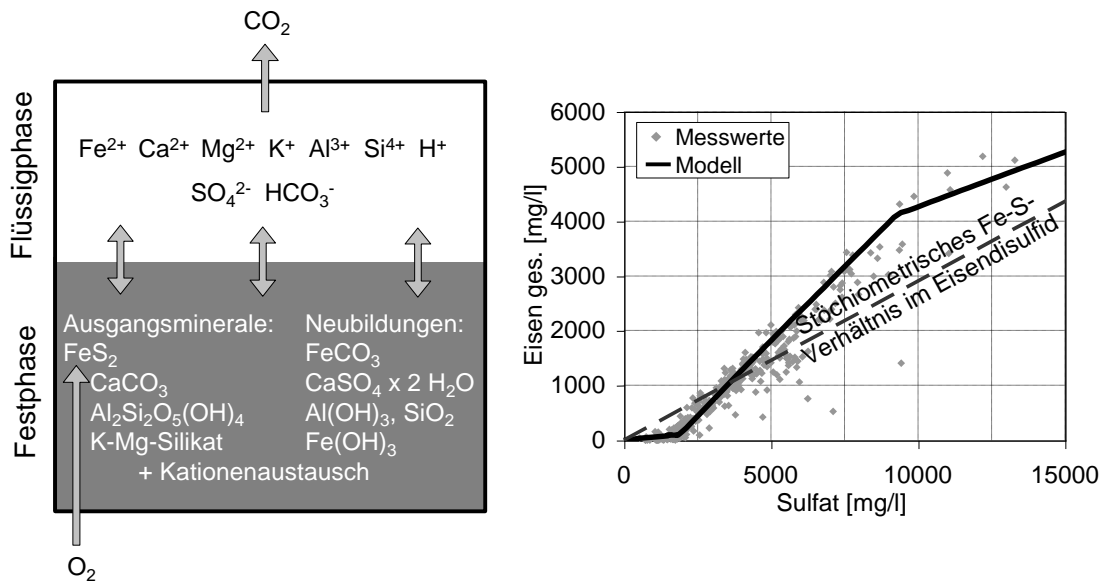
Die hydraulische Durchlässigkeit wurde für die einzelnen vertikal übereinander angeordneten Kippscheiben (vgl. Abschnitt 3) über die Bindigkeit (Ton- und Schluffgehalt) der jeweils verkippten Substrate ermittelt. Daraus ergeben sich für die untere erste Kippscheibe  $k_f$ -Werte zwischen  $2 \cdot 10^{-9}$  und  $2 \cdot 10^{-8}$  m/s und für die obere zweite Kippscheibe zwischen  $5 \cdot 10^{-7}$  und  $9 \cdot 10^{-6}$  m/s. Die Grundwasserneubildung wurde flurabstandsabhängig basierend auf Bodenwasserhaushaltsberechnungen vorgegeben (IBGW 2009-2010). Die Grundwasserströmung in den Schnitten erfolgt in Richtung der Pleiße, welche die entwässernde Randbedingung des Modells darstellt.

#### 4.2.2 Hydrogeochemisches Modellmodul und Modellkopplung

Das hydrogeochemische Modellmodul bildet die in Bergbaukippen typischen Prozesse ab (Abb. 4, links). Ein vergleichbares Modell wurde z. B. von Lenk & Wisotzky (2007) zur Abbildung der Kippengrundwasserbeschaffenheit im Tagebau Inden (Nordrhein-Westfalen) verwendet. Durch die Eisendisulfidoxidation wird eine Prozesskette initiiert, die aus Pufferprozessen wie der Calcitlösung ( $\text{CaCO}_3$ ), der Silikatverwitterung (stellvertretend Kaolinit  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  und K-Mg-Silikat) und der Pufferung durch Kationenaustausch besteht. Darüber hinaus treten weitere Begleitprozesse wie die Gipsfällung ( $\text{CaSO}_4$ ), die Eisenhydroxidfällung ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) sowie die Bildung von Siderit ( $\text{FeCO}_3$ ) im Untergrund auf. Durch die Silikatverwitterung kann es weiterhin zur Ausfällung von Aluminiumhydroxid ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) und Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) aus der gelösten Phase kommen.

Die rechentechnische Umsetzung erfolgte mit dem Simulator PHREEQC (Parkhurst & Appelo 1999), wobei die Parametrisierung der Festphasenvorräte auf der zuvor durchgeführten Stoffinventarisierung (vgl. Abschnitt 3) basierte. Mit dem Modul ist es möglich, die gemessene Grundwasserbeschaffenheit über die Genese durch die Eisendisulfidverwitterung und die sie begleitenden Prozesse abzubilden. Abb. 4 (rechts) zeigt eine Gegenüberstellung der mit dem Modell berechneten Eisen- und Sulfatkonzentrationen für eine schrittweise Sauerstoffzugabe, d.h. einen steigenden Eisendisulfidoxidationsgrad. Die berechnete Kurve bildet das gemessene Verhältnis zwischen Eisen- und Sulfatkonzentrationen im Grundwasser gut ab, welches deutlich vom stöchiometrischen Verhältnis beider Elemente im Eisendisulfid abweicht. Dies verdeutlicht den Einfluss der Puffer- und Begleit-

prozesse (insbesondere Calcitlösung, Gips- und Sideritfällung) auf die sich einstellende Grundwasserbeschaffenheit in der Kippe.



**Abb. 4:** Konzept und Prozesse des hydrogeochemischen Modellmoduls (linkes Bild); mit dem Modell berechnetes Verhältnis zwischen Eisen- und Sulfatkonzentrationen im Grundwasser und gemessene Konzentrationen im Kippengrundwasser (rechtes Bild)

Die beobachtete Variabilität der Grundwasserbeschaffenheit kann dabei allein durch die Variation des Eisendisulfidoxidationsgrades, der aus einem unterschiedlich intensiven Kontakt des Substrates mit Sauerstoff resultiert, erklärt werden, wobei zur Abbildung der mittleren Eisengehalte von 1050 mg/l und Sulfatgehalte von 3700 mg/l im Kippengrundwasser (vgl. Abschnitt 2.2) ein mittlerer Eisendisulfidoxidationsgrad von etwa 18% notwendig ist.

Das hydrogeochemische Modellmodul wurde in jede Modellzelle des Schnittmodells integriert und nach jedem Berechnungszeitschritt der Grundwasserströmung und des Stofftransports erfolgte die Gleichgewichtseinstellung des Grundwassers mit den mineralischen Festphasen im Kippenkörper.

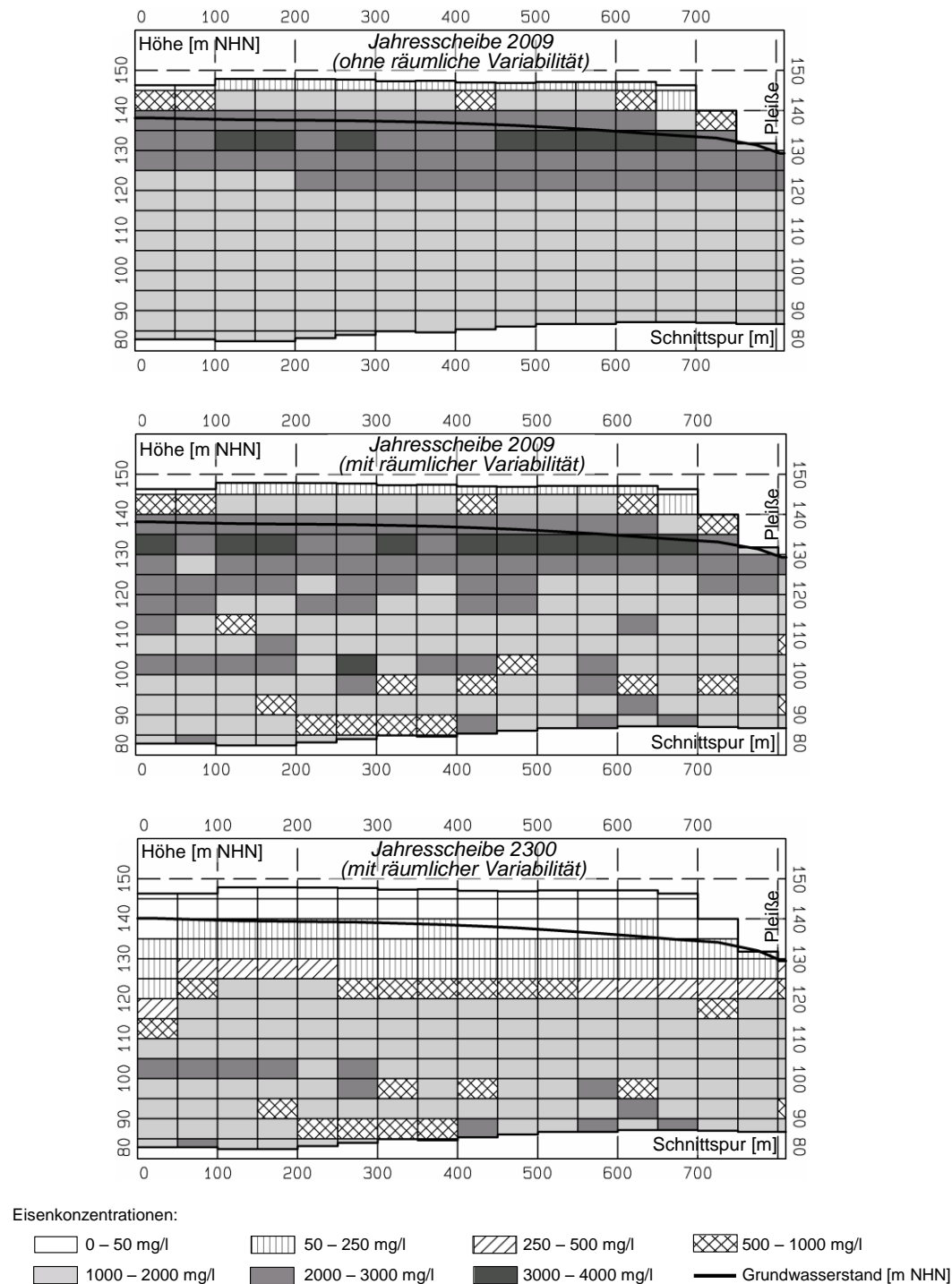
## 4.3 Modellergebnisse

### 4.3.1 Berechnete Eisenkonzentrationen im Grundwasser

Mit Hilfe des reaktiven Stofftransportmodells wurde die Genese der Grundwasserbeschaffenheit im Schnitt abgebildet. Dazu wurden eine primäre Eisendisulfidoxidation, die durch den Kontakt des Kippsubstrates mit Sauerstoff vor und während der Kippenbildung erfolgt und den gesamten Kippenkörper erfasst, sowie eine sekundäre Eisendisulfidoxidation, die durch den Sauerstoffeintrag über die Kippenoberfläche verursacht wird, im Modell vorgeben. Darüber hinaus wurden zur Abbildung der räumlichen Variabilität der Wasserbeschaffenheit im Kippenkörper Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt, indem die primäre Eisendisulfidoxidation, die für die einzelnen Modellzellen angesetzt wurde, mit Hilfe von normalverteilten Zufallszahlen variiert wurde. Die Normalverteilung wurde derart parametrisiert, dass die gemessene Streuung der Eisenkonzentrationen im Kippengrundwasser mit dem Modell abgebildet wurde.

Gemäß den Berechnungen stellen sich die gegenwärtigen Eisenkonzentrationen im ausgewählten Schnitt (zunächst ohne Monte-Carlo-Simulationen) wie folgt dar (Abb. 5, oben): Im Bereich des Grundwasseranschnitts treten Konzentrationen von maximal 3000 bis 4000 mg/l auf, während die Konzentrationen im tieferen Grundwasserleiter zwischen 1000 und 2000 mg/l liegen. Diese tiefspezifische Konzentrationsverteilung ist auf den Einfluss der sekundären Eisendisulfidoxidation durch den Sauerstoffeintrag über die Kippenoberfläche zurückzuführen. Mit den Monte-Carlo-Simulationen (Abb. 5, Mitte) ergibt sich eine deutliche Überlagerung der Konzentrationsverteilung durch die angesetzte Heterogenität, wobei jedoch die wesentlichen Charakteristika wie hohe Eisenkonzentrationen

im Bereich des Grundwasseranschnitts und niedrigere darunter noch klar erkennbar sind. Bis 2300 findet im oberen Bereich des Kippenkörpers ein maßgeblicher Stoffaustrag statt (Abb. 5, unten), so dass die berechneten Eisenkonzentrationen bei nur noch maximal 250 mg/l liegen. Diese vergleichsweise geringen Konzentrationen resultieren aus der Rücklösung von reaktiven Eisenmineralphasen (vornehmlich Siderit) im Untergrund. In tieferen Bereichen des Kippengrundwasserleiters bleiben die Eisenkonzentrationen im zeitlichen Verlauf gemäß den Berechnungen hingegen nahezu unverändert. Dies ist auf die geringe hydraulische Leitfähigkeit der unteren ersten Kippscheibe zurückzuführen (vgl. Abschnitt 4.2.1) und den dadurch bedingten sehr geringer Grundwasserabstrom und somit auch Stoffaustrag aus diesen Bereichen.

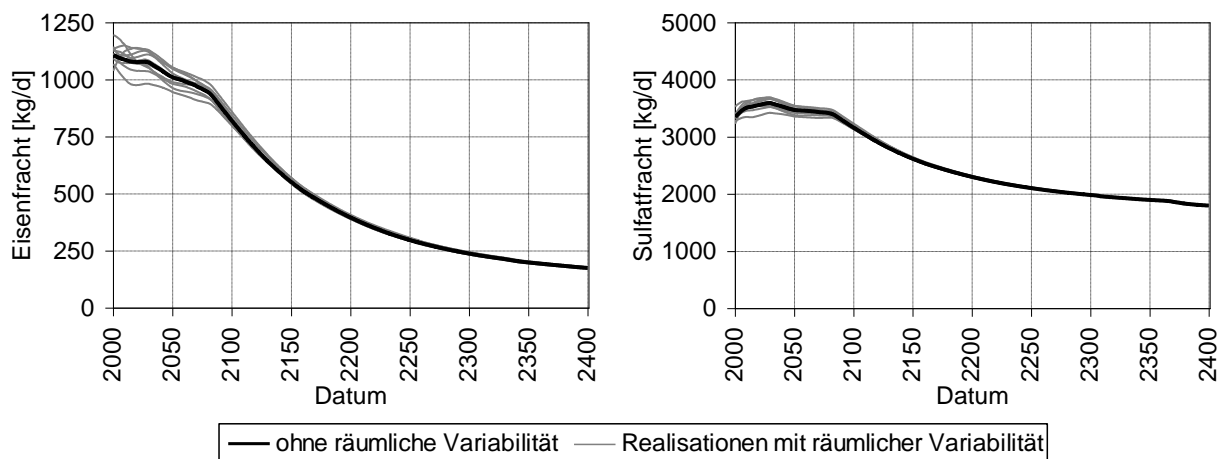


**Abb. 5:** Berechnete Eisenkonzentrationen und Grundwasserstände (Schnittspur in Abb.1) für das Jahr 2009 (mit und ohne räumliche Variabilität) und 2300 (mit räumlicher Variabilität)

#### 4.3.2 Stoffausträge aus dem Kippenkörper

Die Grundwasser- und Stoffabströme aus dem Kippenkörper in Richtung Pleiße wurden nach Bilanzgebieten untergliedert durch ein gewichtetes Mittelungsverfahren aus den modellierten Abströmen der neun repräsentativen Schnitte berechnet.

Die Eisenausträge (Abb. 6), die sich gemäß den Modellrechnungen aus dem Kippenkörper in Richtung Pleiße ergeben, liegen bis 2100 bei etwa 1000 kg/d und sinken dann bis 2400 auf etwa 200 kg/d. Zunächst dominiert der Stoffaustrag des gelöst im Grundwasser vorhandenen Eisens. Langfristig (nach 2200) kommt jedoch der Lösung von reaktiven Mineralphasen eine größere Bedeutung zu. Sulfat weist ein ähnliches Austragsverhalten auf. Bis etwa 2100 liegt der Kippenabstrom bei ca. 3600 kg/d. Bis 2400 kommt es zu einer Reduzierung der Frachten auf etwa 2000 kg/d. Der weniger ausgeprägte Rückgang im Vergleich zu Eisen ist auf die langfristige Gipsrücklösung im Kippenkörper zurückzuführen, die über lange Zeiträume in Sulfatkonzentrationen im Grundwasser > 1500 mg/l resultiert. Die im Modell implementierte Variabilität der Grundwasserbeschaffenheit im Kippenkörper macht sich auf die in Richtung Pleiße abströmenden Stofffrachten insbesondere im Zeitraum zwischen 2000 und 2100 bemerkbar, in dem vorwiegend das gelöst im Kippengrundwasser vorhandene Eisen und Sulfat ausgetragen wird. Die Abweichung der berechneten Stofffrachten von der Standardvariante liegt dabei bei maximal etwa 9%.



**Abb. 6:** Berechnete Eisen- und Sulfatausträge aus der Kippe Witznitz in Richtung Pleiße (Fließgewässersabschnitt zwischen Wyhrmündung und Trachenaue Wehr); ohne räumliche Variabilität sowie für 10 Realisationen mit räumlicher Variabilität durch Monte-Carlo-Simulationen

## 5 Ausblick

Durch das erarbeitete reaktive Stofftransportmodell ist ein Werkzeug gegeben, mit dessen Hilfe der langfristig zu erwartenden Stoffaustrag aus einer Braunkohlenbergbaukippe in räumlicher Differenzierung berechnet werden kann. Mit Hilfe des Modells kann durch Variantenbetrachtungen eine quantitative Bewertung konkreter Sanierungsstrategien zur Reduzierung der Stoffausträge aus der Kippe Witznitz erfolgen. Darüber hinaus ist die Herangehensweise der reaktiven Stofftransportmodellierung prinzipiell auf andere Untersuchungsgebiete übertragbar.

## Literatur

- IBGW GMBH (2009-2010): Auswirkungen des Grundwasserwiederanstiegs und der daraus folgenden Exfiltration eisenbelasteter Grundwässer aus den Kippen des ehemaligen Tagebaus Witznitz in die Fließgewässer Pleiße und Wyhra (Teile 1 - 4). – unveröffentlichter Bericht, Leipzig.
- LENK, S. & WISOTZKY, F. (2007): Chemische Beschaffenheit und modellierte Genese von Grundwässern in Braunkohlenabraumkippe des Tagebaus Inden. – Grundwasser, 12: 301–313.



- PARKHURST, D.L. & APPELO, C.A.J. (1999): User's Guide to PHREEQC - A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. – Denver, Colorado.
- SAMES, D. (2010): PCGEOFIM<sup>®</sup>-Anwenderdokumentation. – Leipzig.

