

TELMA	Band 41	Seite 191 - 208	6 Abb., 3 Tab.	Hannover, November 2011
-------	---------	-----------------	----------------	-------------------------

# Hydrologisch-hydrochemisches Monitoring zu den Folgen der Renaturierung Hochmoor Große Säure, Oberes Westerzgebirge

Hydrologic-hydrochemical monitoring to the effect of re-wetting in a bog in the western upper Erzgebirge

ANNETT KRÜGER, HANS NEUMEISTER, DETLEF TOLKE  
und JÜRGEN HEINRICH

## Zusammenfassung

Die Folgen des historischen Torfabbaus, der Moorentwässerung und aktueller Renaturierung auf die Stoffdynamik werden in Bezug auf gelösten organischen Kohlenstoff (DOC) und Nährstoffe mit einem zu entwickelnden Monitoringkonzept im Oberen Westerzgebirge erfasst. Die DOC-Freisetzung wird in unterschiedlichen geökosystemaren Funktionsbereichen des Moores, d.h. in intakten Moorbereichen, nachwachsendem Moor und ausgetorften Bereichen durch unterschiedliche Prozesse gesteuert. In nachwachsenden und intakten Moorbereichen zeigt sich die DOC-Freisetzung unabhängig vom Grundwasserstand und wird dort bei sinkenden atmosphärischen Sulfateinträgen begünstigt. In drainierten, ausgetorften Bereichen erfolgt bis ins Katotelm eine DOC-Mobilisierung bei anschließender allochthoner Verlagerung einhergehend mit Niederschlagsereignissen.

## Abstract

The relationship between the distribution of naturally occurring dissolved organic carbon (DOC), other nutrients and catchment characteristics is determined by a monitoring program and concept for an upland catchment system in the western upper Erzgebirge. In the drinking water area of the dam "Carlsfeld" are situated acid bogs which are in parts destroyed, drained and now in re-wetting. The aim of our investigations consists on the analysing of the impact of the bog drainage and re-wetting for the matter dynamic. The mobilisation of DOC is controlled by the humification in the Katotelm based on moving ground water level in different transformed areas in the bogs (drained areas, no intact bogs). In intact bog areas with high ground water levels the DOC mobilisation depends on the atmospheric deposition of sulphate.

## 1. Einleitung

In den bewaldeten Flusseinzugsgebieten der oberen Lagen des Westerzgebirges mit zahlreichen Trinkwassertalsperren befinden sich Hochmoore, vermoorte Standorte und großflächig Fichtenforste. In diesem Gebiet gibt es seit Jahrzehnten konkurrierende Nutzungsinteressen wie die Trinkwassergewinnung, forstwirtschaftliche Nutzung und den Landschafts- und Naturschutz. Die vorhandenen erzgebirgischen Moorflächen sind sehr stark durch Torfabbau, Entwässerung und nachfolgende landwirtschaftliche und/oder forstliche Nutzung verändert, nachwachsende Moore kommen nur noch relikthaft vor. Das Ziel der Naturschutzbehörden des Freistaates Sachsen ist es daher, die vorhandenen Moorflächen zu erhalten bzw. zu revitalisieren.

Der Stoffumsatz in Mooren und Fichtenforsten, die in den Einzugsgebieten von Trinkwassertalsperren liegen, ist relevant für die Qualität des Talsperrenrohwassers (KRÜGER & NEUMEISTER 2001, 2005; GRUNEWALD & SCHMIDT 2005). In entwässerten Mooren und Fichtenforsten kann eine Mobilisierung von Nähr- und Schadstoffen durch die Zersetzung von organischem Material und Abtransport nach Komplexbildung erfolgen. Bei Verschließung der Entwässerungsgräben und Wasserspiegelanstieg besteht die Gefahr einer Stoffmobilisierung durch Lösungsprozesse von DOC (vgl. Kap.4). Nach langer Trockenheit können Moore bei einer Wiedervernässung zeitlich befristet zu einer Quelle von DOC, Nitrat, Sulfat und Schwermetallen werden (BURT 2003).

In Mooren und Fichtenwäldern bzw. Fichtenforsten der nördlichen Gebiete Europas und Amerikas ist in den letzten Jahrzehnten eine Zunahme von gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) zu beobachten. So wurde für versauerte Standorte in Großbritannien (EVANS et al. 2005) der Einfluss des atmosphärischen Stoffeintrages in Verbindung mit klimatischen Veränderungen (Temperaturanstieg) in langjährigen Zeitreihenanalysen (15 Jahre, 1988-2003) untersucht. Dabei wurde gleichzeitig mit einem Rückgang atmosphärisch eingetragener Schwefeloxide und einem damit verbundenen ph-Anstieg ein um bis zu 97% gestiegener DOC-Austrag bestimmt. Zu Messterminen, an denen ein vergleichsweise hoher Sulfatgehalt gemessen wurde, ist der DOC-Gehalt sehr gering und umgekehrt. Dieser Zusammenhang lässt sich nach KÖLLE (2003) durch die begünstigte mikrobielle Bildung von DOC nach Sulfatreduktion erklären. Ebenso fanden CLARK et al. (2005), dass in Trockenphasen aus Sulfiden bei zunehmendem Sauerstoffzutritt dieses zu Sulfat oxidiert. Mit dem vorhandenen löslichen Sulfat steigt die Ionenstärke, wodurch die DOC-Löslichkeit gemindert wird. Erhöht sich der Wasserstand, wird diese Minderung der DOC-Löslichkeit wieder aufgehoben, der DOC-Austrag steigt.

Erhöhte DOC-Gehalte erhöhen die Kosten für die Wasseraufbereitung erheblich. Vor dem Hintergrund der Erhöhung von DOC und der Verminderung des atmosphärisch eingetragenen Schwefels im Erzgebirge seit Beginn der neunziger Jahre sollte für das Einzugsgebiet Oberen Wilzsch und das Hochmoor „Große Säure“ (Abb.1) **standortdifferenziert**

**die Stoffdynamik** untersucht werden. Das Ziel der Untersuchungen bestand darin, ein repräsentatives Untersuchungsprogramm zur Erfassung hydrochemischer Verhältnisse und ein Konzept für ein Langzeitmonitoring zu entwerfen und zu testen.

## 2. Material und Methoden

Das Einzugsgebiet der Oberen Wilzsch befindet sich am Erzgebirgskamm südlich von Chemnitz bei Johanngeorgenstadt / Carlsfeld (TK 10 5541-SO Eibenstock-Carlsfeld) und stellt den wesentlichen, die Trinkwassertalsperre Carlsfeld speisenden Vorfluter dar. Da kleinräumig stark wechselnde Standortverhältnisse im Einzugsgebiet vorliegen, wurden zwei unterschiedliche Systeme der Stoffdynamik entsprechend der Wasserdynamik differenziert: (1) **System des Oberflächenflusses der Vorfluter** im Einzugsgebiet der oberen Wilzsch (Abb. 1) und (2) **das System Grundwasser** im Moor „Große Säure“ (s. Abb. 2).

Das **System der Vorfluter** im Einzugsgebiet der oberen Wilzsch ist 1,72 km<sup>2</sup> groß und umfasst 31,7 % der Fläche des Gesamteinzugsgebietes der Trinkwassertalsperre Carlsfeld. Es trägt vorrangig Fichtenforste. 75 % der Fläche weisen Mineralböden mit Ah-Horizonten von Podsolen und Braunerden auf, 25 % der Fläche werden durch flachgründige, aber auch bis zu mehr als 4 m tiefgründige Torfe (EDOM et al. in DITTRICH & PARTNER 2008) geprägt. Das Einzugsgebiet der Oberen Wilzsch besitzt unmittelbar oberhalb der Trinkwassertalsperre Carlsfeld einen Pegel, auf dessen Einzugsbereich die Stoff-Frachten berechnet und Durchflussmessungen durchgeführt wurden. Darüber hinaus wurden an 10 Messpunkten im System der Vorfluter die Konzentrationen ausgewählter Stoffe gemessen (Abb.1).

Im Einzugsgebiet der Oberen Wilzsch liegt das 0,1 km<sup>2</sup> große Hochmoor Große Säure mit 2 % der Fläche des gesamten Einzugsgebietes der Talsperre Carlsfeld und 6 % des Wilzsch-Einzugsgebietes. Der Wasser- und Stoffaustrag aus der „Großen Säure“ erfolgt über Austräge aus Gräben bzw. diffusen Grundwasserausträgen in die Fließgewässer. Letzterer ist bisher mit Messeinrichtungen nicht erfassbar, aber mit Modellrechnungen schätzbar. Um die wassergebundene Stoffdynamik im Moor „Große Säure“ zu erfassen, wurde ein zweites, von den Vorflutern unabhängiges Beobachtungssystem, das Grundwassermesssystem installiert. In diesem **System „Grundwasser im Moor Große Säure“** erfolgte im 14tägigen Abstand die Ermittlung der Grundwasserstände und Beprobung des Grundwassers zur chemischen Analyse im hydrologischen Jahr an 11 Grundwassermessstellen (Abb. 2). Mit diesem auf der Grundlage beider Systeme durchgeführten Monitoring wurde die Wasser- und Stoffdynamik als ortsgebundene Problematik in **differenziert ausgewiesenen Funktionsbereichen** erfasst (Tab. 1).

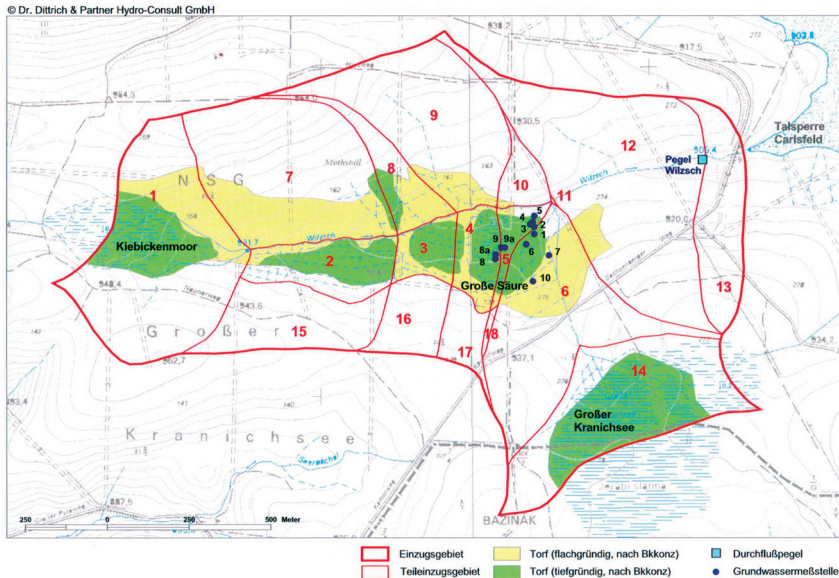


Abb. 1: System „Vorfluter“ in hydrologischen Einzugsgebieten der Oberen Wilzsch (KRÜGER et al. 2008; verändert nach Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH, In: EDOM et al. 2008). Grundlage TK 10 5541-SO Eibenstock-Carlsfeld.

System „discharge system“ in hydrological drinking water dams of the river Obere Wilzsch (KRÜGER et al. 2008; adapted by Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH, In: EDOM et al. 2008). Map on the base TK 10 5541-SO Eibenstock-Carlsfeld.

Tab. 1: Messprogramm und chemische Analytik im Monitoring des Hochmoores Große Säure. Measurement and chemical analytic for the monitoring program in the acid bogs, Western Ore Mountains.

Feldmethoden	Analysen
Grundwassermessstellen im Moor	DOC, Total Organic Carbon (TC), Total Organic Nitrogen (TN), Inorganic Carbon (IC), (Multi N/C, Analytik Jena)
(Pegel-Rohre)	Metallionen (Na, K, Ca, Mg, Fe, Al, Mn): Flammen-AAS
Fließgewässerproben (finale Pegel)	Anionen, Ammonium (Ionenchromatographie) pH-Wert, Leitfähigkeit (elektrometrisch) Grundwasserstand Durchfluss
Differenzierung in Funktionsbereiche (14 tägige Beprobung, seit 2006)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abhängigkeit/Auswertung von klimabezogenen Parametern (Temperatur, Niederschlag, chemische Zusammensetzung des Niederschlages)</li> <li>- Detailanalysen: Mooreigenschaften (Substrate, Stoffzusammensetzung), Reliefaufnahmen, Vegetationskartierung, Grabenkartierung, hydrologische Gutachten – Zusammenarbeit EDOM, DITTRICH (2008 A, B)</li> </ul>	

Die Funktionsbereiche (Abb. 2) bestimmen in ihrer unterschiedlichen geökosystemaren Prozessdynamik das aktuelle hydrologische und hydrochemische Verhalten in den Moorbereichen. Das Verständnis der aktuellen materiellen Struktur und der Dynamik in und zwischen den Funktionsbereichen ist die Grundlage für jegliche Revitalisierungsmaßnahmen. Die Funktionsbereiche sind wie folgt definiert (Abb. 2):

**Funktionsbereich 1:** Fichtenforst auf Mineralboden mit Streu- und Humusauflage, Podsolen und räumlich-fleckenartig eingelagerten geringmächtigen Moorbildungen auf dem Flachhang oberhalb der anderen Funktionsbereiche. Der Hangwasserüberschuss speist direkt die Funktionsbereiche 2, 3 und 5.

**Funktionsbereich 2:** Torf (> 2 m), Fichtenforst und tiefe Gräben (< 2,5 m). Mehr als 1 m bis maximal 4 m mächtige Torfe, durchzogen von oft tiefen Gräben (bis 2,5 m tief), unter Fichte bodenbedeckende Vegetation, Heidelbeere unter großen Fichten fehlend, Altbäume fehlen.

**Funktionsbereich 3:** Torf (> 2 m, Latschen und wenig Fichten). Hoch anstehendes Grundwasser mit relativ geringer Schwankung im Jahresgang, Vegetation: Gräser, Torfmoose und Heidelbeere.

**Funktionsbereich 4:** Ausgetorfte Moor in natürlicher Regeneration. Der Funktionsbereich schließt sich an die Talbodenbereiche von Wilzsch und Kranzsch mit absterbenden großen Fichten und partieller neuer Vermoorung an.

**Funktionsbereich 5:** Wachsendes Moor im wenig geneigten bis fast ebenen Relief, Wasseranstau hinter 20-40 cm mächtiger Holzverbauung aus dem Jahre 1992; Torfmoose dominant; auf etwas höher gelegenen Bereichen Jungfichten.

### 3. Ergebnisse

Die Auswertung frachtenbezogener Daten am einzigen Pegel im Einzugsgebiet der Wilzsch liefert recht hohe DOC-Austräge mit Frachten von etwa 200 kg/ha/a (Tab. 2). Die DOC-Gehalte in den Vorflutern im Einzugsgebiet der Talsperre Carlsfeld (Wilzsch und Kranzsch, Fließgewässerproben FG 2- FG 4) zeigen Mittelwerte von 19 mg/l (Tab. 3). Steigende DOC-Konzentrationen in Oberflächenwässern des Einzugsgebietes der Trinkwassertalsperren Carlsfeld und Werda wurden seit Beginn der neunziger Jahre beobachtet (NEUMEISTER et al. 1995). Die naturräumliche Ausstattung des bewaldeten Einzugsgebietes der Trinkwassertalsperre Carlsfeld mit hohen Flächenanteilen an Torfen, Anmooren bis Anmoorgleyen und sauren Podsolen mit Humusaufgaben bildet die Voraussetzung dafür, dass Wässer mit hohen DOC-Gehalten (Abb. 3) („brown waters“) auftreten.

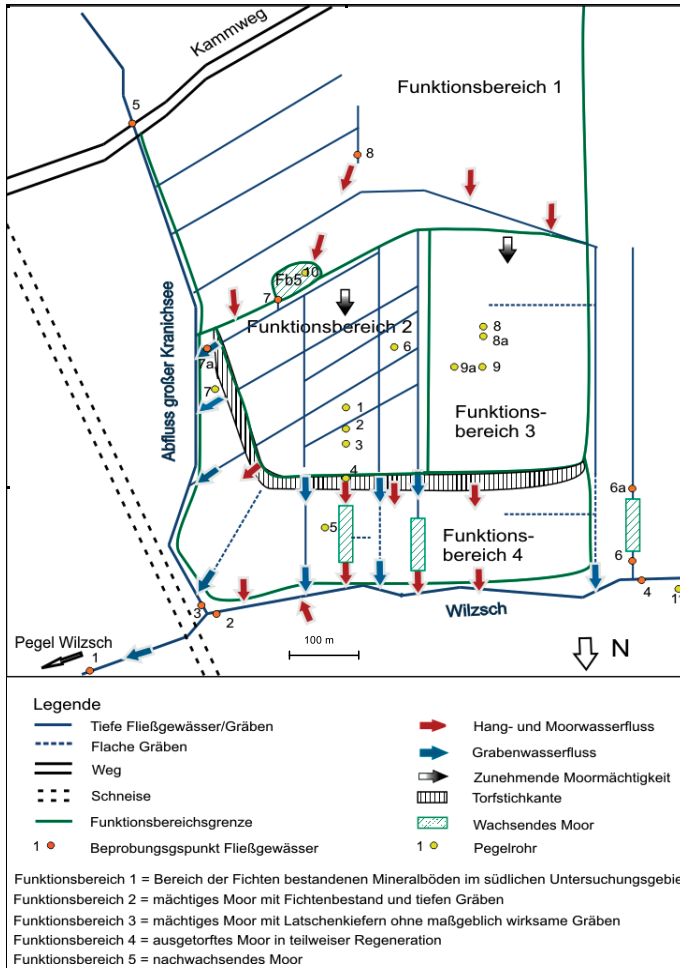


Abb. 2: Messnetz im Untersuchungsgebiet „Große Säure“. Kartengrundlage: TK 10 (verdichtet durch Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH, in EDOM et al 2008), (KRÜGER et al. 2008: 36).  
 Sampling area acid bog „Große Säure“. Map resource: TK 10 (adapted by Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH in EDOM et al. 2008) (KRÜGER et al. 2008: 36).

Tab. 2: Frachten am finalen Pegel der Oberen Wilzsch im Einzugsgebiet der Trinkwassertalsperre Carlsfeld (Hydrologisches Jahr 1.11.2006 - 31.10.2007).  
 Mass flow (charge) at the final level in the catchment from the river Obere Wilzsch (Hydrological year 1.11.2006 - 31.10.2007).

	DOC	Al <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
Jahresfracht / kg	33833	1287	2047	1254	3076	16971	5879	780
Austragsrate / kg*ha <sup>-1</sup> *a <sup>-1</sup>	196,5	7,48	11,9	7,29	17,86	98,6	34,1	4,53

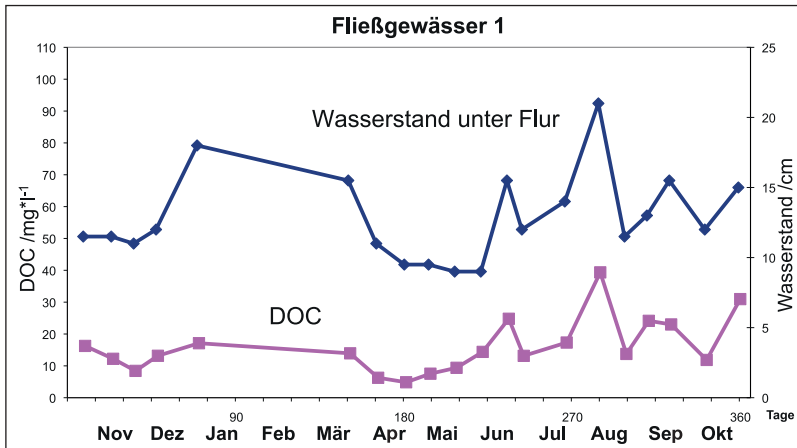


Abb. 3: Fließgewässer System „Wilzsch“: DOC-Konzentrationen am Messpunkt FG 1 verglichen mit dem Wasserstand (Wilzsch-Pegel, vgl. Abb. 1).

Stream system „Wilzsch“: DOC-concentrations at the sampling point FG 1 (see fig.1), compared with the water level of the final level of the river Wilzsch.

Die drei beprobten Meßstandorte der Wilzsch (Fließgewässer FG 1, 2 und 4, Abb. 1) besitzen ähnliche mittlere DOC-Konzentrationen (19,2-16,1 mg/l). Im Flusslängsprofil über ca. 2 km verändern sich die Stoffkonzentrationen in der Wilzsch kaum. **Hohe DOC-Gehalte finden sich bereits im Oberen Einzugsbereich der Wilzsch** (FG 1, Pegel Wilzsch) und werden flussabwärts am Vorbeifließen des in Renaturierung befindlichen Hochmoores Große Säure nicht verstärkt. Der Vergleich der chemischen Analysen für Messpunkte an den Flüssen Wilzsch und Kranzsch (Tab. 3) liefert ein nahezu identisches Bild. Die Zuflüsse der Kranzsch liefern im Mittelwert geringfügig darunter liegende DOC-Gehalte (14,9-17,9 mg/l, Tab. 3). Die DOC-Konzentrationen in den Fließgewässern variierenden im Jahresgang (Abb.3) und zeigen ähnliche Schwankungen wie der Wasserstand am finalen Pegel der Wilzsch (Fließgewässer 1, Abb. 3).

Bei Betrachtung der Konzentrationen in den Grundwässern sind in den nachwachsenden, sich regenerierenden Torfen (Funktionsbereich 5, Abb.2) die geringsten DOC-Austräge zu verzeichnen (Tab. 3). In diesem Bereich dominieren hohe Grundwasserstände (Mittelwert 2,76 cm u.GOF), die im jahreszeitlichen Verlauf nur geringfügig variieren (Spannweite 5 cm) (Abb. 4a). Am Standort Pegel 10 wurden die geringsten DOC-Gehalte (28,47 mg/l) gemessen. Die drainierten Bereiche hingegen zeigen höhere DOC-Konzentrationen an (Abb. 4b).

Tab. 3: Stoffkonzentrationen in Vorflutern (Fließgewässern) der Trinkwassertalsperre Carlsfeld im hydrologischen Jahr 2006/07 (Beprobungsstandorte vergleiche Abb. 1)

Matter concentrations in samples of the river Wilzsch and Kranitzsch, catchment area of the dam Carlsfeld, Hydrological year 1.11.2006 - 31.10.2007 (Sampling sites see figure 1)

#### Wilzsch Pegel 1

Stoff	Anzahl der Messungen	Mittlere Konzentration mg <sup>-1</sup> l <sup>-1</sup>	Standard-abweichung	Minimum [mg/l]		Maximum [mg/l]		Spannweite
					Termin		Termin	
DOC	20	16,09	8,63	4,85	30.04.07	39,35	12.08.07	34,50
Aluminium	20	0,70	0,43	0,01	15.04.07	1,50	02.07.07	1,49
Ammonium	20	0,65	0,22	0,19	24.06.07	1,06	06.12.06	0,87
Calcium	20	3,48	1,05	1,85	12.08.07	5,84	24.11.06	3,99
Eisen	20	1,03	0,47	0,24	30.04.07	1,94	12.08.07	1,69
Nitrat	20	1,34	0,31	0,80	24.06.07	1,84	09.01.07	1,04
Sulfat	20	9,39	2,14	4,39	12.08.07	13,14	13.05.07	8,75
Magnesium	20	0,45	0,11	0,27	31.03.07	0,67	27.05.07	0,40

#### Wilzsch Fließgewässer 2

Stoff	Anzahl der Messungen	Mittlere Konzentration mg <sup>-1</sup> l <sup>-1</sup>	Standard-abweichung	Minimum [mg/l]		Maximum [mg/l]		Spannweite
					Termin		Termin	
DOC	20	17,53	7,92	5,42	30.04.07	37,73	12.08.07	32,31
Aluminium	20	0,72	0,48	0,01	15.04.07	1,71	12.08.07	1,70
Ammonium	20	0,67	0,27	0,20	24.06.07	1,21	06.12.06	1,01
Calcium	20	3,09	0,97	1,74	26.10.07	5,20	27.05.07	3,46
Eisen	20	1,09	0,42	0,35	30.04.07	1,84	12.08.07	1,49
Nitrat	20	1,15	0,32	0,68	24.06.07	1,87	09.01.07	1,19
Sulfat	20	9,54	1,80	6,92	19.09.07	13,23	30.04.07	6,31
Magnesium	20	0,44	0,11	0,30	09.01/12.08.07	0,75	27.05.07	0,45

#### Wilzsch Fließgewässer 4

Stoff	Anzahl der Messungen	Mittlere Konzentration mg <sup>-1</sup> l <sup>-1</sup>	Standard-abweichung	Minimum [mg/l]		Maximum [mg/l]		Spannweite
					Termin		Termin	
DOC	20	19,19	8,17	6,61	30.04.07	39,82	12.08.07	33,21
Aluminium	20	0,80	0,49	0,01	31.03/15.04.07	1,70	02.07.07	1,69
Ammonium	20	0,75	0,36	0,05	02.07.07	1,35	10.06.07	1,30
Calcium	20	2,97	1,01	0,66	26.10.07	4,69	27.05.07	4,03
Eisen	20	1,26	0,44	0,51	30.04.07	1,94	07.09.07	1,43
Nitrat	20	1,08	0,31	0,45	12.08.07	1,74	09.01.07	1,29
Sulfat	20	9,20	2,06	4,88	12.08.07	13,09	30.04.07	8,21
Magnesium	20	0,43	0,10	0,29	09.01/31.03.07	0,69	27.05.07	0,40

#### Kranitzsch Fließgewässer 3

Stoff	Anzahl der Messungen	Mittlere Konzentration mg <sup>-1</sup> l <sup>-1</sup>	Standard-abweichung	Minimum [mg/l]		Maximum [mg/l]		Spannweite
					Termin		Termin	
DOC	20	14,95	10,09	2,49	30.04.07	42,41	12.08.07	39,92
Aluminium	20	0,62	0,44	0,01	31.03/15.04.07	1,47	02.07.07	1,46
Ammonium	20	0,76	0,28	0,24	24.06.07	1,29	06.12.06	1,05
Calcium	20	3,58	0,99	1,90	09.01.07	5,59	02.07.07	3,69
Eisen	20	1,07	0,61	0,15	30.04.07	2,07	12.08.07	1,92
Nitrat	20	1,48	0,37	0,61	12.08.07	1,98	13.05.07	1,37
Sulfat	20	9,29	2,12	4,50	12.08.07	12,33	13.05.07	7,83
Magnesium	20	0,50	0,12	0,27	09.01.07	0,72	26.10.07	0,45

## 4. Diskussion

Die beobachteten hohen DOC-Konzentrationen in den Fließgewässern des Systems Vorfluter (Tab. 3) bestätigen den weltweit, insbesondere in den letzten 2-3 Jahrzehnten in der nördlichen Hemisphäre beobachteten DOC-Anstieg in Oberflächenwässern (WORRALL et al. 2004, EVANS & MONTEITH 2001, HEJZLAR 2003, FREEMANN et al. 2001).



Ein großer Teil der Huminstoffe in Oberflächenwässern ist allochthonen Ursprungs (STEINBERG et al. 2001), er wird andererseits aber auch durch autochthone Bildungsprozesse verursacht (KRACHT & GLEIXNER (2000). Die Arbeiten von EVANS et al. (2006) und MONTHEITH et al. (2007) weisen einen engen Zusammenhang der gestiegenen DOC-Austräge in Fließgewässern mit dem Rückgang des atmosphärischen Eintrages an Schwefeloxiden in Verbindung mit geochemischen und klimatischen Veränderungen (Temperaturanstieg, pH-Anstieg) nach. Im Westerzgebirge ist seit Beginn der 90er-Jahre gleichzeitig mit dem Anstieg der Huminstoffeinträge in Oberflächenwässern ein Rückgang der atmosphärischen Sulfatdepositionen von über 100 kg Sulfat-S/ha auf 15-25 kg S/ha (ANDRAE 2008) zu verzeichnen (STEINBERG & KRÜGER 2011).

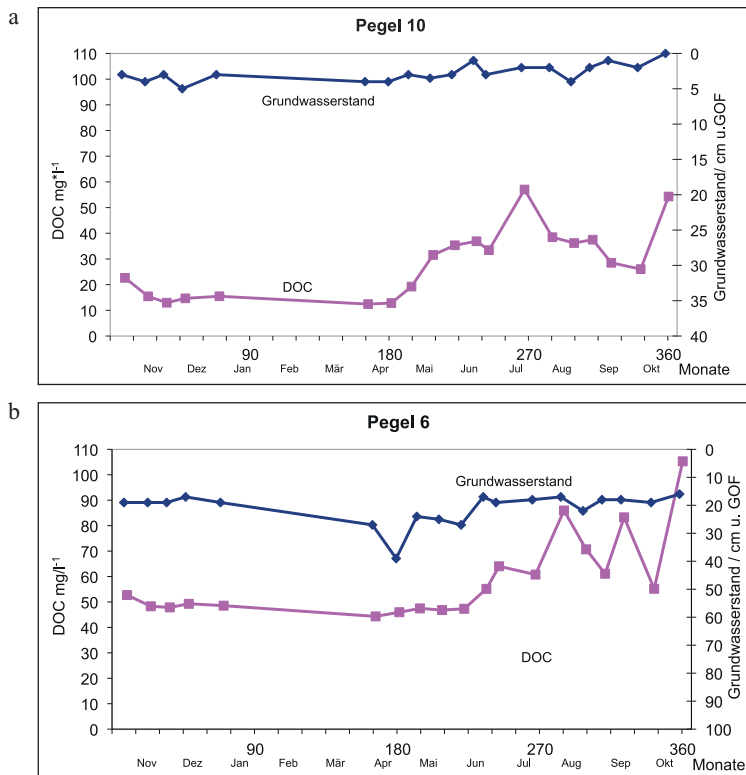


Abb. 4a,b: Beziehung zwischen der DOC-Konzentration und dem Grundwasserstand, System Grundwasser im Moor (Grundwasser- Pegel 10: Intakter Moorbereich, Grundwasserpegel 6: ausgetorfter Bereich mit tiefen Entwässerungsgräben, Pegelstandorte vgl. Abb. 2). Relationship between DOC-concentration and the ground water level. System „ground water in the bog“ (Ground water level number 10: intact bog area, no drainage, Ground water level number 6: destroyed bog with deep drainage ditches, see fig.2).

Als alternative Erklärung für den ansteigenden DOC-Export lassen sich somit weniger die veränderten Landnutzungen durch Moor-Renaturierung sondern vielmehr globale und regionale Ursachen (Rückgang der Sulfatdeposition, z. T. bei gleichzeitigem Temperaturanstieg) vermuten. Die Wechselbeziehungen zwischen Sulfatkonzentration und DOC-Gehalten wird im Untersuchungsgebiet des Hochmoores Große Säure deutlich belegt: Hohe DOC-Werte in den Oberflächenwässern und Grundwässern korrespondieren mit sinkenden Sulfatdepositionen (Abb. 5 a, b, Abb. 6 a, b). Die Tabelle 3 zeigt einen reziproken Verlauf beim Vergleich der Sulfat- und DOC-Konzentrationen in den Fließgewässern. Die Schwankungen im hydrologischen Jahr belegen höhere Sulfatkonzentrationen in den niederschlagsärmeren Monaten April/Mai und November/Dezember, geringere Werte hingegen in den niederschlagsreicheren Monaten (insbesondere im August) des hydrologischen Jahres 2006/07.

Die Funktionsbereiche (Abb. 2) des Hochmoores Große Säure repräsentieren differenzierte Landnutzungsmaßnahmen durch Renaturierung, welche sich im **System Grundwasser im Hochmoor** durch unterschiedliche Stoffkonzentrationen an den Grundwassermessstellen widerspiegeln. Ausgetorfte (aerobe) Bereiche (Funktionsbereich 2) wechseln sich mit kaum entwässerten (anaeroben) Bereichen (Funktionsbereich 3) ab und wirken sich auf die unterschiedlichen Stoffausträge aus. In den nachwachsenden, sich regenerierenden Torfen im Funktionsbereich 5 (Abb. 2) schaffen die hohen Grundwasserstände reduzierende Bedingungen und wirken einem DOC-Austrag entgegen (Abb. 4a). Die drainierten Bereiche hingegen zeigen höhere DOC-Konzentrationen (Abb. 4b). Untersuchungen von FRASER et al. (2001) in kanadischen Mooren in Ontario mit Hilfe von Fluoreszenzmessungen geben als mögliche Ursache für diesen Effekt ein Absinken des Wasserstandes in drainierten Mooren bis zum Katotelm an, wodurch es im belüfteten Bereich zu autochthonen Bildungen von DOC nach Aktivierung des Enzyms Phenoloxidas kommt. Die Untersuchung von Steuerprozessen für die Stoffmigration anhand von Modellrechnungen durch WORRALL & BURT (2004) liefert für Standorte in Nordengland Aussagen zum DOC-Fluss bei Temperaturanstieg und Wasserstandsänderung: Die Autoren stellen auch hier fest, dass die DOC-Produktion im Akrotelm mit einer Freisetzung von gespeichertem Kohlenstoff aus dem Katotelm gekoppelt ist, welche durch enzymatische Umsätze bestimmt sind (enzymatic latch mechanism). Diese DOC-Freisetzung ist am Acrotelm/Katotelm-Übergangsbereich angesiedelt. Eine gegenläufige Tendenz wird hingegen von ASTRÖM et al. (2001) und AHTIAINEN & HUTTENEN (1999) festgestellt. Hier wurden sinkende DOC Austräge nachfolgend einer Drainage von Mooren analysiert.

In den regenerierenden Moorbereichen des Funktionsbereiches 5 und in dem durch Verinässung gekennzeichneten Talbodenbereich der Wilzsch mit Torfmoosbildungen über Mineralböden (organo-mineralische Nassstandorte) zeigt sich die DOC-Mobilisierung als Funktion des Grundwasserstandes im reziproken Verlauf. Hohe Grundwasserstände wirken unter Sauerstoffausschluss einer DOC-Mobilisierung entgegen. Dieses Muster wird ebenfalls bei Betrachtung des Funktionsbereiches 2 offenbar, jedoch werden im Funk-

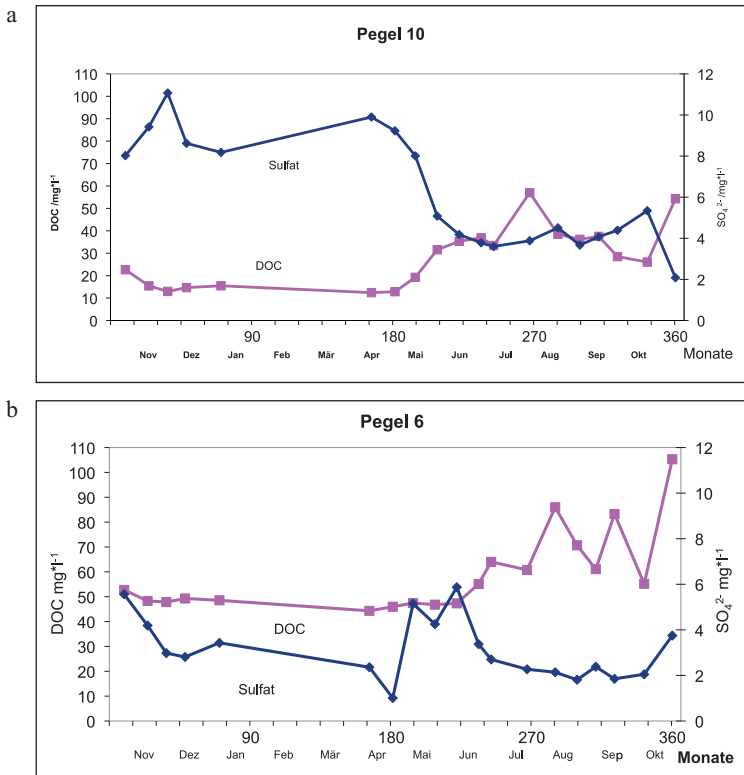


Abb. 5a,b: Beziehung zwischen der DOC-Konzentration und dem Sulfatgehalt. System Grundwasser im Moor. Grundwasser- Pegel 10: Intakter Moorbereich, Grundwasserpegel 6: ausgetorfter Bereich mit tiefen Entwässerungsgräben Pegelstandorte vgl. Abb. 2.  
 Relationship between DOC-concentration and the concentration of  $\text{SO}_4^{2-}$  ions. System "ground water in the bog". Ground water level number 10: intact bog area, no drainage, Ground water level number 6: destroyed bog with deep drainage ditches (see fig.2).

tionsbereich 3 die DOC-Werte im Einklang mit den Grundwasserständen abgebildet (Abb. 4a,b). Ein gleiches Fingerprint liefert der Pegelstandort Wilzsch, Fließgewässer 1 (Abb. 3).

Der Vergleich lässt die Schlussfolgerung zu, dass im Funktionsbereich 3 wie auch im System „Einzugsgebiet der Oberen Wilzsch“ die DOC-Mobilisierung insbesondere nach Auswaschung bei Niederschlägen stattfindet. In den Funktionsbereichen 2, 4 und 5 hingegen wird die DOC-Freisetzung bei sinkenden Grundwasserständen nach Bildungsprozessen mobiler DOC-Fraktionen im aeroben Bereich begünstigt. Bei steigenden Grundwasserständen sinkt dort die DOC-Freisetzung im reduzierenden Milieu.

Zur Bewertung des Einflusses der Revitalisierung entwässerter Moore auf den DOC-Austrag und dessen Quantifizierung findet man in der Literatur wenige Angaben, welche sich meistens auf veränderte Umsätze von N- und P-Verbindungen beziehen (KALBITZ et al. 1999).

BÖHM (2006) fand in aktuell zuwachsenden Entwässerungsgräben ohne naturschutzfachlichen Eingriff durch Grabenverbau die höchsten DOC-Austräge. Allerdings wurden Einzugsgebiete mit unterschiedlicher naturräumlicher Ausstattung verglichen. Die Ergebnisse lieferten für Testflächen in Mooren mit unterschiedlicher Landnutzung (Grabenräumung, natürliche Verlandung und ökotechnischer Grabenverbau) DOC-Frachten von 0,03 bis 20,5 kg/ha/d (Testfläche Carlsfeld, EZ Talsperre Weiterswiese). Eine Mobilisierung von DOC insbesondere unter wechselnden Milieubedingungen wurde in aktuell zuwachsenden Entwässerungsgräben im Vergleich zu intakten Moorbereichen und zu bereits verlandeten Entwässerungsgräben beobachtet (KRÜGER & NEUMEISTER 2005). Für die erzgebirgischen Hochmoore wurden Untersuchungen bezüglich des DOC-Austrages von GRUNEWALD et al. (2005) publiziert. In bewaldeten Einzugsgebieten liefern verschiedene Quellen unterschiedlich hohe Anteile an potentiell mobilisierfähigen DOC-Frachten: Niederschlag 2,5 kg/ha, Moder 55 kg/ha, Rohhumus 220 kg/ha, Torf (d-SGo Horizonte) 2000 kg/ha, Torf (d-Hn-Horizonte) 10 000 kg/ha (GRUNEWALD & SCHEITHAUER, 2006). Ergebnisse für Oberflächenwässer in moorbedeckten britischen Einzugsgebieten wurden mit durchschnittlichen Werten von 250 t C/a von WORRALL & BURT (2004) gefunden.

WORRALL et al. (2007B) haben erfolgreich die DOC-Flüsse in moorbedeckten Trinkwassereinzugsgebieten modelliert. Dort wurde die DOC-Produktion bis zur aeroben Zone vom Grundwasserstand kontrolliert. Die Argumente von WORRALL et al. (2007B) zeigten, dass die Wasserstandsanhhebung ein möglicher Mechanismus für eine zeitlich begrenzte Produktion von DOC darstellt. WORRALL et al. (2007A) stellten fest, dass der steigende DOC-Austrag nach Wasserstandsanhhebung nur in einem zeitlich begrenzten Anfangsstadium stattfindet.

Im Vergleich zu Untersuchungen des Stoffumsatzes in wiedervernässten Niedermooren (KALBITZ et al. 1999, GELBRECHT & ZAK (2007) ) wurden in **wiedervernässten Hochmooren** bisher wenige Studien zu den dadurch bedingten veränderten Stoffausträgen durchgeführt. Einige Untersuchungen in Hochmooren legen eine Verringerung der DOC-Austräge nach Anstau von Gräben nahe (WALLAGE et al. 2006). WORRALL et al. (2007B) zeigten einen Rückgang der DOC-Austräge um bis zu 39 % nach Grabenanstau, insbesondere bei geringeren Grabenabständen. Für unberührte Torfeinzugsgebiete wurde für den modellierten Zeitraum 2002-2012 von den Autoren eine im Vergleich zum Zeitpunkt davor steigende DOC-Produktion um bis zu 3 % pro Jahr prognostiziert. Entwässerte Torfgebiete exportieren als Funktion des Grabenabstandes nach solchen Modellierungen 15-33 % mehr DOC. Bei hohen Abständen der verbauten Gräben werden möglicherweise keine Verbesserungen betreffend einer Minimierung des DOC-Austrages erzielt, so dass sich das Verhalten dem der unberührten Moore annähert.

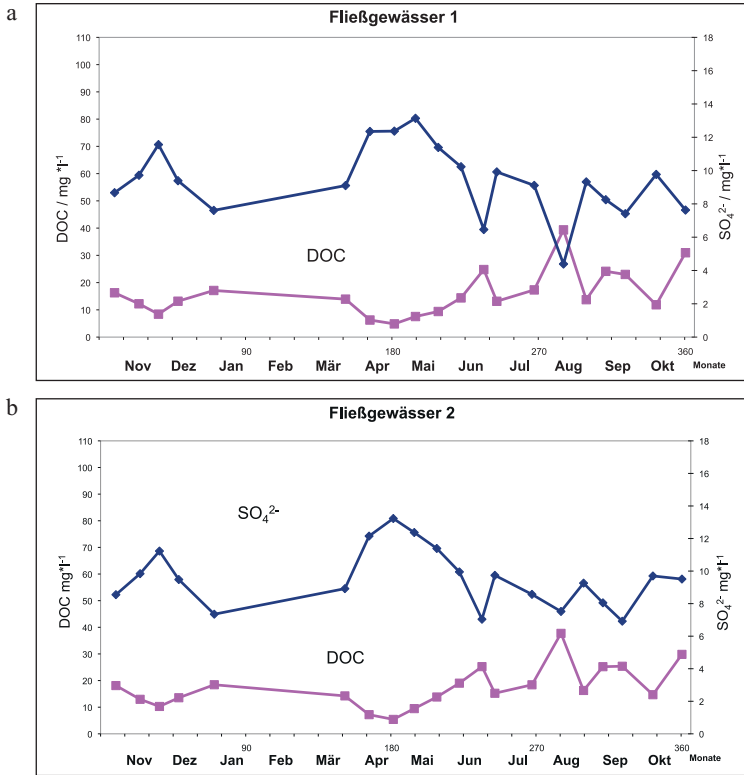


Abb. 6a,b: Beziehung zwischen Sulfatkonzentrationen und DOC-Konzentrationen in den Fließgewässern des Systemes „Wilzsch“: Messpunkte FG 1 und FG 2 (vgl. Abb. 1). Relationship between DOC-concentration and the concentration of  $\text{SO}_4^{2-}$  ions in „discharge system“ of the river Obere Wilzsch, sampling points FG 1 and FG 2 (see fig. 1).

Unser Untersuchungsgebiet des Hochmoores Große Säure sowie die vermoorten Fichtenforsten des Einzugsgebietes der Oberen Wilzsch sind sehr stark durch Entwässerung bzw. initiierte Moor-Regenerierung nach Graben-Verbau gekennzeichnet. Damit ist eine Veränderung der hydrologischen Verhältnisse verbunden, welche sich in vormals sinkenden, jetzt variierenden/steigenden Grundwasserständen widerspiegeln. Diese Prozesse gehen mit Veränderungen der Torfeigenschaften nach Mineralisierungs- und Humifizierungsprozessen (Zersetzung, Torfschwund, Torfsackung), aber auch bei steigenden Grundwasserständen mit Torfwachstum einher.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Veränderung der Redoxbedingungen sich direkt auf die Stoff-Mobilisierung auswirkt. Im aeroben Bereich findet im Zusammenhang mit mikrobiellen Umsatzprozessen die Bildung löslicher Huminstoff-Fraktionen statt (autochthone Herkunft). Bei trockenerer Witterung wird aus Sulfiden bei Sauer-

stoffzutritt nach Oxidation Sulfat gebildet, mit dessen Vorhandensein die Ionenstärke steigt und damit die DOC-Löslichkeit gemindert wird. Erst nach Wasserstandsanhhebung wird dieser Minderung wieder entgegengewirkt, die DOC-Löslichkeit steigt wieder. Somit stellen insbesondere variierende Grundwasserstände eine wesentliche Voraussetzung zur DOC-Freisetzung dar.

Die in-situ Bildung von löslichen DOC-Fraktionen wird aufgrund der o.g. Prozesse von äußeren Faktoren, insbesondere durch Niederschlagsereignisse und durch eine veränderte Stoffzusammensetzung der Bestands- und Freilandniederschläge beeinflusst. Der Anstieg des pH-Wertes und der Rückgang der Sulfatdepositionen in den letzten Jahren/Jahrzehnten können somit als eine Ursache des anhaltenden Anstiegs der DOC-Konzentrationen in den Fließgewässern angesehen werden.

Zusammenfassend kann bei Betrachtung aller Einfluss-Faktoren konstatiert werden, dass der Grabenverbau in vorab entwässerten Mooren nach einer anfänglichen Phase des DOC-Anstieges jedoch im Gesamtverlauf zu einem nachhaltigen Absinken der DOC-Freisetzung beiträgt. Über die Zeitdauer der anfänglichen Phasen der DOC-Freisetzung bis hin zum Wirken der Hemmung enzymatischer Torfzersetzung (GELBRECHT & ZAK 2007) können für das Einzugsgebiet der Wilzsch keine detaillierten Angaben gemacht werden. Als wesentlich stellt sich jedoch dabei der Effekt dar, dass der Wasserstand nicht bis ins Katotelm sinkt, in welchem es nach längerer trockener Witterung dann nach Aktivierung des Enzyms Phenoloxidase zur Torfzersetzung und damit zur autochthonen Bildung löslicher DOC-Fraktionen kommen würde. Ein relativ gleichbleibend hoher Grundwasserspiegel und damit verbundene anaerobe Bedingungen bis zum Rand-Bereich des Akrotelms verhindern nach Unterdrückung der Hydrolase-Enzyme diese DOC-Freisetzung.

Unter Berücksichtigung der global sinkenden Sulfatdeposition ist für eine nachhaltige Minimierung des DOC-Austrages aus den erzgebirgischen Mooren die Förderung einer weiteren Torfzersetzung, wie sie durch Entwässerung/Grabenberäumung verursacht wird, kritisch einzuschätzen und zu verhindern.

## 5. Danksagung

Die Untersuchungen wurden finanziell durch das Regierungspräsidium Chemnitz (Az. 6.2.K-043020/Moormonitoring 2006-20089) gefördert. Herrn Sebastian Leuner und Frau Claudia Friedrich wird für die Mitarbeit gedankt.

## 6. Literaturverzeichnis

- AHTIAINEN, M. & HUTTUNEN, P. (1999): Long term effects of forestry management on water quality and loading in brooks. – *Boreal Env.Res.* **4**: 101-114.
- ANDRAE, H. (2008): Mündliche Mitteilung und Datenübergabe zu Jahresflüssen der Stoffeinträge der Hauptelemente im Freiland- und Bestandsniederschlag, 1993-2007, Dauerbeobachtungsfläche Klingenthal des SMUL Sachsen.
- ASTRÖM, M., AALTONEN, E.K. & KOIVUSAARI, J. (2001): Effect on ditching operations on stream water chemistry in a boreal forested catchment. – *The Science of T. Environm.* **279**: 117-129.
- BÖHM, A.K., (2006): Hochmoore im Erzgebirge – Untersuchungen zum Zustand und Stoffaustagsverhalten unterschiedlich degradiierter Flächen. – Dissertation, TU Dresden.
- BURT, T.P. (2003): Monitoring change in hydrological systems. – *The Science of the Total Environment* **310**: 9 - 16.
- CLARK, J., CHAPMANN, P.J., ADAMSON, J.K. & LANE, S.N. (2005): Influence on drought induced acidification on the mobility of dissolved organic carbon in peat soils. – *Global change biology* **11**: 791-809.
- EDOM, F., KESSLER, K. & DITTRICH, I. (2006): Hydrologisches und moorkundliches Gutachten für die wasserrechtliche Genehmigung von Maßnahmen der Wiedervernässung der Großen Brauckmann-Haide am Steinbach (LK Aue Schwarzenberg). – In: DITTRICH und Partner: Hydro Consult GmbH. – Bannewitz, 21.12.2006.
- EDOM, F., MÜNCH, A. & KESSLER, K. (2008a): Wasserhaushalt des Moorgebietes Große Säure im Einzugsgebiet der Wilzsch/Westerzgebirge. – In: DITTRICH und Partner. Hydroconsult GmbH. – Bannewitz, 27.Juni 2008, 14.S.
- EVANS, C.D. & MONTHEITH, D.T. (2001): Chemical trends at lakes and streams in the UK Acid Waters Monitoring Network, 1988-2000: Evidence for recent recovery at a national scale. – *Hydrol. and Earth System Sciences* **5(3)**: 351-366.
- EVANS, C.D., MONTHEITH, D.T. & COOPER, D.M. (2005): Long term increases in surface water dissolved organic carbon: Observations, possible causes and environmental effects. – *Env. Poll.* **137**: 55-71.
- EVANS, C.D., CHAPMAN, P.J., CLARK, J.M., MONTHEITH, D.T. & CRESSERS, M. S. (2006): Alternative explanations for rising dissolved organic carbon from organic soils. – *Global Change Biology* **12**: 2044-2053.
- FRASER, N., ROULET, T. & MOORE, T.R. (2001): Hydrology and dissolved organic carbon biogeochemistry in an ombrotrophic bog. – *Hydr. Process.* **15**: 3151-3166.
- FREEMANN, C., OSTLE, N. & KANG, H. (2001): An enzymatic latch on a global carbon store. – *Nature* **409**: 149.
- GELBRECHT, J. & ZAK, D. (2007): Stoffumsatzprozesse in entwässerten, vernässten und naturnahen Moorböden. – Vortragsprint DWA: 13.02.2007.

- GRUNEWALD, K. & SCHMIDT, W. (HRSG.) (2005): Beiträge zur Landschaftsforschung Bd. 2: Problematische Huminstoffeinträge in Oberflächengewässer im Erzgebirge. Ursachen-Trinkwasserrelevanz-Prognosen-Maßnahmen. – 221 S.; Berlin.
- GRUNEWALD, K. & SCHEITHAUER, J. (2006): Naturschutz contra Wasserschutz? Ziele und Zielkonflikte im Erzgebirge. – In: ERDMANN, K.-H., BORK, H.-R. & HOPF, T. (Hrsg): Naturschutz im gesellschaftlichen Kontext. – Naturschutz und biologische Vielfalt **38**: 165 - 190. – Bundesamt für Naturschutz; Bonn.
- HEJZLAR, J., DUBROVSKY, M., BUCHTELE, J. & RŮŽIČKA, M. (2003): The apperent and potential effect of climate change on the inferred concentration of dissolved organic matter in a temperate stream (The Malše River, South Bohemia). – The science of the Total Environment **310**: 143 - 152.
- KALBITZ, K., RUPP, H., MEISSNER, R. & BRAUMANN, F.(1999): Folgewirkungen der Renaturierung eines Niedermooses auf die Stickstoff-, Phosphor- und Kohlenstoffgehalte im Boden- und Grundwasser. – Z.F. Kulturtechnik und Landesentwicklung **40**: 22-28.
- KÖLLE, W. (2003): Wasseranalysen-richtig beurteilen. – 424 S., 2. akt. und erweiterte Auflage, Weinheim (Wiley VCH Verlag GmbH und Co)
- KRACHT, O. & GLEIXNER, G. (2000): Isotope analysis of pyrolysis products for Sphagnum peat and dissolved organic matter from bog water. – Organic Geochemistry **31**: 645-654.
- KRÜGER, A. & NEUMEISTER, H. (2001): Fichtenforst und Hochmoore im Einzugsgebiet von Trinkwassertalsperren in ihrer Wirkung auf den Stoffhaushalt. – In: Geoöko: Kunst oder Landschaftsdegradation **22**:161-188; Bensheim.
- KRÜGER, A. & NEUMEISTER, H.(2005): Regenerierung entwässerter Hochmoore in bewaldeten Trinkwassereinzugsgebieten des Westerzgebirges – Auswirkungen auf den Stoffhaushalt und die Stoffdynamik. – Mittlg. Dt. Bodenkdl.Ges. **107 (2)**: 493-494.
- KRÜGER, A., NEUMEISTER, H., FRIEDRICH, C., LEUNER, S. & ADLER, P (2008): Erarbeitung und Erprobung eines Monitoringkonzeptes für hydrochemische Parameter im Einzugsgebiet der Oberen Wilzsch und dem regenerierenden Hochmoor „Große Säure“. – Abschlußbericht, Förderung durch das RP Chemnitz, Az 6.2K-043020/Moormonitoring 2006-2008, unveröffentlicht.
- MONTHEITH, D.T., STODDARD, J.L., EVANS, C.D., DE WIT, H.A., FORSIUS, M., HOGASEN, T., WILANDER, A., SKJELKVALE, B.L., JEFFRIES, D.S., VUORENMAA, J., KELLER, B., KOPACEK, J. & VESELY, J. (2007): Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry. – Nature **450**: 537-540.
- NEUMEISTER, H., KRÜGER, A., MEYER, L. & REGBER, R. (1995): Räumliche Differenzierung elementarer geoökologischer Eigenschaften im oberen Westerzgebirge/Oberen Vogtland. – In: Geoforum, Freiberg (Sachsen). – 25 S.
- SCHEITHAUER, J. & GRUNEWALD, K.(2006): Biogeochemie von Hochmoortorfen und Umweltwandel im Erzgebirge (Mitteleuropa). – Telma **36**: 169-188; Hannover.
- STEINBERG, CH. & KRÜGER, A. (2011): Hochmoore im Erzgebirge: Liegt die Störung wirklich in den Mooren? – Wasser und Abfall **5** (2011): 41-45.



- WALLAGE, Z.E., HOLDEN, J. & McDONALD, A.T. (2006): Drain blocking: an effective treatment for reducing DOC loss and water discolouration in a drained peatland. – *Science of the Total Environment* **367**: 811-821.
- WORRALL, F. & BURT, T. (2004): Time series analysis of long-term river dissolved organic carbon records. – *Hydrological Processes* **18**: 893-911.
- WORRALL, F., ARMSTRONG, A. & HOLDEN, J. (2007A): Short-term impact on peat drain blocking on water colour, dissolved organic carbon concentration and water table depth. *J.of Hydrology* **337**: 315-325.
- WORRALL, F., GIBSON, H.S. & BURT, T.P. (2007B): Modelling the impact of drainage and drainage blocking on dissolved organic carbon release from peatlands. – *J. of Hydr.* **338**. 15-27.

Anschriften der Verfasser:

Dr. A. Krüger  
Prof. Dr. J. Heinrich  
Prof. Dr. H. Neumeister  
Universität Leipzig  
Johannisallee 19a  
D-04103 Leipzig  
E-Mail: [akrueger@rz.uni-leipzig.de](mailto:akrueger@rz.uni-leipzig.de)

Dr. D. Tolke  
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie  
Außenstelle Zwickau  
Postfach 20 09 02  
D-08009 Zwickau

Manuskript eingegangen am 12. August 2011

