

„Grundwasserbeschaffenheit  
und hydrochemische Prozesse  
in rheinischen Braunkohlen-Abraumkippen  
und in deren Abstrom“

Zusammenfassung der Dissertation  
von Dr. Lenk

## **Zusammenfassende Darstellung der durchgeführten Untersuchungen**

Die RWE Power AG betreibt im westlichen rheinischen Braunkohlenrevier den Tagebau Inden. Für diesen Tagebau liegt ein genehmigter Braunkohlenplan vor, der die vollständige Verfüllung des im südöstlichen Teil des Abbaufeldes entstehenden Restloches vorschreibt. Abweichend von diesem Braunkohlenplan soll nun ein Restsee entstehen. Die Errichtung des Tagebausees setzte eine neue Umweltverträglichkeitsprüfung und ein Braunkohlenplanänderungsverfahren voraus, in dessen Rahmen Herr Dr. Stephan Lenk entsprechende hydrogeologische Untersuchungen anstellte. Dabei kam einer Beurteilung der Gefährdung von Oberflächengewässern, Feuchtgebieten und Wassergewinnungsanlagen durch abströmendes Kippengrundwasser sowie der zukünftigen Wasserchemie des Restsees Inden II eine besondere Bedeutung zu. Die für die Fachwelt neuen Untersuchungsergebnisse wurden bereits teilweise in einschlägigen wissenschaftlichen Zeitschriften, Schriftenreihen und Tagungsbänden veröffentlicht und auf Fachtagungen vorgestellt (LENK & WISOTZKY 2006, WISOTZKY & LENK 2006, WISOTZKY & LENK 2007, LENK & WISOTZKY 2008a, LENK & WISOTZKY 2008b, LENK 2008).

Für den Betrieb des Tagebaues Inden ist es aus Standsicherheitsgründen erforderlich, die Grundwasserleiter oberhalb der Kohleflöze vor dem Anschnitt zu entwässern. Darüber hinaus ist es notwendig, den Druckwasserspiegel unter den lokal tiefsten Abbaustand abzusenken. Die Grundwasserabsenkung erfolgt mittels Brunnen, die überwiegend im Vorfeld und im Randbereich des Tagebaues angeordnet sind. Aufgrund dieser Sumpfungmaßnahmen, deren Schwerpunkte sich mit der Entwicklung des Tagebaubetriebes in Richtung Südosten verlagern, kommt es zu einer starken Veränderung des natürlichen Grundwasserströmungsfeldes. Nach dem Ende der Auskohlung werden die Sumpfungsbunnen abgeschaltet, wodurch die Grundwasserstände im Tagebau Inden weiträumig wieder ansteigen und sich allmählich die ursprüngliche, bergbauunbeeinflusste Grundwasserströmungsrichtung generell wieder einstellt. Das Grundwasser, das von Süden kommend in die Abraumkippen einströmt, wird dann ausgehend vom Abbaufeld Inden in nördlicher Richtung abfließen.

Durch die Wiederauffüllung der Absenkungstrichter nach Einstellung der Sumpfungmaßnahmen kommt es langfristig zu einem Abstrom von Kippengrundwasser in das unverritzte Gebirge. Mit der Grundwasserströmung werden die im Kippengrundwasser gelösten Hauptinhaltsstoffe  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\Sigma\text{CO}_2$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  und  $\text{H}^+$  in das unterstromige Gebirge gelangen und dort teilweise mit der Festphase reagieren. Der zukünftige Stoffaustrag aus der Kippe wird durch den zu Beginn der Kippengrundwassergenese entstandenen Stoffpool aus Eisendisulfid- und Karbonatverwitterungsprodukten gespeist und über einige Jahrhunderte andauern. Durch den Abstrom von Kippengrundwasser in die sandig-kiesigen Grundwasserleiter des unverritzten Gebirges können Wassergewinnungsanlagen, Oberflächengewässer, Feuchtgebiete sowie das Grundwasser selbst gefährdet werden. Deshalb sollte im Rahmen der UVP unter anderem untersucht werden, inwieweit eine Gefährdung der Schutzgüter Grund- und Oberflächenwasser im Unterstrom des Tagebaues durch infiltrierendes, bergbaubedingt qualitativ verändertes Kippenwasser erfolgen wird. Hier lag der Schwerpunkt des Untersuchungsvorhabens, weshalb einer Prognose der im Jahre 2300 zu erwartenden Grundwasserchemie im nördlichen Abstrombereich der Braunkohlenabraumkippe eine zentrale Bedeutung zukam. Ein prioritärer Untersuchungsbedarf lag beim Sulfat, das eines der Hauptreaktionsprodukte der Pyritoxidation ist und dessen Grenzwert gemäß Trinkwasserverordnung bei 240 mg/l liegt.

Zur Gefährdungsabschätzung und zur Wirkungsanalyse der wesentlichen hydrogeochemischen Prozesse wurden Stofftransport- und Reaktionsmodellierungen eingesetzt, für die zunächst verschiedene Rand- und Anfangsbedingungen ermittelt werden mussten (z.B. eine typische Kippengrundwasserbeschaffenheit, die Sediment- und Wasserchemie des unverritzten Gebirges im Tagebauvorfeld sowie die bei den Modellierungen zu berücksichtigenden chemischen Reaktionen und Mineralphasen). Um die einzelnen Anfangsbedingungen als Voraussetzung der Simulationsrechnungen zu definieren, wurden teilweise neue Untersuchungsverfahren entwickelt und die nachstehend genannten Teiluntersuchungen durchgeführt:

- a) **Untersuchung der Hydrogeochemie der Braunkohlenabraumkippen Inden I/II und Zukunft/West und Ermittlung der zukünftigen Wasserchemie des Restsees Inden II**
- Auswertung von Sedimentanalysen und Durchführung hydrogeochemischer Modellrechnungen zur

Bestimmung von mittleren versauerungsrelevanten Eigenschaften der Abraumsedimente.

- Auswertung von Grundwasseranalysen und Durchführung hydrogeochemischer Modellrechnungen zur Ermittlung der Kippengrundwasserbeschaffenheit und der zukünftigen Hydrochemie des Rest-sees.
- Beurteilung des Austrages von Pyritoxidationsprodukten aus den Abraumkippen hinsichtlich Dauer und Intensität auf Basis von Felduntersuchungen.

Durch die Auswertung von aktuellen Daten sowie die Durchführung zahlreicher Felduntersuchungen wurden die Abraumkippen chemisch charakterisiert. Auf Basis von sediment- und wasserchemischen Daten erfolgte die Bestimmung der mittleren Kippengrundwasserbeschaffenheit. Auf dieser Grundlage konnte die gegenwärtige hydrogeochemische Situation im Untersuchungsgebiet untersucht und beschrieben werden. Modellrechnungen mit dem Programm PHREEQC vertieften zudem das Verständnis hydrogeochemischer Prozesse und Wechselwirkungen bei der Kippengrundwassergenese.

**b) Untersuchung der Hydrogeochemie des Gebirges im nördlichen Tagebauvorfeld und Ermittlung der für die Entwicklung der Wasserbeschaffenheit im Abstrom der Abraumkippen relevanten hydrogeochemischen Reaktionen und Mineralphasen**

- Abschätzung der vom Tagebaubetrieb unbeeinflussten geochemischen Zusammensetzung der Schichten im nördlichen Abstrombereich der Abraumkippen.
- Auswertung von Grundwasseranalysen zur Ermittlung einer vom Tagebau unbeeinflussten Wasserqualität des wasserwirtschaftlich wichtigsten Horizontes 8.
- Identifikation der bei den Simulationsrechnungen zum Kippenwasseraustrag zu berücksichtigenden Mineralphasen mit Hilfe von Säulen- und Schüttelversuchen.

Von wesentlicher Bedeutung für die Ausbreitung der mit dem Kippengrundwasser eingetragenen Stofffracht ist einerseits die Sedimentchemie der vom Kippenwasserabstrom betroffenen Aquifere. Andererseits erfordert die Beschaffenheitsprognose die Angabe der Grundwasserchemie vor Infiltration des Kippenwassers. Zudem hat im Untersuchungsgebiet der hydrogeologische Aufbau des gewachsenen Gebirges großen Einfluss auf die potenziellen Ausbreitungswege des abströmenden Kippenwassers und damit auf die zukünftige Gefährdung von Oberflächengewässern und Feuchtgebieten.

Die Untersuchungen zur hydrogeochemischen Entwicklung im Abstrom der Abraumkippen erfolgten in zwei Stufen. Die Wechselwirkungen zwischen einströmendem Kippenwasser und Aquifersedimenten wurden zunächst anhand eindimensionaler Säulenversuche untersucht. Zu diesem Zweck wurden typische Aquifersedimente in Versuchssäulen eingebaut. Die Durchströmung der Säulen mit einem synthetischen Kippengrundwasser, das in seiner Zusammensetzung der gemessenen Kippengrundwasserchemie entsprach, gewährleistete die Übertragbarkeit der Untersuchungsbefunde. Die Ergebnisse der Säulenexperimente flossen in einem zweiten Schritt in die Stofftransport- und Reaktionsmodellierung ein, um die hydrogeochemische Entwicklung im Abstromgebiet für das Jahr 2300 zu prognostizieren und eine Gefährdung von Oberflächengewässern durch abströmendes Kippenwasser beurteilen zu können. Zur Abschätzung der aciditätsmindernden Wirkung von Silikatverwitterungsprozessen wurde eine neue Untersuchungsmethode für Schüttelversuche entwickelt und angewendet (s. Kap. 4.1.4 in LENK 2008).

**c) Prognose der Kippengrundwasserausbreitung im nördlichen Abstrombereich der Abraumkippen mit Hilfe von Stofftransport- und Reaktionsmodellierungen**

- Durchführung dreidimensionaler, nicht-reaktiver Stofftransportberechnungen zur Ermittlung der Hauptabstromgebiete von Kippengrundwasser, modelliert in Form der Sulfatausbreitung. Dabei erfolgte eine Berechnung der vom infiltrierenden Kippengrundwasser betroffenen Aquifere sowie eine Festlegung repräsentativer Stromröhren, entlang derer eindimensionale Stofftransport- und Reaktionsmodellierungen durchgeführt wurden. Die 3D-Transportberechnungen wurden mit dem Modell Rur-Scholle der bergbautreibenden Gesellschaft durchgeführt.
- Durchführung eindimensionaler Stofftransport- und Reaktionsmodellierungen zur Prognose der Kippengrundwasserausbreitung im unverritzten Gebirge unter besonderer Berücksichtigung der Pyritoxidationsprodukte  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Fe}^{2+/3+}$  und  $\text{H}^+$ .

Das unverritzte Gebirge, das sich nördlich an die Abraumkippen anschließt, ist sehr komplex aufgebaut und besteht aus bis zu 11 Grundwasserleitern, die durch Tonschichten oder Braunkohleflözen voneinander getrennt sind. Die zukünftigen Hauptabstromgebiete von Kippengrundwasser in diesem Gebirge wurden zunächst anhand der konservativen Sulfatausbreitung dreidimensional berechnet. Die prognostizierte Ausbreitung von Sulfat spiegelt somit auch die Effekte der transversalen Dispersion und seitlichen oder vertikalen Zumischung anders mineralisierter Grundwässer wieder, die mit einem 1D-Modell nicht erfasst werden können. Im Anschluss an die 3D-Modellierung wurde die Sulfatausbreitung zunächst mit dem 1D-Modell entlang von charakteristischen Stromröhren nachgebildet. Daran anschließend wurden die wichtigsten chemischen Reaktionen in das 1D-Modell implementiert. Auf diese Weise bildete das Sulfat, dessen nicht-reaktiver Transport im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen mit verschiedenen Methoden nachgewiesen werden konnte, die Schnittstelle zwischen dem 3D- und den 1D-Modellen. Diese Vorgehensweise ermöglichte damit eine Prognose der raum-zeitlichen Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit im Abstrom der Braunkohlenabraumkippen, ohne ein dreidimensionales Stofftransport- und Reaktionsmodell aufzubauen zu müssen.

### **Kurzdarstellung wichtiger Untersuchungsergebnisse**

Das gesamte Untersuchungsgebiet teilt sich auf in die Abraumkippen Zukunft/West (ältere, renaturierte Kippe) und Inden I sowie den Tagebau Inden II (aktiver Bergbau). Das in Teilbereichen bereits vorhandene Kippengrundwasser weist bei schwach sauren pH-Werten als Folge der Pyritoxidation mittlere Sulfatkonzentrationen von ca. 1.500 mg/l auf. Die im Mittel nur geringfügige Versauerung lässt die Wechselwirkung von Sedimentvolumina mit gespeicherter Acidität und gespeicherter Säureneutralisationskapazität erkennen und ist in erster Linie auf die karbonatische pH-Pufferkapazität der Braunkohlennebangesteine zurückzuführen. Die geogene Pufferkapazität der Sedimente reichte aus, um die durch Pyritoxidation freigesetzte eisenhaltige Schwefelsäure weitestgehend zu neutralisieren. Durch die Reaktion der Schwefelsäure mit im Abraum aufgespeicherten Karbonatmineralen wie Calciten und Dolomiten wurden die Kationen Calcium und Magnesium sowie  $\text{CO}_2$ -Spezies in die wässrige Phase mobilisiert. Während die Calciumkonzentrationen im Mittel bei 540 mg/l liegen, betragen die Magnesiumkonzentrationen ca. 88 mg/l. Die nur geringe Versauerung des Kippengewässers ist gemeinsam mit der hohen hydrogencarbonatischen pH-Pufferkapazität und den nur moderaten Eisenkonzentrationen um 100 mg/l primär dafür verantwortlich, dass auch die Wasserchemie des geplanten Restsees Inden II weitestgehend unproblematisch sein wird (neutrale pH-Werte bei niedrigen Eisen- und Spurenmetallkonzentrationen).

Die Auswertung der mit synthetischem Kippengewasser durchgeführten Säulenversuche sowie mit PHREEQC durchgeführte Sättigungsberechnungen konnten zeigen, dass die hydrogeochemische Entwicklung in den Versuchssäulen und damit im Abstrom der drei Abbaufelder durch die Reaktionen der Hauptkomponenten  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Fe}^{2+/3+}$  und  $\text{H}^+$  mit den Mineralphasen  $\text{CaCO}_3$  und  $\text{FeCO}_3$  sowie durch die Belegung von Kationenaustauschern ausreichend exakt beschrieben werden kann. Die aciditätsmindernde Bedeutung von Silikatverwitterungsprozessen ist im Vergleich zur Karbonatlösung demgegenüber sehr gering und kann vernachlässigt werden. So zeigten verschiedene Labor- und Felduntersuchungen übereinstimmend eine geringe silikatische pH-Pufferkapazität der Braunkohlennebangesteine, die nur in Ausnahmefällen mehr als 5 % der insgesamt freigesetzten Alkalinität (Karbonatlösung + Silikatverwitterung) lieferte. Die beschriebenen Zusammenhänge wurden auf das nördliche Abstromgebiet übertragen, um den Einfluss abströmender Kippengewässer auf die dortige Grundwasserbeschaffenheit zu simulieren.

Im Bereich des Abbaufeldes Inden wird stark pyrithaltiger Abraum seit 1995 selektiv im unteren Teil der Abraumkippen verstürzt, während im oberen Teil pyritarmer Abraum angeschüttet wird. Dieser geschichtete Kippenaufbau ist mit dem geologischen Aufbau des unverritzten Gebirges dafür verantwortlich, dass das Grundwasser der oberen Kippengebiete, welches in die Terrassensedimente infiltriert, nur geringfügig bis nicht belastet sein wird. Eine Gefährdung von Oberflächengewässern und Feuchtgebieten durch hochmineralisiertes Kippengrundwasser ist zukünftig nicht zu erwarten. An den Tagebaurändern wird mit Pyritoxidationsprodukten angereichertes Wasser in erster Linie in die tieferen Horizonte eingetragen. Da die in die Braunkohle eingelagerten Zwischenmittel wasserwirtschaftlich weniger bedeutsam sind und der Haupt-

abstrom von Kippenwasser in der Hauptkies-Serie (Horizont 8) erfolgen wird, beschränken sich die folgenden Ausführungen meist auf diese wasserwirtschaftlich wichtige Schicht. Die Modellierungen wurden bis in das Jahr 2300 ausgeweitet, da zu diesem Zeitpunkt aufgrund von Immobilisierungsprozessen bzw. Verdünnung bereits deutliche Konzentrationsverminderungen zu verzeichnen sein werden.

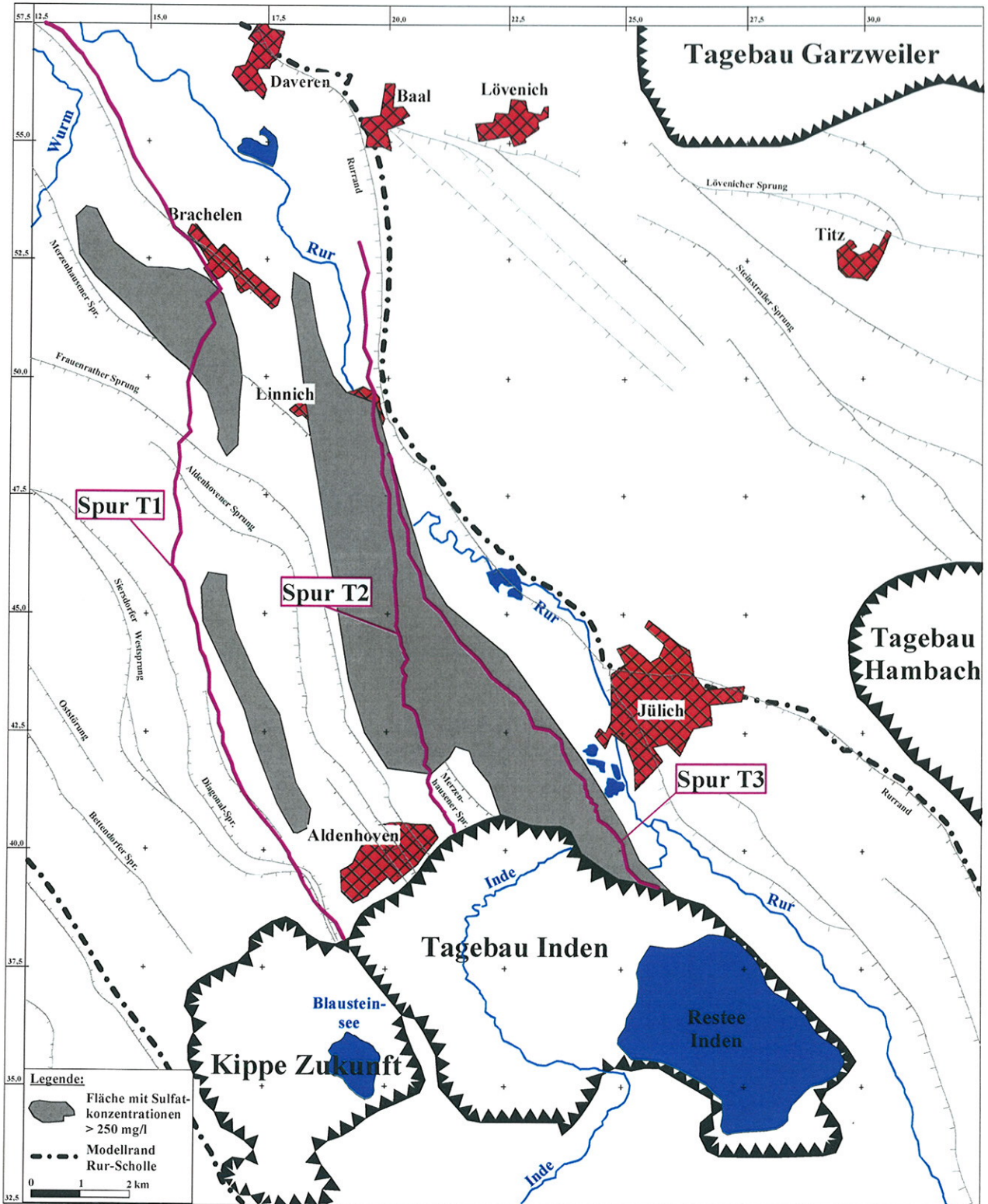


Abb. 1: Mit dem 3D-Modell der RWE Power AG simulierte, nicht-reaktive Sulfatausbreitung im Horizont 8 für das Jahr 2300 sowie Verlauf der Schnittpuren entlang derer die 1D-Stofftransport- und Reaktionsmodellierungen erfolgten



Nach Resultaten der Modellrechnungen werden einige Quadratkilometer des nördlichen Abstromgebietes über mehrere Jahrhunderte durch infiltrierendes Kippengrundwasser belastet. In der Hauptkies-Serie werden die mit Sulfat angereicherten Grundwässer die etwa 12 km vom Kippennordrand entfernt gelegene Ortschaft Brachelen nördlich von Linnich im Jahre 2300 erreichen (Abb. 1). Innerhalb der Belastungsschwerpunkte nordwestlich des Abbaufeldes Inden II wurden Sulfatkonzentrationen zwischen 250 und 1.500 mg/l berechnet, wobei die höchsten Konzentrationen bis knapp 2 km vom Kippennordrand zu erwarten sind. Die Modellrechnungen zeigen darüber hinaus, dass das Kippengrundwasser strömungsbedingt nicht in geschlossener Front in das gewachsene Gebirge einströmt. Vielmehr bilden sich „Belastungsfahnen“ aus, welche nordwestlich von Inden II im Jahre 2300 ca. 1 km bis 2 km breit sein werden. Somit sind im Grundwasserleiter 8 zu jedem Zeitpunkt Bereiche vorhanden, die nicht vom Kippenwasser durchströmt werden und der Wasserversorgung als Reservegebiete zur Verfügung stehen (Abb. 1). Diese wenig belasteten Bereiche verlagern sich aber mit der Zeit.

Während Sulfat im Abstrom weitgehend konservativ transportiert wird und eine Gipsfällung auch im Bereich maximaler Stoffumsetzungen nicht erfolgt, zeigen die anderen Pyritoxidaionsprodukte ein differenziertes Transportverhalten. Deren Transportverhalten wird neben rein physikalischen Prozessen durch Reaktionen mit der Festphase bestimmt. Von großer Bedeutung für die Ausbreitung der mit dem Kippengrundwasser eingetragenen Stoffe ist die calciumkarbonatische Pufferkapazität sowie die Kationenaustauschkapazität des Aquifermaterials. Solange Calcite und Dolomite im Sediment vorhanden sind, werden Eisen und andere Schwermetalle dem Grundwasser effektiv entzogen und an das Sediment fixiert sowie die schwach sauren pH-Werte des Kippengrundwassers weitgehend neutralisiert.

Auf das einströmende Sulfat hat die pH-Pufferkapazität der Sedimente hingegen keine Auswirkungen. Die Sulfatproblematik bleibt unverändert erhalten, wobei die Sulfatkonzentration auf dem Fließweg nur durch Advektion und hydrodynamische Dispersion vermindert wird.

Als Kriterium für einen quantitativen Vergleich der räumlich-zeitlichen Beschaffenheitsentwicklung im Abstrom wurde ein „Einflussbereich“ des Kippengrundwassers mit einer Sulfatkonzentration im Jahre 2300 von über 250 mg/l definiert (Einflussbereich  $C_{\text{Sulfat}} > 250 \text{ mg/l}$ ). Hervorgerufen durch unterschiedliche pH-Pufferkapazitäten der Aquifersedimente sowie durch strömungsbedingte Vermischungsvorgänge unterscheidet sich die prognostizierte Grundwasserbelastung im Abstrom der drei Abraumkippen in Konzentration und räumlicher Ausdehnung voneinander. In der Tabelle 1 sind charakteristische Konzentrationsspannweiten der relevanten Wasserinhaltsstoffe innerhalb des Einflussbereiches  $C_{\text{Sulfat}} > 250 \text{ mg/l}$  zusammengefasst.

Tab. 1: Charakteristische Spannweiten der modellierten Konzentrationen wichtiger Wasserinhaltsstoffe im Einflussbereich  $C_{\text{Sulfat}} > 250 \text{ mg/l}$  sowie Längen der durch das einströmende Kippengrundwasser entkalkten Zonen im Abstrom der Abraumkippen für das Jahr 2300 (Modellrechnungen mit einem Calcit-Siderit-Verhältnis von 50 : 50)

|   | Zukunft/West                           | Inden I   | Inden II    |
|---|--|-----------|-------------|
| Länge der entkalkten Zone [m]   | < 300                                  | 1.800     | 1.400       |
| Einflussbereich $C_{\text{Sulfat}} > 250 \text{ mg/l}$ des infiltrierenden Kippengrundwassers |  |           |             |
| Länge Einflussbereich $C_{\text{Sulfat}} > 250 \text{ mg/l}$ [m]                              | 0                                      | 10.000    | 7.500       |
| pH-Wert [-]   | kein Einflussbereich                   | 6,9 – 7,0 | 6,2 – 7,0   |
| $\text{SO}_4^{2-}$ [mg/l]   | $C_{\text{Sulfat}} > 250 \text{ mg/l}$ | 250 – 450 | 250 – 1.500 |
| $\text{Ca}^{2+}$ [mg/l]   |  | 160 – 250 | 170 – 650   |
| $\text{Fe}^{2+}$ [mg/l]   |  | 10 – 15   | 10 – 107    |
| $\text{CO}_2_{\text{gesamt}}$ [mg/l]  |  | 300 – 360 | 310 – 670   |

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass im Abstrom von Zukunft/West im Jahre 2300 Sulfatkonzentrationen von 250 mg/l strömungsbedingt nicht überschritten werden. Die Sulfatkonzentrationen werden durch niedrige Eisenkonzentrationen unter 10 mg/l bei neutralen pH-Werten begleitet. Eine Gefährdung des Grundwas-

sers durch einströmendes Kippengrundwasser ist nördlich von Zukunft/West demzufolge nicht gegeben. Die Hauptbelastung des Grundwassers wird nördlich des Abbaufeldes Inden II erwartet. In diesem Bereich wurde entlang der Schnittspur T 3 ein Stoffaustrag prognostiziert, der bis zum Jahre 2300 unvermindert anhält (Abb. 1 u. Tab. 1).

Der Einflussbereich  $C_{\text{Sulfat}} > 250 \text{ mg/l}$  lässt sich nördlich des Abbaufeldes Inden I bis etwa 10.000 m Entfernung vom Kippennordrand verfolgen (Tab. 1). In diesem Bereich wird das Grundwasser mit erhöhten Sulfatkonzentrationen bis maximal 450 mg/l belastet sein. Verglichen mit der räumlich-zeitlichen Ausbreitung des Sulfates erfolgt der Anstieg der Eisenkonzentration auf einem deutlich erniedrigten Konzentrationsniveau, wobei Konzentrationen von 15 mg/l in der Regel nicht überschritten werden. Liegt das mittlere molare Konzentrationsverhältnis von Sulfat zu Eisen im Kippengrundwasser noch bei ca. 8 : 1, so steigt dieser Wert im „Einflussbereich  $C_{\text{Sulfat}} > 250 \text{ mg/l}$ “ auf Werte um 17 : 1 an, was eine Fixierung des eingetragenen Eisens an die Aquifersedimente belegt. Die Modellrechnungen zeigen, dass die Eisenretardation primär durch Sideritbildung erfolgt. Darüber hinaus wird der Durchbruch des Eisens durch Kationenaustauschprozesse vermindert.

Die in das Gebirge eingetragene Schwefelsäure verursacht im Nahbereich der Kippe mit der Zeit eine Entkalkung der Aquifere. Innerhalb dieser Zone erfolgt eine Retardation von Pyritoxidationsprodukten praktisch nicht mehr. Nördlich von Inden I ist bis zum Jahre 2300 damit zu rechnen, dass in einer ca. 1.800 m breiten Zone Calciumkarbonat vollständig gelöst oder in Siderit umgewandelt sein wird.

Wie im Abstrom des Abbaufeldes Inden I erfolgt der Sulfattransport im Abstrom von Inden II ebenfalls konservativ. Eine sedimentgebundene Zwischenspeicherung von Sulfat durch Gipsbildung erfolgt selbst im Bereich der Reaktionsfront bei maximalen Calcium- und Sulfatkonzentrationen nicht. Bis etwa 1.600 m Entfernung vom Kippennordrand ist mit Sulfatkonzentrationen bis zu 1.500 mg/l zu rechnen. Danach halbiert sich die Sulfatbelastung innerhalb einer Fließstrecke von ca. 2.000 m relativ schnell, was allein auf strömungsbedingte Verdünnungsprozesse und nicht auf eine Gipsfällung oder Sulfatreduktion zurückzuführen ist. Die starke laterale Zumischung geringer mineralisierter Grundwässer nördlich von Inden II führt dazu, dass der Einflussbereich  $C_{\text{Sulfat}} > 250 \text{ mg/l}$  trotz des anfänglich hohen Konzentrationsniveaus auf einen Bereich bis ca. 7.500 m nördlich des Kippenrandes beschränkt bleiben wird.

Die vergleichsweise hohe calciumkarbonatische pH-Pufferkapazität des Horizontes 8 nördlich von Inden II wirkt einer Ausbreitung des eisenhaltigen Kippengrundwassers entgegen, so dass sich die entkalkte Zone, in der eine Retardation von Pyritoxidationsprodukten praktisch nicht mehr erfolgt, nur langsam ausdehnen kann und bis zum Jahre 2300 auf einen Raum bis maximal 1.400 m Entfernung vom Kippennordrand beschränkt bleiben sollte. Die Pyritoxidationsprodukte können diese Zone nahezu ungehindert passieren, so dass innerhalb einer mindestens 1.400 m breiten Zone eine Chemie des Grundwassers zu erwarten ist, die etwa der mittleren Zusammensetzung des Kippengrundwassers entspricht. In diesem Bereich ist mit schwach sauren pH-Werten um pH 6,2 und Eisenkonzentrationen von ca. 100 mg/l zu rechnen. Jenseits der entkalkten Zone steigen die pH-Werte durch Calcitlösung sprunghaft an. Bereits in 1.500 m Entfernung vom Kippennordrand wurden pH-Werte um 6,5 modelliert, während auf dem weiteren Fließweg zunehmend neutrale pH-Werte zu erwarten sind. Die Anhebung des pH-Wertes ist mit einer deutlichen Verringerung der Eisenkonzentrationen verbunden, die nach einem Fließweg von 1.500 m bereits 40 mg/l unterschreiten.

Zusammenfassend zeigten die durchgeführten Untersuchungen, dass der Wasserinhaltsstoff Sulfat im Laufe des 21. Jahrhunderts zu einem der Hauptprobleme der Wasserversorgung am Niederrhein werden wird. Im Sinne der Nachhaltigkeit sollte deshalb eine weitere Intensivierung der Kooperation zwischen Land- und Wasserwirtschaft vordringliches Ziel des Gewässerschutzes sein, um die Nitrateinträge in das oberste Grundwasserstockwerk, das weitgehend unbeeinflusst vom Kippengrundwasser bleiben wird, weiter zu vermindern. Damit würden der Wasserversorgung weiträumig oberflächennahe Grundwasserressourcen zur Verfügung stehen, wenn die Sulfatkonzentrationen in tieferen Stockwerken ansteigen.

### **Literatur**

LENK, S., WISOTZKY, F. (2006): Messungen und Methoden zur Beurteilung von Minderungsmaßnahmen der Kippenwasserversauerung in Abraumkippen des Tagebaues Garzweiler.- Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 43, S. 74

WISOTZKY, F., LENK, S. (2006): Darstellung und Evaluierung der Minderungsmaßnahmen zur Kippenwasserversauerung im Tagebau Garzweiler der RWE Power AG (Rheinisches Braunkohlenrevier, Germany).- In: MERKEL, B., SCHAEUBEN, H., WOLKERSDORFER, CH., HASCHBERGER, A. [Hrsg.]: Behandlungstechnologie für bergbaubeeinflusste Wässer. GIS – Geowissenschaftliche Anwendungen und Entwicklungen. Wissenschaftliche Mitteilungen Institut für Geologie, 31, 133-138

WISOTZKY, F., LENK, S. (2007): Grundwasserchemie und hydrogeochemische Reaktionen in den Braunkohlenabraumkippen des Tagebaues Inden.- In: MERKEL, B., WOLKERSDORFER, CH., HASCHBERGER, A. [Hrsg.]: Behandlungstechnologie für bergbaubeeinflusste Wässer. Wissenschaftliche Mitteilungen Institut für Geologie, 35, 107-116

LENK, S., WISOTZKY, F. (2008a): Chemische Beschaffenheit und modellierte Genese von Grundwässern in Braunkohlenabraumkippen des Tagebaues Inden.- Grundwasser, 12, Heft 4, S. 301 - 313

LENK, S., WISOTZKY, F. (2008b): Bewertung von Minderungsmaßnahmen zur Grundwasserversauerung im rheinischen Tagebau Garzweiler.- Vom Wasser, 106, Heft 2, S. 16 - 22

LENK, S. (2008): Grundwasserbeschaffenheit und hydrogeochemische Prozesse in rheinischen Braunkohlenabraumkippen und in deren Abstrom.- Bochumer Geowissenschaftliche Arbeiten, Heft 13, 133 S.