

Brandenburg. geowiss. Beitr.	Kleinmachnow	14 (2007), 1	S. 75-86	9 Abb., 22 Lit.
------------------------------	--------------	--------------	----------	-----------------

Hydrogeologie der „Vier bunten Seen“ im Muskauer Faltenbogen

Hydrogeology of the „Four Coloured Lakes“

UTE BARON

1. Einleitung

Die „Vier bunten Seen“ sind Braunkohlentagebau-Restgewässer der Grube „Elster bei Horlitz“ im SE von Brandenburg. Sie liegen ca. 8 km NW von Bad Muskau entfernt, zwischen den Ortschaften Horlitz und Groß Düben im Muskauer Faltenbogen (Abb. 1). Der Faltenbogen ist eine bedeutende Stauchendmoräne, auf deren glazialtektonischen Schuppen-, Falten- und Diapirstrukturen (KUPETZ, A. et al. 2004, KUPETZ, M. 1997) zwischen 1843 und 1973 ein intensiver Braunkohlenbergbau im Tief- und Tagebaubetrieb umgegangen ist (SCHOSSIG & KULKE 2006). Heute stellt der Muskauer Faltenbogen eine gewässerreiche Altbergbaulandschaft dar. Die Anzahl stehender Gewässer

im gesamten Faltenbogen beläuft sich schätzungsweise auf 300 bis 400, von denen 80 - 90 % bergbaulichen Ursprungs sind (Tagebaurestlöcher und wassergefüllte Bruchgebiete über Tiefbau). Auf seinem westlichen Bogen gibt es mehr als 120 stehende Gewässer, meist Kleingewässer (HEYM 1995). In den Urmesstischblättern von Döbern (HARTMANN 1845) und Weißwasser (HARTMANN 1823) waren in diesem Gebiet ca. 50 stehende Gewässer verzeichnet. Davon waren etwa 15 natürliche Seen. Die restlichen waren künstlich angestaute Teiche. Bei geologischen Untersuchungsarbeiten im Rahmen des Geoparks Muskauer Faltenbogen wurde beobachtet, dass es z. T. große Unterschiede bei der Wasserfärbung gibt, obwohl die Entstehungsgeschichte und die

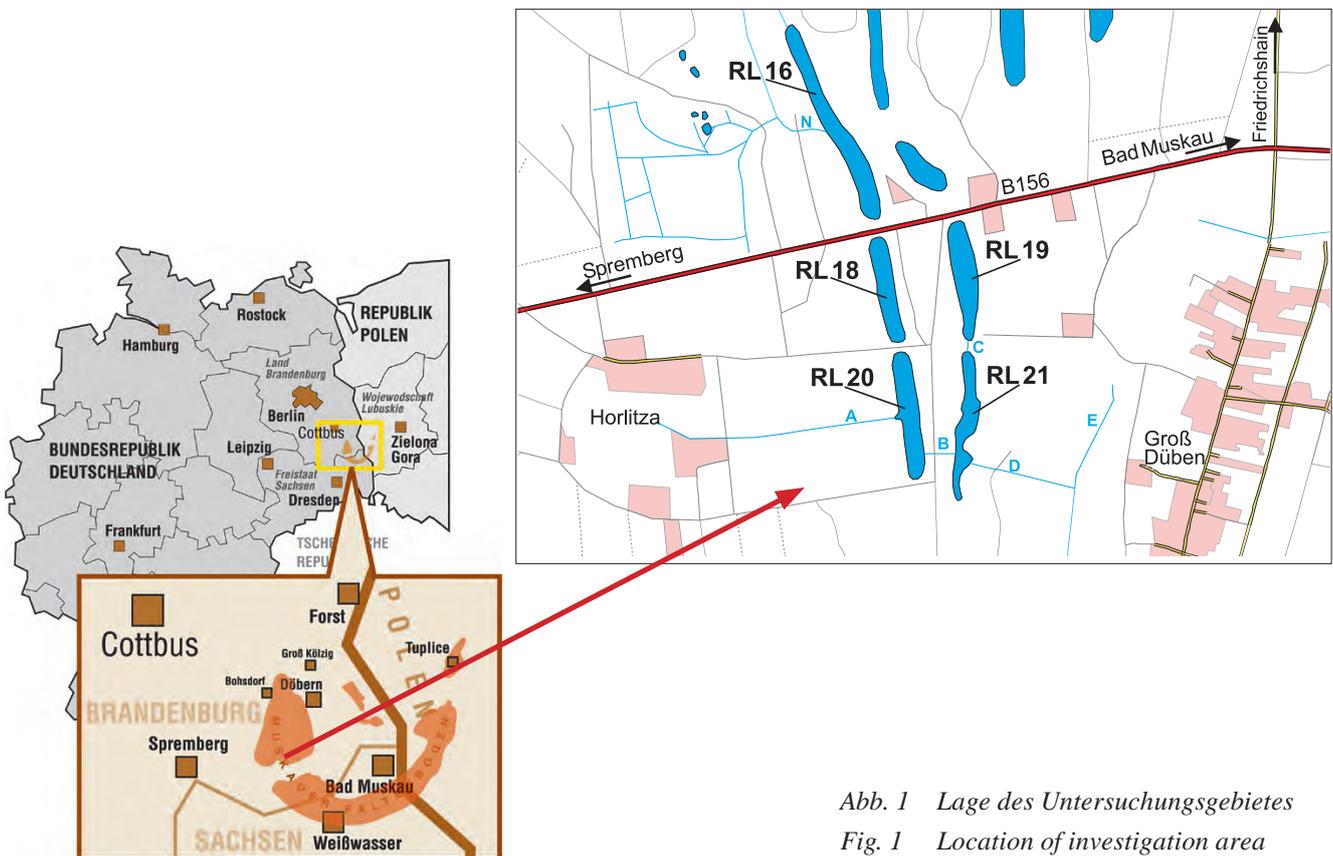


Abb. 1 Lage des Untersuchungsgebietes
Fig. 1 Location of investigation area

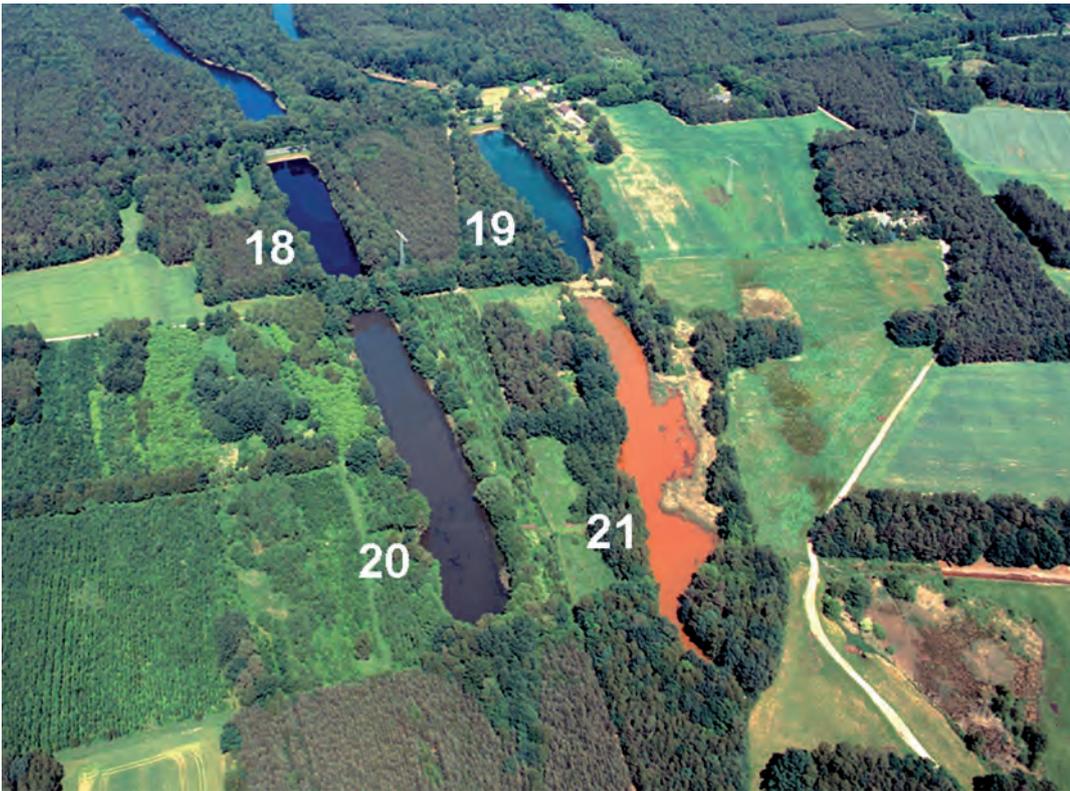


Abb. 2

Die „Vier bunten Seen“ sind Tagebaurestlöcher der Grube „Elster bei Horlitz“ zwischen Lieskau und Wolfshain im Muskauer Faltenbogen (Blickrichtung von Süden nach Norden). Die Wasserfärbung ist natürlichen Ursprungs und nicht durch anthropogene Verschmutzung bedingt (Foto: P. RADKE)

Fig. 2

The „Vier bunten Seen“ are rest lakes of the historical lignite mine „Elster bei Horlitz“ between the villages Lieskau and Wolfshain within the Muskauer Faltenbogen (Muskau Arch structure; view from south to north). The water colour is of natural origin and not a man made-contamination (photo: P. RADKE)

geologischen Bedingungen gleich sind. Augenfällig sind z. B. rostbraune Seen, die in größerer Anzahl auftreten. Mehrere Beispiele dafür publizierten JANOWSCY, E. & R. JANOWSCY (2005) als Luftaufnahmen aus dem polnischen Teil des Muskauer Faltenbogens.

Ein besonders plastisches Beispiel für die unterschiedlichen Wasserfärbungen sind die „Vier bunten Seen“ bei Horlitz (Abb. 2). Ihr Farbspektrum reicht von „schwarz“, „braun“, „rostbraun“ bis „türkis“. Sie wurden exemplarisch für die Untersuchung dieses Phänomens im Rahmen einer Diplomarbeit am Lehrstuhl Umweltgeologie der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus ausgewählt (BARON 2006). Im Mittelpunkt standen hydrogeologische Arbeiten und Interpretationen. Untersuchungen zur Mikrofauna und -flora waren hingegen nicht Gegenstand der Diplomarbeit.

2. Die Entstehung der „Vier bunten Seen“

Die „Vier bunten Seen“ sind wassergefüllte Tagebaurestseen der Grube „Elster bei Horlitz“ (1899 – 1909). Abge-

baut wurde hier die Braunkohle der Welzower Schichten (2. Miozäner Flözhorizont, 10 - 12 m mächtig), die in Form großer glazialtektonischer Schuppen aufgestaucht wurde. Die Bergleute bezeichneten die Schuppenstrukturen als „Mulden“ und nummerierten sie mit römischen Zahlen durch (Abb. 4 und 5). Gegenstand des Bergbaus waren die Kohlevorkommen der Mulden IV und V. Abgebaut wurde das Flöz bis zu einer Tiefe von etwa 12 m zunächst im Tagebau und anschließend dem Einfallen des Flözes nach Westen folgend in vier bis sechs Tiefbausohlen (2. bis 5. Sohle bzw. 2. bis 7. Sohle) bis in eine Tiefe von 26 bzw. 30 m unter Geländeoberkante (KÖHLER & SCHOSS 2006). In der nachbergbaulichen Phase bildeten sich durch das natürlich aufgehende Grundwasser Restseen in den Tagebauen. Sie unterliegen bis heute einem ungestörten Renaturierungsprozess. Das heißt, es wurden keine Maßnahmen zur Veränderung der sich selbständig einstellenden Wasserqualität ergriffen. Die Bundesstraße 156 teilt die Mulden der Grube „Elster“ in einen nördlichen und südlichen Teil (sie verläuft in Abbildung 2 zwischen den Restlöchern (RL) 16 und 18 in WSW-ENE-Richtung). Der südliche Teil wurde mit Kip-

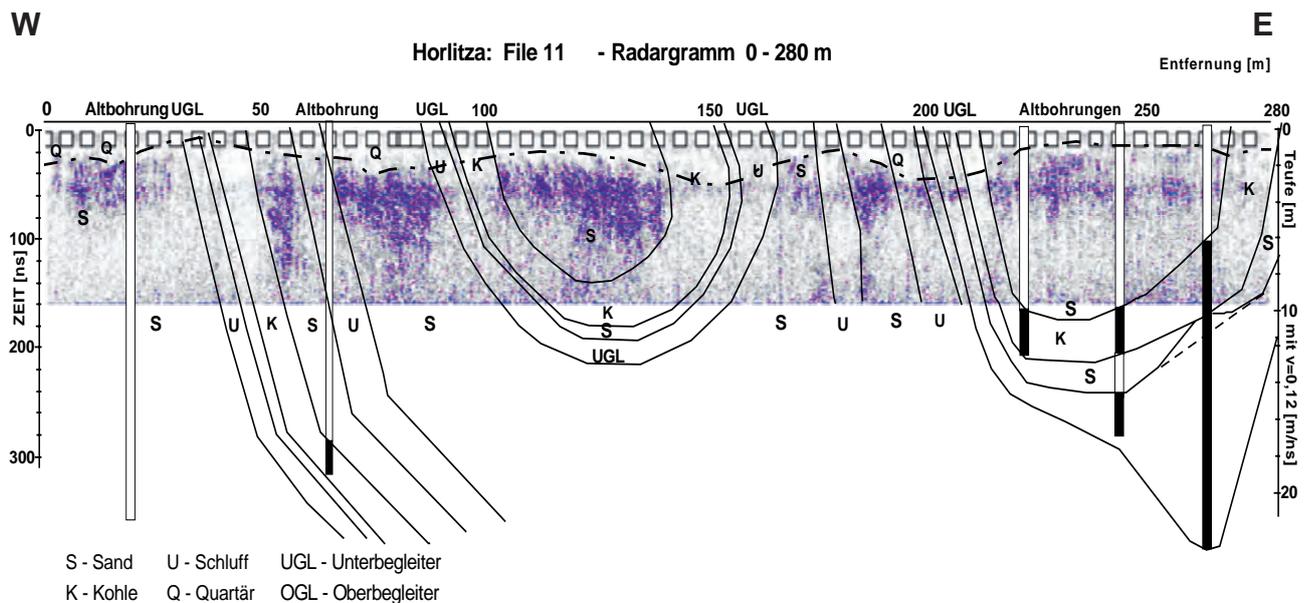


Abb. 3

Radargramm aus dem südwestlichen Teil des Untersuchungsgebietes. Verlauf senkrecht zum Generalstreichen der glaziotektonischen Strukturen

Fig. 3

Radargram from the southwest part of the investigation area, directed perpendicularly to the general striking of glacio-tectonic structures

pfung eines Dammes in die heutigen vier Restlöcher unterteilt, die die Nummerierungen 1218, 1219, 1220 und 1221 erhielten (KÖHLER & SCHOSS 1995). Im Text und den Abbildungen dieses Beitrags werden die Restlöcher jeweils nur mit den letzten beiden Ziffern der vierstelligen Nummern bezeichnet, also 18, 19, 20 und 21. Alle vier Seen haben, bedingt durch das Einfallen des Flözes und dieselbe Abbau-methode, ähnliche Seemorphologien. „Die Westufer sind gewachsene Böschungen, deren Oberkante der ehemaligen Abraumkante entspricht. Die Ostufer zeigen dieses klare Bild nicht, weil sie durch teilweise mehrsöhligen Abbau unterschiedlich beansprucht wurden. Die Nord- und Südufer werden durch Auskohlungs-grenzen, Sicherheitspfeiler und Aufschüttungen gebildet“ (KÖHLER & SCHOSS 1995).

3. Geologie

Als Grundlage für die hydrogeologische Modellvorstellung wurde zunächst ein geologisches Modell im Gebiet der Grube „Elster“ erstellt. Als Datenbasis diente dabei das geologische Normalprofil und das glazitektonische Bauprinzip im Muskauer Faltenbogen (KUPETZ 1997), die Bergbauerkundungsbohrungen aus den Jahren 1898, 1899, 1901 und 1907 sowie die Bohrdaten der Grundwassermessstellen. Die verwendeten Modellprogramme waren GeODin3.3 und ArcView3.2a. Ergänzend dazu wurden drei Profile, je 500 Meter oberflächengeophysikalisch mit Georadar vermessen und interpretiert. Eingesetzt wurde hierzu die tragbare Georadarmessapparatur SIR 2000 der Fa. GSSI (USA) mit einer Eindringtiefe von ca. 8 m (PETZOLD et al. 2005). Abbildung 3 zeigt ein typisches Radargramm aus dem Un-

tersuchungsgebiet. Weiße, helle Flächen zeigen reflexionsleere Gebiete an und weisen auf bindiges Lockergestein oder Kohle hin. Die dunkleren, gefleckten Gebiete stellen Reflexionen dar, wie sie in diesem Fall für Sand charakteristisch sind.

Die Oberflächenmorphologie wurde mit Hilfe eines hochauflösenden digitalen Geländemodells (Laser Scanning Verfahren, Digital Terrain Model) im Detail ausgewertet. Interpretiert wurde hierzu ein Ausschnitt des so genannten Testgebiets Döbern (STACKEBRANDT 2003). Das DTM hat eine Lagegenauigkeit von $\pm 0,5$ m und eine Höhengenaugigkeit von $\pm 0,15$ m. Es ermöglichte eine sehr genaue Verfolgung des Ausstreichens des Braunkohlenflözes unterhalb der geringmächtigen Quartärbedeckung (s. KUPETZ 2003). Anhand der vorgestellten Methoden und Datenbasis wurden die geologischen Verhältnisse in einem Blockbild zusammenfassend dargestellt (Abb. 4).

Bis etwa 5 m unter Geländeoberkante befinden sich quartäre Ablagerungen (glazifluviatile Sande, vermutlich warthezeitlich). Es folgen die tertiären Schichten mit Mächtigkeiten entsprechend des Normalprofils. Die Schicht- und Formationsbezeichnungen in Abbildung 4 folgen der Tabelle der Deutschen Stratigraphischen Kommission (2002; für einen Vergleich mit den vormalig verwendeten stratigraphischen Namen siehe STANDKE 2006). Die Greifenhain-Schichten sind durch schluffige, kohlige Feinsande charakterisiert. Sie werden von den Welzow-Schichten (2. Miozäne Flözhorizont) mit einer Mächtigkeit von 10 - 12 m unterlagert. Im Liegenden folgen die Drebkau- und Buchenhain-

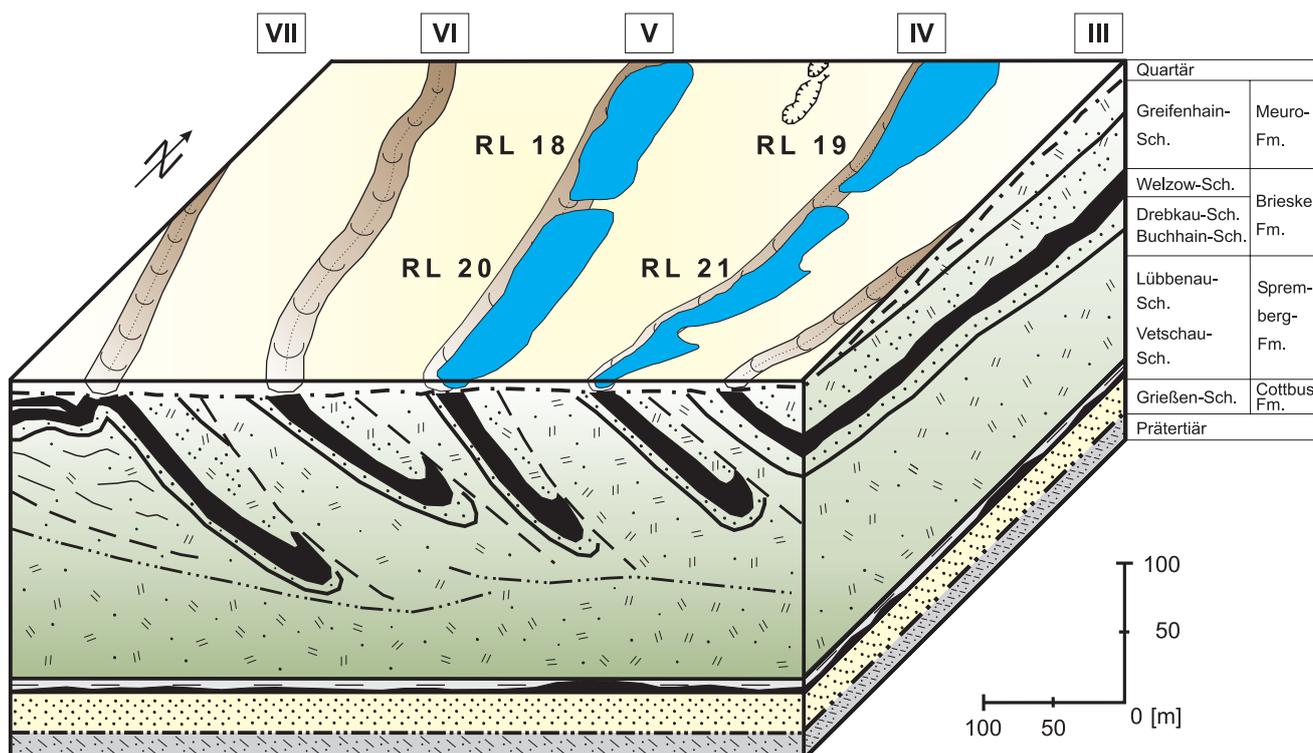


Abb. 4

Geologisches Blockbild des Gebietes der „Vier bunten Seen“. Es liegen glazitektonische Großschuppen vor. Das Braunkohlenflöz innerhalb der Schuppen der alten Bergleute auch als „Mulde“ bezeichnet und in der Grube „Elster“ mit römischen Zahlen durchnummeriert.

Fig. 4

Geological block diagram of the area of the „Vier bunten Seen“. There are existing large scale glazitektonic rafts. The lignite seam within the rafts was called „Mulde“ („syncline“) and within the mine „Elster“ designed with Latin numbers.

Schichten. Ein lithologisch leicht erkennbarer Horizont in den Drebkau-Schichten ist der sog. Unterbegleiter des 2. Miozänen Flözhorizontes. Nicht durch eine erkennbare Schichtgrenze getrennt schließen sich im Liegenden die Lübbenau- und Vetschau-Schichten, bestehend aus Ton, Schluff und Feinsand sowie dem 4. Miozänen Flözhorizont an der Basis der Vetschau-Schichten an. In einer Tiefe von ca. 170 m befindet sich die Basis der glazitektonischen Deformation, hier im Bild als Strich-Dreipunkt-Linie gekennzeichnet. Darunter folgen die Grießen-Schichten mit einem oberen Abschnitt aus relativ reinen Sanden und einem unteren Abschnitt aus Schluffen. Die Tiefenlage der Tertiärbasis wurde aus KUPETZ et al. (1988) übernommen. Es ist ein stark verebnetes Relief im Niveau von ca. -90 m NN, d. h. etwa 225 - 230 m unter Gelände. Das Prätertiär besteht aus Sand- und Schluffsteinen des Cenomans bis Turons (Oberkreide). Die Schraffuren und Farbgebung der Blockbilddarstellung erfolgten in Anlehnung an KUPETZ et al. 2004.

4. Hydrologie, Hydrogeologie und Hydrodynamik

Als Datengrundlage hierfür wurden im Zeitraum März bis Juli 2004 Wasserstands- und Abflussmessungen durchge-

führt, Seeprofile (zur Volumenberechnung) mit Sonar vermessen, eine klimatische Wasserbilanz aufgestellt und der Wasserhaushalt der Seen bilanziert. Abbildung 5 zeigt den Grundwassergleichenplan des Untersuchungsgebiets. Die generelle Grundwasserfließrichtung ist von W nach E. Außerdem ist eine südwärts gerichtete Komponente erkennbar, die durch die Wasserhaushaltsbilanz bestätigt wird.

Für die Berechnung des oberirdischen Abflusses wurden die Wassereinzugsgebiete anhand des digitalen Geländemodells (DGM 25) mit dem Programm ArcView 3.2a und der Erweiterung Hydrotool ermittelt (Abb. 6). Dazu wurden die abflusslosen Senken aufgefüllt. Aus diesem korrigierten Höhenmodell wurde die Fließrichtung abgeleitet. Das Fließrichtungsraster zeigt deutlich eine Wasserscheide, die mit der von KÖHLER & SCHOSS 1995 dargestellten Grundwasserscheide übereinstimmt (Abb. 6, links unten). Aus der Fließrichtung wurde die akkumulierte und ungewichtete Wassermenge für ideale Bedingungen (keine Versickerung) berechnet. Diese spiegelt das vorhandene Fließnetz der Gräben wider. Aus der Fließrichtung und der akkumulierten Wassermenge wurden die Wassereinzugsgebiete berechnet (bei 1000 Gridzellen pro Einzugsgebiet, Abb. 6, rechts unten). Weiterhin zeigte sich, dass das RL 19

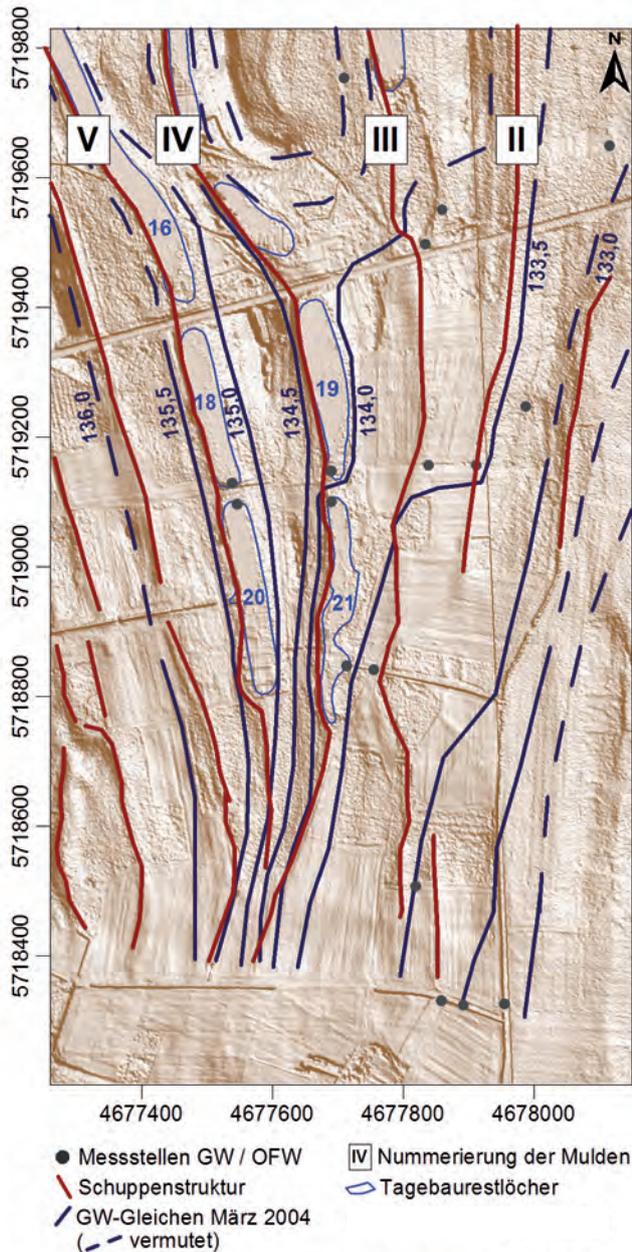


Abb. 5
Grundwassergleichenplan des Untersuchungsgebiets

Fig. 5
Hydro contour chart of the investigation area

nur mit Grundwasser gespeist wird. Hier wird durch den Damm (B156) ein Zufließen von Oberflächenwasser aus dem nördlichen Einzugsgebiet verhindert. Die westlich gelegenen RL 18 und 20 werden durch Grund- und Oberflächenwasser gespeist. Das RL 19 wird nur durch Grundwasser gespeist. Beim RL 21 erfolgt die Speisung durch das Grundwasser und den Zustrom von Oberflächenwasser aus dem RL 20 durch einen Graben. Es wurde angenommen, dass das System der Seen über einen Graben aus dem RL 21 ganzjährig entwässert wird.

5. Hydrochemie

Die hydrochemische Charakterisierung des Untersuchungsgebietes erfolgte anhand der Tiefenprofilmessung der Vor-Ort-Parameter (Temperatur, pH-Wert, Leitfähigkeit, Redoxspannung, Sauerstoffkonzentration und Trübung) der Seen sowie der chemischen Analyse der gewonnenen Proben von Seewasser (Oberflächenwasser, Tiefenwasser) und Grundwasser. Die Interpretation beschränkte sich auf die chemischen Prozesse, bakterielle Umsetzungsprozesse wurden in der Diplomarbeit nicht berücksichtigt. Obwohl durch gleichartiges Einfallen des Flözes und die Anwendung derselben Abbaumethode ähnliche Seemorphologien vorliegen, weisen die Profile unterschiedliche hydrochemische Parameter auf. In der Abbildung 7 sind die Vor-Ort-Parameter der Tiefenprofilmessung dargestellt. Das Temperaturprofil der Seen zeigt bis auf RL 19 einen ähnlichen Verlauf.

Alle vier Restseen sind geschichtet (Abb. 7a), wobei das Epilimnion (oberflächennahe Schicht) verschieden starke Schichtdicken aufweist, angefangen von 1 - 2 m für die RL 18, 20 und 21 bis hin zu 4 m beim RL 19. Das Metalimnion (Sprungschicht) ist durch einen Temperaturgradienten von rund 1 °C/m gekennzeichnet. Eine charakteristische Ausprägung der Sprungschicht zeigt das RL 21, bei den RL 18 und 20 nimmt die Mächtigkeit des Metalimnions zu. Beim RL 19 scheint das Epilimnion mit dem Metalimnion vermischt zu sein. Die dritte Schicht, das Hypolimnion (kalte Tiefenschicht), ist durch eine konstante Temperatur gekennzeichnet, die sich für die RL 18, 20 und 21 zwischen 7,9 °C und 9,8 °C bewegt und den in den Grundwassermessstellen gemessenen Temperaturen des Grundwassers entspricht. Mit über 3 m Mächtigkeit ist das Hypolimnion beim RL 21 am größten. Das RL 19 weist einen anderen Temperaturverlauf auf. Mit 25,2 °C im Oberflächenflächenwasser und 14,3 °C im Tiefenwasser ist er deutlich wärmer als die anderen drei Seen. Ursache dafür könnte in der exotherm verlaufenden Pyritoxidation (mit einer Reaktionsenthalpie von 410 kJ/mol; Wisorzky 1994) liegen. Das Grundwasser, das dem RL 19 aus der Richtung des RL 18 zufließt, nimmt saures Kippenwasser (Acidic Mine Drainage) auf und führt dieses dem RL 19 zu. Dies spiegelt sich besonders in der bis in eine Tiefe von 7 m konstanten Leitfähigkeit (Abb. 7c) und dem konstant sauren pH-Wert (Abb. 7b) des RL 19 wider. Des Weiteren zeigt das Profil des RL 19 keine Ausbildung des Hypolimnions. Es könnte sich hier um ein seltenes Schichtungsverhalten von meromiktischen Seen handeln (LUA, 2001). Meromiktische Seen bestehen aus einer durchmischten Oberflächenschicht, dem Mixolimnion und dem von Mischungsprozessen ausgeschlossenen Tiefenwasser, dem Monimolimnion (RÜCKER et al. 1999). Hinweise hierfür ergeben sich zum einen aus dem Temperaturprofil, vor allem aber durch das pH-Profil (Abb. 7 a, b). Für das RL 19 bestehen Ähnlichkeiten zum bereits untersuchten meromiktischen Waldsee bei Döbern, ebenfalls ein Tagebaurestsee im Muskauer Faltenbogen, der von SCHIM-

Digitales Geländemodell ohne abflusslose Senken

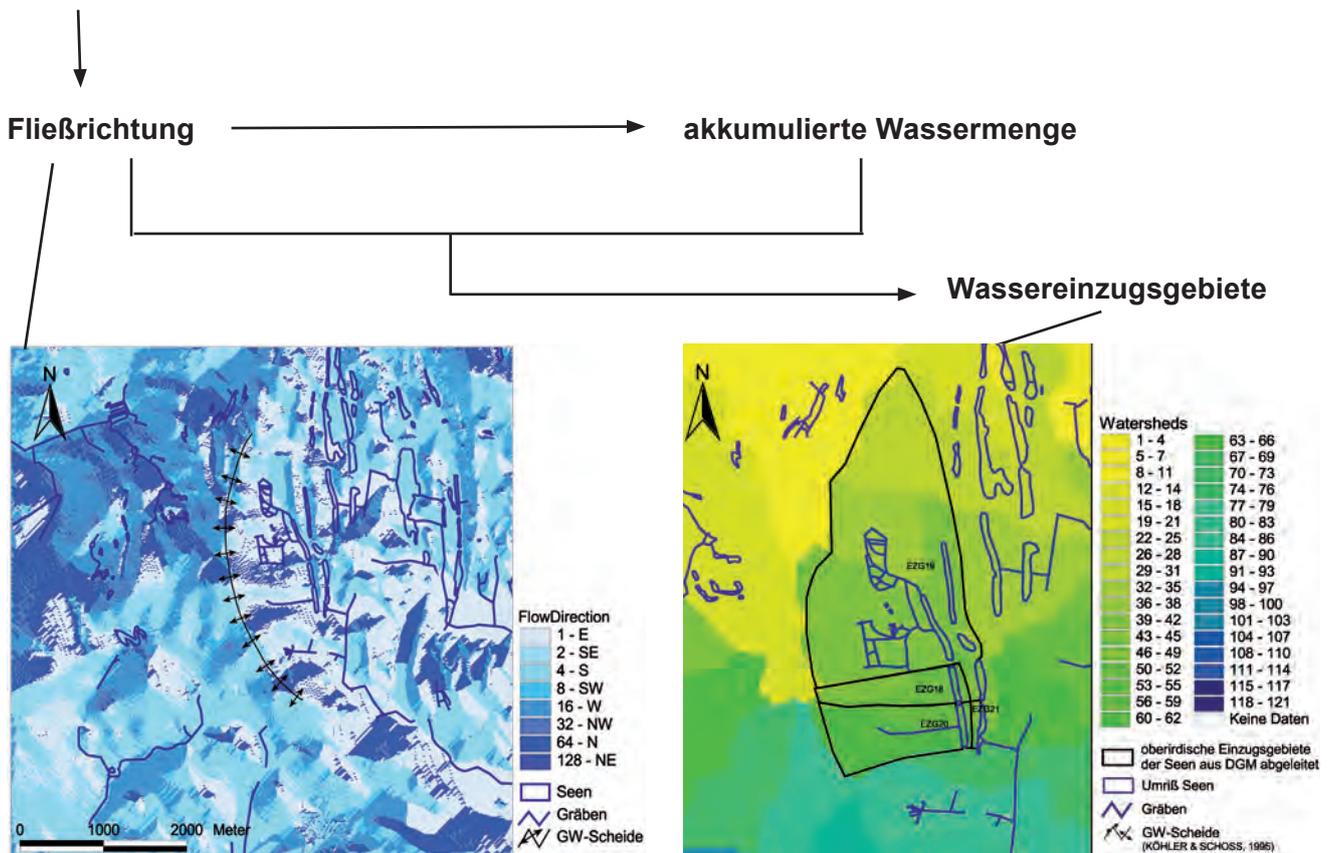


Abb. 6 Wassereinzugsgebiete und oberirdischer Abfluss, nähere Erläuterungen dazu im Text

Fig. 6 Drainage area and surface run-off, further explanation are given in the text

MELE (1999) untersucht wurde. Wie auch beim Waldsee besteht die Schichtung aus einem sauren, oxischen Mixolimnion und einem neutralen, anoxischen Monimolimnion. Im Gegensatz zum meromiktischen See sind die drei anderen Seen wahrscheinlich dimiktische Seen, die zweimal im Jahr (Frühjahrs-, Herbstzirkulation) durchmischt werden.

Das pH-Profil zeigt für die RL 18, 20 und 21 ähnliche Verläufe. Mit zunehmender Tiefe sinkt der pH-Wert zunächst und steigt dann wieder an, was auf einem Säureeintrag durch das Grundwasser schließen lässt. Die geringen Leitfähigkeitswerte im Epilimnion der Seen, besonders der RL 18 und 20, sind wahrscheinlich auf zuströmendes Oberflächenwasser zurückzuführen. Das RL 21 hat an der Oberfläche einen Sauerstoffgehalt von ca. 12 mg/l und er ist der einzige See, wo die Sauerstoffsättigung im Epilimnion auf über 200 % steigt. Dies ist ein Indiz dafür, dass hier bei ca. 1 m Wassertiefe Algen und Wasserpflanzen zusätzlich Sauerstoff durch Photosynthese produzieren. Demzufolge ist hier auch die Trübung (s. Abb. 7f) am höchsten.

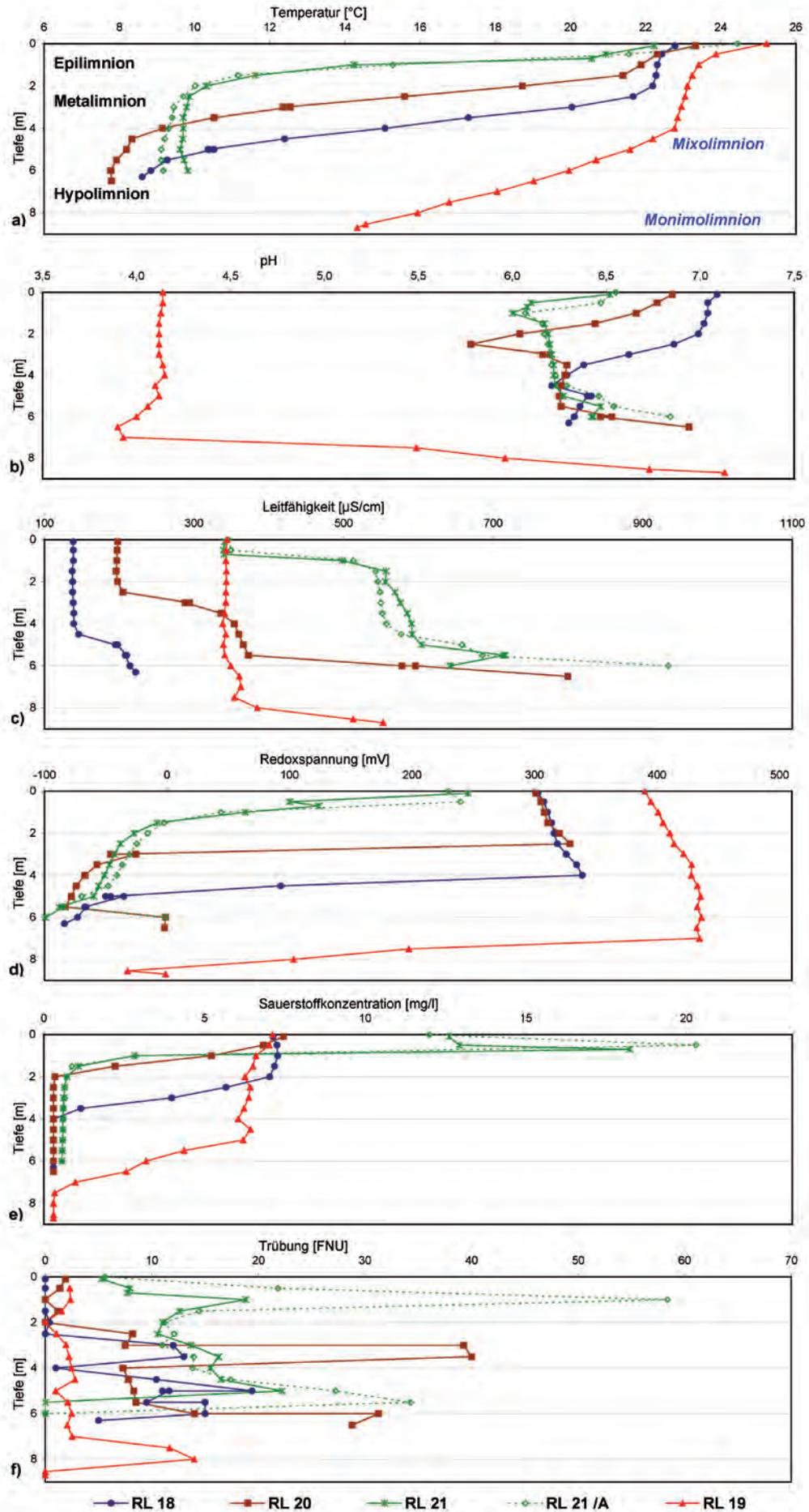
Die Klassifizierung der Wässer erfolgt mit Hilfe des Piper-Diagramms (Abb. 8). Die Tiefenwässer der RL 18 und

Abb. 7 Tiefenprofile durch die „Vier bunten Seen“

- a) Temperatur
- b) pH-Wert
- c) Leitfähigkeit
- d) Redoxspannung
- e) Sauerstoffkonzentration
- f) Trübung

Fig. 7 Depth sections through the „Vier bunten Seen“

- a) temperature
- b) pH-value
- c) specific electric conductivity
- d) oxidation-reduction potential (ORP)
- e) oxygen concentration
- f) turbidity



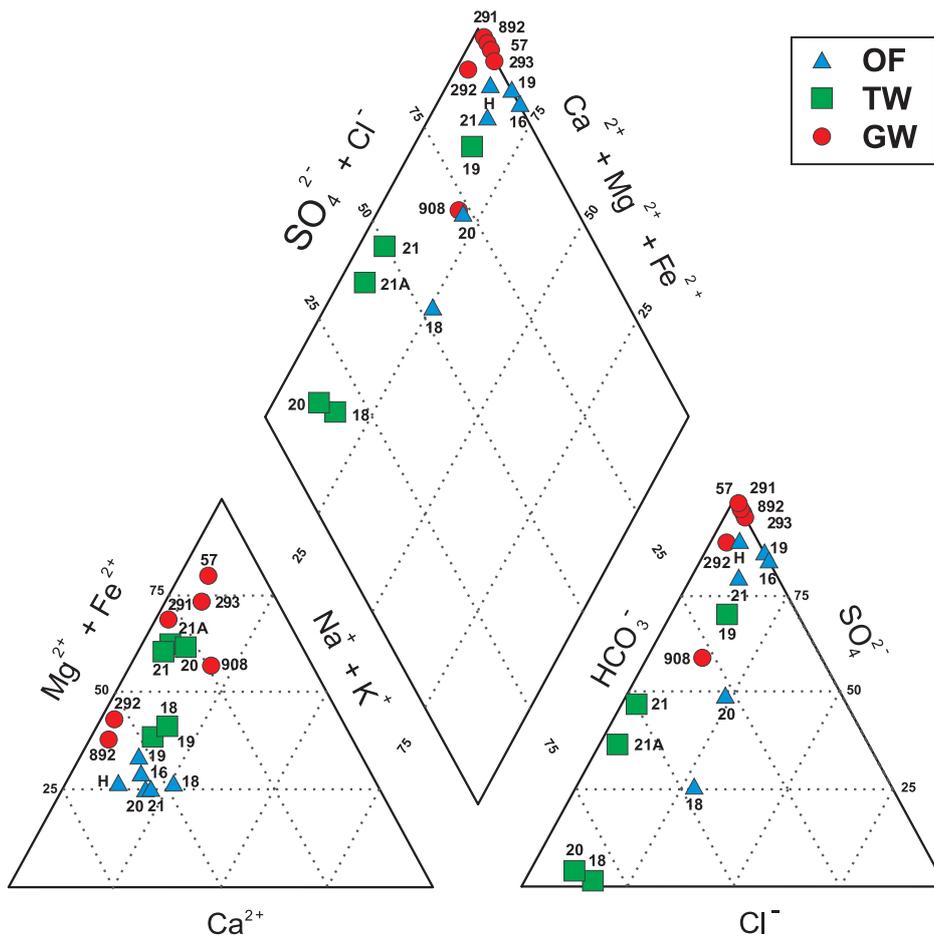


Abb. 8
Dreilineares Stoffdiagramm verändert nach PIPER (1944), ergänzt OF - Oberflächenwasser, TW- Tiefenwasser, GW - Grundwasser

Fig. 8
Trilinear plot after PIPER (1944), supplemented OF - surface water, TW - depth water, GW - ground water

20 sind überwiegend hydrogencarbonatisch ausgebildet. Die Tiefenwasser des RL 21 und das Oberflächenwasser des RL 18 bilden eine zweite Gruppe vom Typ $Ca-HCO_3-SO_4$. Eine dritte Gruppe ist dem $Ca-SO_4$ -Typ zuzuordnen und beschreibt die restlichen Messstellen, obwohl hier eine deutliche Zunahme der Konzentration an SO_4 -Ionen vom Tiefenwasser RL 19 über die Oberflächenwässer der RL 21, 16 und 19 sowie den Graben H zu den Grundwassermessstellen zu erkennen ist.

Für eine genaue Beurteilung, welche Spezies unter den gegebenen Milieubedingungen möglich sind, war die Messung der physikochemischen Parameter erforderlich. Es zeigt sich eine vom pe- und pH-Wert abhängige Dominanz der auftretenden Verbindungen. Abbildung 9 zeigt das Fe-S-K-O-H System (verändert nach BIGHAM et al. 1996) bei 25 °C mit den Stabilitätsbereichen der Minerale:

Pyrit:	FeS_2
Jarosit:	$KFe_3H(OH)_6$
Goethit:	$-FeOOH$
Ferrihydrit:	$Fe_5HO_8 \cdot 4H_2O$
gelöste Spezies	Fe^{2+}, Fe^{3+}
Schwertmannit:	$Fe_8O_8(OH)_6(SO_4)_2$

Die Wässer lassen sich in fünf Gruppen einteilen. Die neutralen (schwach alkalischen) Oberflächenwässer liegen im

Bildungsbereich von Ferrihydrit. Die Tiefenwässer liegen im Grenzbereich zwischen Goethit, gelöster Spezies (Fe^{2+}, Fe^{3+}) und Pyrit. Die sauren Oberflächenwässer nehmen ein Feld im Schwertmannitbereich ein, und die Grundwässer an den Messstellen im Abstrombereich zeigen eine Dominanz zum Goethitfeld. Demgegenüber positionieren sich die anderen Grundwässer im Bereich der gelösten Spezies. Das Tiefenwasser des RL 19 befindet sich ebenfalls im Bildungsbereich von Goethit. Beim Tiefenwasserprofil des RL 18 könnte im oberflächlichen Wasser bis in 4 m Tiefe Ferrihydrit ausgefüllt werden. Mit zunehmender Tiefe setzt der Sprung in den Bereich des Goethits ein und verläuft anschließend bis in den Grenzbereich von Pyrit und gelösten Spezies. Die gleiche Abfolge zeigen die RL 20 und RL 21. Im vermuteten sauren Mixolimnion und für das alkalische Monimolimnion des RL 19 liegen die pe- und pH-Werte in dem Bereich des Goethits. Aber auch hier ist ein Sprung zwischen den Schichten des meromiktischen Sees erkennbar.

Die augenfälligen Farbunterschiede der Seen kann man teilweise hydrochemisch interpretieren, teilweise wird die Färbung aber auch durch die Mikrofauna und -flora bedingt, die hier nicht untersucht wurde. Das „schwarze Wasser“ im RL 18 ist glasklar und farblos. Die schwarze Färbung wird durch die Lichtabsorption des mit schwarzem Laub bedeckten Seebodens hervorgerufen. Die Farbe ist

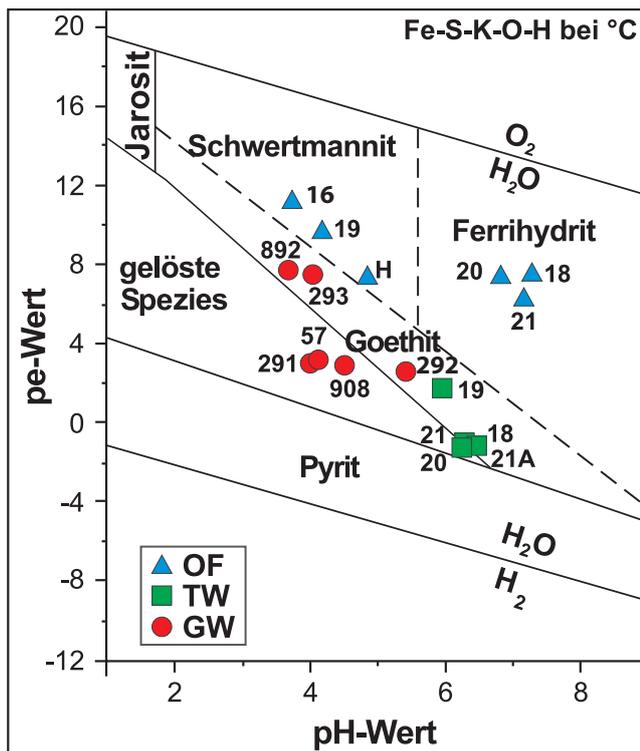


Abb. 9
pH-pe-Diagramm verändert nach BIGHAM (1996)

Fig. 9
pH-pe-diagram, after BIGHAM (1996), changed

damit nur eine scheinbare. Am auffälligsten ist die rostbraune Färbung des RL 21. Ein wesentlicher Faktor hierfür ist die stärkere Grundwasserbeeinflussung. Dadurch wird Eisensulfat als Oxidationsprodukt von Pyrit in größerer Menge eingetragen und durch weitere Oxydation als Limonit (Lepidokrokit und Goethit) ausgefällt. Das Restloch 19 weist ein grünes bis türkisfarbenes Wasser auf. Diese Farbe könnte auf die Anwesenheit von Plankton zurückgeführt werden. Im Rahmen dieser Untersuchung konnte dies nicht geklärt werden. Das Restloch 20 schließlich ist braun-trüb gefärbt. Es wird angenommen, dass hier das Wachstum des Planktons so intensiv war, dass es durch Sauerstoffmangel zum Absterben desselben geführt hat und die tote organische Substanz färbend in Erscheinung tritt.

Das RL 20 weist hohe DOC-Gehalte auf. Das Vorhandensein des organischen Kohlenstoffs könnte aus der Braunkohle und aus deren Verwitterungsprodukten stammen. Nach BLÖTHE (2004) ist eine hohe DOC-Konzentration auch mit einer hohen Huminstoffkonzentration verbunden, die eine bräunliche bis teils schwarze Färbung aufweisen (LIEBEZEIT 2003). Mikroorganismen können bei Anwesenheit von Huminstoffen Fe(III)-Ionen reduzieren (BLÖTHE 2004). Die hohen Fe(II)-Gehalte korrelieren mit den hohen Gehalten an DOC. Die bräunliche Färbung und der starke Geruch des Seewassers könnten auf die Bildung von Eisensulfiden zurückzuführen sein (BLÖTHE 2004).

6. Zusammenhang Hydrodynamik / Hydrochemie

In den im Abstrom liegenden RL 19 und 21 ändert sich durch Grundwasserbeeinflussung und Pyritoxidation die Wasserbeschaffenheit. Aufgrund der Freisetzung von Sulfat und Eisen erhöhen sich die Ionengehalte, was sich in der Zunahme der Leitfähigkeit widerspiegelt. So steigt z. B. der Sulfatgehalt von 15 mg/l im RL 18 auf 125 mg/l im RL 19 an. Für das Tiefenwasser beträgt der Unterschied sogar ca. das 70fache vom Gehalt im RL 18. Als Ursache für diese Anreicherung wird der durch die Pyritoxidation freigesetzte Sulfatgehalt angesehen. Für das RL 20 und das in seinem Abstrom liegende RL 21 ist die Situation ähnlich. Hier kommt es durch den Graben B (siehe Abb. 1, unten), der die beiden Seen verbindet, zusätzlich zu einer Vermischung mit dem Oberflächenwasser. Die Hauptgehalte an Ionen des Tiefenwassers aus dem RL 20 sind Eisen, Calcium und Hydrogencarbonat, die der Mineralisation des Tiefenwassers aus dem RL 21 ähnlich sind, nur dass hier Sulfationen- und Magnesiumionen hinzukommen. Die Sulfationen können zum einen durch die Verwitterung des Pyrits freigesetzt worden sein. Zum anderen könnten sie aber auch durch die Vermischungseffekte durch das Oberflächenwasser des RL 20 herrühren, da hier ebenfalls Sulfationen analysiert wurden. Das Auftreten von Magnesium kann seine Ursache ebenfalls in diesem Vermischungseffekt haben. Summiert man die Gehalte von Sulfat von Oberflächen- und Tiefenwasser des RL 20 (50 mg/l) und vergleicht sie mit dem Mittelwert des Sulfatgehaltes des Tiefenwassers aus dem RL 21 (117 mg/l), so erhält man eine Differenz von 67 mg/l für Sulfat und bei gleicher Rechnung für Magnesium eine Differenz von 5,5 mg/l. Diese überschlägige Rechnung zeigt, dass die Anreicherung des Sulfats im Tiefenwasser des RL 21 nicht allein auf Vermischungseffekte zurückzuführen ist, sondern der Eintrag von Sulfat aus den Oxidationsprozessen des Pyrits ebenfalls eine Rolle spielt. In den Sommermonaten wird durch die negative klimatische Wasserbilanz der Oberflächenzufluss Null. Das Oberflächenwasser der Seen fließt jedoch weiterhin durch den Verbindungsgraben B zwischen den RL 20 und 21 und den Graben D (dem Abfluss des RL 21) weiter kontinuierlich ab. Demzufolge müssten die Seen nur noch grundwasser gespeist sein. Da aber auch der oberirdische Abfluss durch die Gräben in den Sommermonaten geringer ist, verringert sich die Oberflächenwasserschicht. Die Ausbildung eines Epilimnions erfolgt zwar, nur ist seine Schichtdicke wesentlich geringer. Das bildet sich in den Tiefenprofilen der Seen sehr gut ab. Da der oberirdische Abfluss des RL 21 am größten ist, hat hier auch das Epilimnion mit 1 m seine geringste Mächtigkeit.

Zusammenfassung

Der Beitrag stellt die Hydrogeologie von vier Braunkohlentagebaurestlöchern in der Stauchendmoräne Muskauer Faltenbogen im Südosten von Brandenburg vor. Die „Vier Bunten Seen“ liegen auf genetisch vergleichbaren glazi-

altektonischen Schuppen, weisen jedoch unterschiedliche physikochemische und hydrochemische Parameter auf, was sich vor allem in der unterschiedlichen Färbung der Seen widerspiegelt. Zur Beschreibung der geologischen Verhältnisse wurde mit Hilfe von Altbohrungen, Oberflächenradarmessungen und Laserscanningdaten ein geologisches 3D-Modell angefertigt. Die hydrologische Situation wurde durch die Erfassung des Gewässernetzes, Wasserstands- und Abflussmessungen sowie Volumenvermessung der Seen charakterisiert und in einem Grundwassergleichplan sowie der Modellierung des Wassereinzugsgebietes und des oberirdischen Abflusses zusammenfassend dargestellt und der Wasserhaushalt der Seen bilanziert. Des Weiteren wurden physikochemische und hydrochemische Parameter von Grund- und Oberflächenwasser sowie an Tiefenprofilen in den Seen analysiert und ausgewertet (Piper-Diagramm, pH-pe-Diagramm). Auf der Grundlage dieser Daten wurden die Wechselbeziehungen zwischen Hydrodynamik, Geochemie und Hydrochemie und deren Auswirkung auf die Wasserbeschaffenheit in den Seen dargestellt und diskutiert.

Das Wassereinzugsgebiet wird im Westen durch eine Wasserscheide begrenzt. Die Hauptgrundwasserfließrichtung ist von West nach Ost gerichtet. Eine zweite Fließrichtungskomponente nach Süden ist erkennbar. Die beiden westlich gelegenen Seen (RL 18 und RL 20) sind Grund- und Oberflächenwassergespeist. Das RL 19 wird ausschließlich von durch Pyritoxidation beeinflusstes Grundwasser gespeist. Beim See RL 21 erfolgt ein Zustrom von Oberflächenwasser des RL 20 durch einen Verbindungsgraben zwischen den beiden Seen und von versauertem Grundwasser. Die Wasserstände der Seen werden durch den oberirdischen Abfluss des RL 21 reguliert. Die Tiefenprofile von drei Seen zeigen eine dimiktische Durchmischung, im vierten Fall (RL 19) liegt wahrscheinlich die nur selten auftretende Form eines meromiktischen Sees vor. Nach dem Chemismus lassen sich vier Gruppen ähnlicher Wässer ableiten. Die erste Gruppe, das Calcium-Sulfat-Wasser, wird durch alle Oberflächenwässer (ausgenommen RL 18), das Tiefenwasser des RL 19 und die Grundwassermessstellen GW 292 und GW 892 gebildet. Die zweite Gruppe sind durch Eisen-Sulfat-Wässer der restlichen Grundwassermessstellen dargestellt. Die Tiefenwässer der RL 20 und RL 21 sind vom Typ Eisen-Hydrogencarbonat-Wasser und werden der dritten Gruppe zugeordnet. Das Oberflächen- und Tiefenwasser des RL 18 gehört zur vierten Gruppe, dem Calcium-Hydrogencarbonat-Wasser. Die Tiefenwässer der Seen RL 19 und 20 sind durch pyritversauertes Grundwasser beeinflusst. Anhand der Milieubedingungen der Seen (pH-, pe-Wert) zeichnen sich die möglichen Stabilitätsfelder der Ausfällungsprodukte wie folgt ab. Die pH-neutralen Oberflächenwässer (RL 18, 20 und 21) liegen bei Sättigung im Bereich der Spezies Ferrihydrit, das saure RL 19 im Schwertmannitbereich. Die Tiefenwässer dagegen liegen bei Sättigung im Bereich der Spezies Goethit.

Summary

The article presented the hydrological characteristics of four rest lakes of lignite open cast mines in the push endmoraine structure Muskauer Faltenbogen (Muskau Arch structure) in the Southeast of Brandenburg (Germany). The "Four Coloured Lakes" are situated on genetically comparable glaciotectionic rafts but have different physiochemical and hydrochemical properties, which are reflected in varying water colours. To describe the geology, data from drillings of the historical mining, surface radar measuring, and laser scanning had been combined in a 3-D-model. The hydrological conditions had been characterised by information from the water distribution network, water levels as well as flow records and illustrated in a GW equipotential map. Additionally the lakes' water balance has been prepared. Furthermore physiochemical and hydrochemical parameters of ground and surface water as well as deep sections of the lake were measured and evaluated (Piper-diagram, pH-pe-diagram). Finally the interactions between hydrodynamics, geochemistry, and hydrochemistry and their consequences for the water conditions had been discussed.

The water distribution network is bounded in the west by a surface catchment area. The main direction of groundwater flow is from west to east. A secondary directional component trends towards the south. The two lakes in the west (rest lakes RL 18 and RL 20) are fed by ground and surface water. RL 19 is exclusively fed by groundwater that is influenced by pyrite oxidation. RL 21 gets water via ditch from RL 20 and from acidic groundwater. The water levels are regulated by the running water. The deep sections of three lakes show a dimictic mixing. The fourth lake probably represents the only rarely occurring meromictic lake type. In reference to chemical features four water quality groups can be distinguished. The first group is composed of calcium-sulphate waters. Among these are all surface waters (except RL 18), as well as the deep water of RL 19 and the groundwater measuring points GW 292 and GW 892. The second group is made up of iron-sulfate waters from the remaining groundwater measuring points. The deep waters from RL 20 and RL 21 can be assigned to a third group of iron-hydrogencarbonate waters. The surface and deep water of RL 18 belong to the fourth group, the calcium-hydrogencarbonate waters. The deep waters of the restlakes 19 and 21 are influenced by acidic groundwater deriving from acidic mine drainage.

Regarding the values of pH and pe, the stability fields of precipitation for surface waters are located in the section of Ferrihydrite (RL 18, 20 and 21) and Schwertmannite (RL 19), and for deep water in the section of Goethit (all rest lakes).

Danksagung

Herr Prof. Voigt, Herr Dr. Petzold, Herr Jahnke und Frau Bohn, Mitarbeiter des Lehrstuhls Umweltgeologie der

Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, ermöglichten mir die Bearbeitung des Themas und gaben mir jederzeit fachliche Unterstützung in Theorie und Praxis. Herr Peter Radke von der Lausitzer und Mitteldeutsche Braunkohlen-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) überließ mir das Luftbild der „Vier bunten Seen“. Herr Dr. Stackebrandt vom Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR), gestattete mir die Nutzung des digitalen Geländemodells. Herr Dr. Kupetz vom Landesumweltamt Brandenburg (LUA) stellte mir wichtige Unterlagen zur Verfügung und unterstützte mich bei geologischen Fragen und Problemen sowie bei der Erarbeitung des Manuskripts. Herr K. Göttlich vom Bergamt Cottbus und Herr M. Müller von der Unteren Abfall- und Bodenschutzbehörde Forst überließen mir ebenfalls notwendige Unterlagen. Die Lehrstühle Gewässerschutz und Hydrologie der Brandenburgischen Universität Cottbus unterstützten mich bei der Durchführung von Probenahmen und der technischen Ausstattung hierzu. Frau A. Andreae vom Landesamt für Bergbau Geologie und Rohstoffe Brandenburg (Redaktion) unterstützte mich sehr bei der Bearbeitung der Abbildungen.

Bei allen genannten Personen bedanke ich mich vielmals.

Literatur

- BARON, U. (2006): Hydrogeologie an Braunkohlenrestseen des „Muskauer Faltenbogens (Restlöcher 1218-1221). - Dipl.-Arb., Fakultät Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik, Lehrstuhl Umweltgeologie BTU Cottbus, 95 S., Cottbus
- BIGHAM, J. M., SCHWERTMANN, U., TRAINA, S. J., WINLAND, R. I. & M. WOLF (1996): Schwertmannite and the chemical modelling of iron in acid sulfate waters. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 60, No. 12, pp. 2111-2121, Elsevier Science, New York
- BLÖTHE, M. (2004): Abschätzung der mikrobiellen Diversität in anoxisch sauren Sedimenten von Braunkohle-Restseen unter Berücksichtigung des Eisenschwefelkreislaufs. - Diss., Bayreuther Institut für terrestrische Ökologie (BITÖK), Bayreuth
- DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (Hrsg.) (2002): Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2002. - Potsdam, Frankfurt (a. M.)
- HARTMANN (1823): Topographische Karte von Preußen - so genanntes Preußisches Urmesstischblatt - i. M. 1 : 25 000, Blatt Weißwasser UR 4453. - Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, Potsdam (Faksimiledruck); www.geobasis-bb.de
- HARTMANN (1845): Topographische Karte von Preußen - so genanntes Preußisches Urmesstischblatt - i. M. 1 : 25 000, Blatt Döbern UR 4353. - Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, Potsdam (Faksimiledruck); www.geobasis-bb.de
- HEYM, W.-D. (1995): Formen und Ziele der ökologischen Beschreibung von Tagebaurestgewässern im Muskauer Faltenbogen. - Referate-Tagungsberichte „Ökologischer Zustand von Tagebaurestseen, Maßnahmen zur Beeinflussung ihrer Entwicklung“. - COMETT Koordinierungsstelle Brandenburgische TU Cottbus, S. 16-18, Cottbus
- JANOWSCY, E. & R. JANOWSCY (2005): Park Krajobrazowy „Łuk Mużakowa“. - Diapress Agencja Fotograficzno-Wydawnicza, 144 S., 137 Fotos, mit deutschsprachigem achtseitigem Einlageblatt, Zielona Gora
- KÖHLER, D. & U. SCHOSS (1995): Bergschadenkundliche Analyse für das Altbergbauprojekt „Elster“ bei Horlitz. - Bergsicherung Cottbus, 32 S., Cottbus
- KUPETZ, A., KUPETZ, M. & J. RASCHER (2004): Der Muskauer Faltenbogen - ein geologisches Phänomen. Grundlagen einer 130jährigen standortgebundenen Wirtschaftsentwicklung und Geopark in Brandenburg, Sachsen und der Wojewodschaft Lebus Land. - Gesellschaft für Geowissenschaften Berlin, 36 S., Berlin
- KUPETZ, M. (2003): Die Geomorphologie des Muskauer Faltenbogens im hochauflösenden digitalen Geländemodell (airborne laser scanning). - Brandenburg. geowiss. Beitr. **10**, 1/2, S. 19-28, Kleinmachnow
- KUPETZ, M. (1997): Der Geologische Bau und Genese der Stauchendmoräne Muskauer Faltenbogen. - Brandenburg. geowiss. Beitr. **4**, 2, S. 1-20, Kleinmachnow
- KUPETZ, M., BAUER, M., FIALA, CH., FRANKE, R., KLUGE, G., MOHNHAUPT, K. & G. SCHUBERT (1988): Lagerstättengeologische Forschung Braunkohle, Einheitsblatt Weißwasser. - Bericht, VEB Geologische Forschung und Erkundung Freiberg (unveröff.)
- LIEBEZEIT, G. (2003): Huminstoffe. - Skript zur Vorlesung „Meereschemie 1“, WS 2003/04, Forschungszentrum Terramare, 18 S., Wilhelmshaven
- LUA (2001): Tagebauseen: Wasserbeschaffenheit und Wassergütemirtschaftliche Sanierung - Konzeptionelle Vorstellung und erste Erfahrungen, Studien und Tagungsberichte. - Schriftenreihe des Landesumweltamtes Brandenburg, Bd. 35, Cottbus
- PETZOLD, H., BARON, U., BOHN, A. & M. KUPETZ: Ergebnisbericht - Geologisch-geophysikalische Detailerkundung der Strukturen des „Muskauer Faltenbogens“ im Bereich Horlitz mit Georadar. - Bericht BTU Cottbus (im Druck.)

- RÜCKER, J., FYSON, A., DENEKE, R. & G. PACKROFF (1999): Meromiktische Seen mit saurem Mixolimnion - eine Besonderheit der Lausitzer Bergbaufolgelandschaft. - DGL Tagungsbericht, Klagenfurt 1998, Deutsche Gesellschaft für Limnologie, S. 239-243, Tutzingen
- SCHIMMELE, M. (1999): Ausbildung von Meromixien durch physikalische und chemische Einflüsse am Beispiel von Bergbaurestseen. - DGL Tagungsbericht, Klagenfurt 1998, Deutsche Gesellschaft für Limnologie, S. 234-238, Tutzingen
- SCHOSSIG, W. & M. KULKE (2006): Braunkohlenbergbau auf dem Muskauer Faltenbogen. - Beiträge zur Geschichte des Bergbaus in der Niederlausitz **6**, Förderverein Kulturlandschaft Niederlausitz e. V., 200 S., Cottbus
- STACKEBRANDT, W., mit einem Beitrag von S. JANY (2003): Airborne Laserscanning für geologische Detailuntersuchungen und Abwehr bergbaubedingter Gefahren im Muskauer Faltenbogen, Südost-Brandenburg. - Brandenburg. Geowiss. Beitr. **10**, 1/2, S. 1-6, Kleinmachnow
- STANDKE, G. (2006): Paläogeographisch-fazielle Modellierung des Unter-/Mittelmiozän-Grenzbereichs in der Lausitz (Briesker Folge/Formation). - Schriftenreihe für Geowissenschaften **14**, 130 S., Ostklüene (Störr)
- WISOTZKY, F. (1994): Untersuchungen zur Pyritoxidation in Sedimenten des Rheinischen Braunkohlenreviers und deren Auswirkungen auf die Chemie des Grundwassers. - Bes. Mitt. Z. Dtsch. Gewässerkdl. Jb. 58, 153 S., Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen

Anschrift der Autorin:
Dipl.-Ing. Ute Baron
Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Erich-Weinert-Straße 1
03046 Cottbus
e-mail: baron@tu-cottbus.de