



BTU



Der Lehrstuhl Wassertechnik gehört zur Fakultät Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus. Die Mitarbeiter wirken im Lehr- und Forschungskomplex "Wasser" eng mit den Lehrstühlen Hydrologie und Wasserwirtschaft, Abwassertechnik sowie Gewässerschutz zusammen. Im Rahmen verschiedener wissenschaftlicher Projekte zur Sanierung des Lausitzer Wasserhaushaltes wurden neue methodische Ansätze zur Aufklärung der in Braunkohlenbergbaukippen ablaufenden grundwasserbeschaffenheitsbildenden Prozesse entwickelt.

Kippenchemismus

Genesemodell des Kippengrundwassers

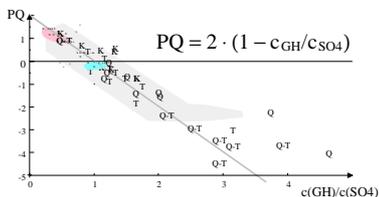
Das Entstehen des Neutralisationspotential in Kippengrundwässern wird hauptsächlich auf drei, in beiden Richtungen ablaufende Reaktionsgruppen, reduziert (BTUC 1999):

- Pyritverwitterung/Sulfatreduktion **Py**
- Calcium/Magnesium-Pufferung **Pu**
- Gipslösung/-fällung **Gips**

Der Konzentrationsvektor des Grundwassers, bestehend aus den Komponenten *Neutralisationspotential (NP)*, *Erdalkalikonzentration* und der *Sulfatkonzentration (c_{SO4})* setzt sich aus Beiträgen dieser Grundreaktionen und dem Vektor des Ausgangswassers (NP₀, c_{GH0}, c_{SO40}) zusammen:

$$\begin{pmatrix} NP \\ c_{Ca} \\ c_{SO_4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} Py \\ Pu \\ Gips \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} NP_0 \\ c_{Ca0} \\ c_{SO_40} \end{pmatrix}$$

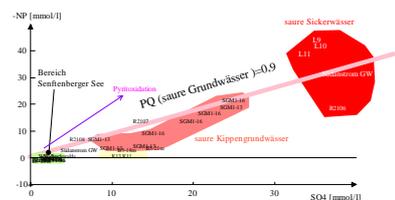
Wird das Grundwasser aus ionenarmem Wasser oder Niederschlag gebildet, ergibt sich aus dem Gleichungssystem ein einfacher Zusammenhang zwischen dem Pufferungsquotienten, der Gesamthärte und der Sulfatkonzentration, der in den Grundwässern der Kippen Schlabendorf/Seese wiedergefunden werden konnte (BTUC 1999).



Es wurden dabei Grundwässer aus Randriegeln (Q=Quartär, T=Tertiär, Q-T=durchgehend verfiltert) betrachtet, die bis über 8 mmol/L hydrogencarbonatpuffert waren und deren kippenbürtige Herkunft das Genesemodell erklärt.

Charakterisierung der Säurefracht von fließenden Grundwässern

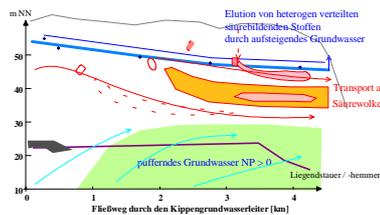
Die im Anstrom des Senftenberger Sees untersuchten sauren Grundwässer ließen sich nicht durch das postulierte Genesemodell erklären.



Aus der Darstellung $-NP(c_{SO_4})$ ist die Pufferung der anstömenden Grundwässer (PQ) zu erkennen (DGFZ/BTUC 1999).

Erklärung charakteristischer Beschaffenheitsmuster im Kippengrundwasser

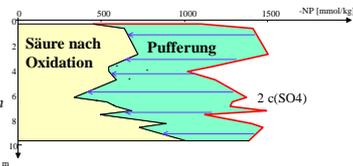
Die in der Kippe Schlabendorf dem Tagebausee zufließende Säure konzentriert sich auf die oberen 10 m des Kippengrundwassers und der Übergang zum tieferen Grundwasser verläuft kontinuierlich (HÜTTL et al. 1999). Es konnte der Durchzug von sauren Grundwasserkörpern, den **Säurewolken**, mit stark negativem Neutralisationspotential beobachtet werden (BTUC 1999).



Während des Grundwasserwiederanstieges werden mit sauren Pyritverwitterungsprodukten angereicherte Schichten durch aufsteigendes Grundwasser, zusammen mit den jeweils lokalen Grundwasserneubildungen eluiert. Die potentielle Säure (NP < 0) wird mit dem Grundwasserstrom in Richtung Tagebausee transportiert. Gleichzeitig strömt aus dem tieferen Grundwasserleiter leicht gespanntes, hydrogencarbonatpuffertes Wasser ein und bildet dadurch den beobachteten Beschaffenheitsgradienten.

Puffervermögen von GWL-Feststoffen

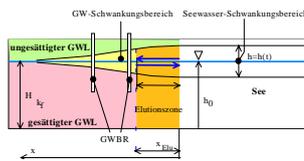
Durch Wasserstoffperoxid oxidiertes Pyrit setzt genau soviel Säure frei wie bei natürlicher Verwitterung. Vergleicht man die im Oxidationstest entstandene Säure (-NP) mit dem über den Schwefelgehalt berechneten theoretischen Wert, entspricht die Differenz dem natürlichen Puffervermögen der Probe.



Die Abbildung zeigt das Tiefenprofil der Säurebildung und des Puffervermögens eines Hangendschluffes. Bis zur Verwitterung etwa der Hälfte des Pyrits wird noch keine Säure abgegeben.

Einfluß der Speicherbewirtschaftung von Seen auf deren umliegenden Grundwasserleiter

Periodisch schwankende Wasserstände im Tagebausee eluieren einen Bereich des ufernahen Grundwasserleiters.



Aus Wasserstandsschwankungen von GWBR und Senftenberger See ließ sich der Einfluß dieser **Elutionszonen** abschätzen (S 1999, DGFZ/BTUC 1999).

Prozesse im GWL

Stoffübergangskinetik

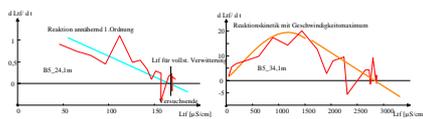
Bei einer transportkontrollierten Lösung bestimmt die **Diffusion durch einen Grenzfilm** zwischen der Feststoffoberfläche und der Konzentration in der freien Lösung den Stoffstrom und läßt sich über hydraulische **Ähnlichkeitsbeziehungen** abschätzen. Aus Gipslösungsversuchen in der Fluidzirkulationsanlage ermittelte Preuß (1999) für die den Stoffübergang charakterisierende Sherwood-Zahl (Sh) folgende Abhängigkeit von der Reynoldszahl (Re) im Strömungsbereich der Grundwässer:

$$Sh = 20,08 \cdot Re^{0,68}$$

Die Lösung von Gips aus Kippensand kann als transportkontrollierte Reaktion beschrieben werden.

Pyritverwitterung

Die Beobachtung der Pyritverwitterung im Batch-Ansatz über die elektrische Leitfähigkeit ergibt bereits Hinweise auf deren Kinetik.



Unter konstantem Sauerstoffpartialdruck konnte vielfach eine pseudoerste Reaktionsordnung beobachtet werden.

$$\frac{dc_{FeS_2}}{dt} = -k \cdot c_{FeS_2}$$

Die Geschwindigkeitskonstanten k schwankten zwischen 0,007 und 0,02 d⁻¹, und lagen im Mittel etwa um 0,01 d⁻¹ (DGFZ/BTUC 1999).

Beschreibung komplexer Phasengleichgewichte

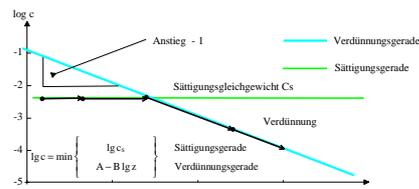
Die Wechselwirkung von festen Reaktionsprodukten der Pyritverwitterung im Kippensand mit dem Sicker- und Grundwasser wurden unter dem Begriff **komplexes Phasengleichgewicht** zusammengefaßt. Lägen nur Löslichkeitsgleichgewichte vor, wäre der Gehalt wasserlöslicher Stoffe über die Elution nach DIN 38 414-S4 aus der Massenbilanz bei Lösungsmittelüberschuß berechenbar.

$$w \cdot m_{Py} = c \cdot V$$

wobei:

- m_{Py} = Masse der eingesetzten Feststoffprobe [kg]
- V = Volumen Elutionsmittel (Wasser) [l]
- z = $\frac{V_{Py}}{m_{Py}}$ Phasenverhältnis [l/kg]
- w = Gehalt wasserlöslicher Stoffe [$\frac{mmol}{kg}$]
- c = Konzentration im Eluat [$\frac{mmol}{l}$]
- c_s = Sättigungskonzentration [$\frac{mmol}{l}$]
- q = Feststoffbeladung mit einem Stoff [$\frac{mmol}{kg}$]

Daraus leitet sich der Einfluß des Phasenverhältnisses bei Lösungsmittelüberschuß her.



In vielen mit unterschiedlichen Phasenverhältnissen z durchgeführten Batch-Versuchen konnte der dargestellte Zusammenhang bestätigt werden, nur der Anstieg der Verdünnungsgeraden wich meistens von -1 ab, so daß die als **empirisches Gleichgewichtsmodell** bezeichnete den allgemeinen Zusammenhang zwischen Gleichgewichtskonzentration und Phasenverhältnis beschreibt. Durch Überlagerung von Lösungs- und Sorptionsgleichgewichten entspricht die Angabe wasserlöslicher Stoffe einer Beladungsgröße. Das empirische Gleichgewichtsmodell erhält dadurch die Form einer Freundlich-Isothermengleichung:

$$q = q_0 - K(c)^n \quad \text{mit} \quad \begin{matrix} K = \rho_s \cdot (10)^{0,44} \\ n = (1 - \frac{1}{B}) \end{matrix}$$

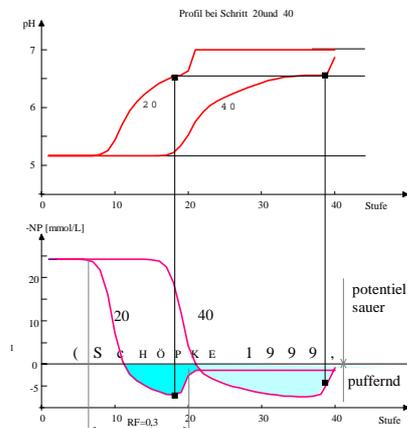
Diese formale Abhängigkeit läßt sich auch durch **geochemische Adsorptionsreaktionen** mit **PHREEQC** (PARKHURST 1995) unter Verwendung von Versuchsergebnissen mit dem empirischen Phasengleichgewichtsmodell gelang S CHÖPKE (1999) die Kalibrierung eines **Kippensandmodells**, das in DGFZ/BTUC (1999) auch auf die Sulfatadsorption an pleistozänen Sanden erweitert werden konnte.

```
# Calcium
Sand_w0H + Ca2 = Sand_w0HCa2
log_k 7 #start log_k -5.85 im Basisdatensatz

# Sulfat
Sand_w0H + SO4-2 + H+ = Sand_w0HSO4- + H2O
log_k 5 #start von log_k 7.78 im Basisdatensatz
Sand_w0H + SO4-2 = Sand_w0HSO4-2
log_k -2#start log_k 0.79 im Basisdatensatz
```

Modellierung der Grundwasserbeschaffenheit

Die für einzelne Prozesse ermittelten Parameter können in Modellen des Grundwasserleiter/Grundwasser-Systems zusammengefaßt und für orientierende Berechnungen eingesetzt werden. Nachstehende Diagramme zeigen Beschaffenheitsprofile durch einen pleistozänen Grundwasserleiter (Rührstufenkaskade aus 40 Zellen) in den sauren Kippengrundwasser einströmt (DGFZ/BTUC 1999).



Die Profile des pH-Wertes und des negativen Neutralisationspotentials sind für jeweils 20 und 40 Austauschschritte eingezeichnet. Die dabei auftretenden gut hydrogencarbonatpufferten Grundwässer wurden im Umfeld der Kippe Seese nachgewiesen und auch durch das postulierte Genesemodell erklärt. Diese Modellierungen enthält DGFZ/BTUC (1999).