TELMA	Band 43	Seite 39 - 54	2 Abb., 4 Tab.	Hannover, November 2013

Auswirkung des Grabenverbaues zur Hochmoorrevitalisierung auf DOC-Konzentrationen im Einzugsgebiet der Talsperre Carlsfeld

Effects of trench blocking for bog revitalisation on the DOC-concentrations in the Carlsfeld Dam catchment area

INGO DITTRICH, KARIN KESSLER, ANNETT KRÜGER
und HANS NEUMEISTER

Zusammenfassung

In den letzten zwei Jahrzehnten ist die Konzentration an gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) in einigen Talsperren des Erzgebirges wie auch in vielen Regionen der nördlichen Hemisphäre gestiegen. Seitens der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen als Rohwasserlieferant und der örtlichen Trinkwasserversorger wird befürchtet, dass sich die DOC-Konzentration in den Fließgewässern und Talsperren durch Moorrevitalisierung zusätzlich erhöht. Anhand von Monitoringdaten für den Zeitraum 2006 bis 2011 wird gezeigt, dass der Grabenanstau auf einer kleinen Regenerationsfläche (4,2 ha bzw. max. 4 % des Einzugsgebietes der Talsperre Carlsfeld) nicht zu erhöhten DOC-Konzentrationen in den anliegenden Fließgewässern geführt hat. Die Ergebnisse werden mit aktueller internationaler Literatur verglichen.

Abstract

In the last two decades, the concentration of dissolved organic carbon (DOC) has increased in some of the dams of the Ore Mountains, as well as in many regions in the northern hemisphere. It is feared by the State Dam Authority of Saxony and by local drinking water suppliers, that through the revitalisation of bogs, the DOC-concentration in rivers and dams will increase further. According to monitoring data for the time period of 2006 to 2011, it is evident that the blocking of ditches in a small bog revitalisation area (4.2 ha or max. 4 % of the Carlsfeld dam catchment area) did not lead to an increased DOC concentration in the adjoining rivers. The results are compared with current international literature.

1. Einleitung

Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC - **D**issolved **O**rganic **C**arbon) entsteht beim unvollständigen Abbau organischen Materials. In den letzten Jahrzehnten wurde im Zufluss von Talsperren im Erzgebirge wie auch in vielen Regionen der nördlichen Hemisphäre ein Anstieg der DOC-Konzentrationen festgestellt. Für die Trinkwasseraufbereitung können durch steigende DOC-Konzentrationen zusätzliche Aufbereitungsschritte notwendig werden und sich dadurch die Betriebskosten erhöhen (z. B. SUDBRACK et al. 2005, HEISER & SUDBRACK 2007). Neben überregionalen Faktoren, wie der Abnahme atmosphärischer Säuredeposition und sich ändernden Klimabedingungen (Temperaturanstieg, Niederschlagsverteilung und -intensität, vgl. PŘIKRYL 2004, EVANS et al. 2006, ROULET & MOORE 2006, MONTEITH et al. 2007, ONI et al. 2013), wird die veränderte Nutzung organischer Böden als Ursache für steigende DOC-Einträge in die Fließgewässer kontrovers diskutiert.

Insbesondere wird befürchtet, dass durch die aktive oder passive Wiedervernässung von Mooren der DOC-Gehalt in den Fließgewässern und Talsperren deutlich ansteigt (vgl. BÖHM 2005, SUDBRACK et al. 2005, HEISER & SUDBRACK 2007, GRUNEWALD et al. 2009, 2011). In anderen Studien kam man zu dem Ergebnis, dass durch die Wiedervernässung entwässerter Moore die DOC-Konzentration eher abnimmt (PŘIKRYL 2004, WALLAGE et al. 2006, KRÜGER et. al. 2008, BUFKOVA et al. 2008, 2010, HÖLL et al. 2009). Dadurch stehen für Moore im Einzugsgebiet von Talsperren im sächsischen Erzgebirge zwei gegenläufige Handlungsoptionen zur Bewirtschaftung zur Debatte:

- der Verschluss der Gräben durch autogene Regeneration, z. T. unterstützt durch aktiven Verbau (Staue) mit dem Ziel, die natürlichen Funktionen der Moore sowohl als Lebensraum als auch im Wasser- und Stoffhaushalt der Landschaft wiederzubeleben,
- die regelmäßige Grabenpflege (klassische Moorentwässerung) mit der Absicht, den DOC-Export aus den Mooren in die Talsperren zu verringern.

Die regelmäßige Grabenpflege und die damit fortgesetzte Entwässerung der Moore steht im Konflikt zum naturschutzfachlichen und klimapolitischen Ziel der Moorrevitalisierung. Vor allem in FFH-Gebieten besteht die europaweite Verpflichtung, Moorlebensräume in einem guten Zustand zu erhalten oder, bei schlechterem Zustand, durch Maßnahmen in einen guten Zustand zu überführen. Gleichzeitig konnte bislang nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden, ob eine Grabenräumung tatsächlich zu einer Abnahme bzw. der Grabenanstau zu einem massiven Anstieg des DOC-Exportes führt und sich diese Maßnahmen wesentlich auf die Wasserqualität der Talsperren auswirken.

Ab Herbst 2007 wurden im Einzugsgebiet der Talsperre Carlsfeld auf der 4,2 ha großen Revitalisierungsfläche „Große Säure“ Grabenverbaue durchgeführt. Das begleitende hydrochemische Monitoring soll zusammengefasst folgende Fragen beantworten:

- Gibt es **Beschaffenheitsunterschiede** zwischen Teilgebieten und einzelnen Messstellen **vor der Ausführung von Revitalisierungsmaßnahmen? Räumlicher Aspekt:** berücksichtigt meist zeitinvariante Morphologie und Geologie, Ausgangszustand.
- Wie verhält sich die **Beschaffenheitsentwicklung** mit der Zeit **in Teilgebieten oder Messstellen mit und ohne Revitalisierungsmaßnahmen? Zeitlicher Aspekt:** gekoppelt an zeitvariante Witterung, Vegetationsänderung, Maßnahmewirkung usw.; Folgezustand.

Eine Auswertung der Monitoringdaten für das Hydrologische Jahr 2007 (1.11.2006 - 31.10.2007) wurde von Krüger et al. (2011) veröffentlicht. Die Monitoringdaten für die Jahre 2006 bis 2011 in Bezug auf die Entwicklung der DOC-Konzentrationen und -frachten wurden statistisch und im Hinblick auf das geochemische Reaktionsverhalten von Kessler & Dittrich (2011) und Siegert (2012) ausgewertet. Sie werden hier vorgestellt und diskutiert.

2. Material und Methoden

Die Talsperre Carlsfeld befindet sich im Westerzgebirge bei ca. 900 m NHN und ist damit die höchstgelegene Talsperre im Freistaat Sachsen. Gleichzeitig liegt sie im regenreichsten Gebiet des Erzgebirges. Die langjährige mittlere Niederschlagssumme beträgt an der Station Carlsfeld Talsperre 1219 mm (unkorrigiert) bzw. 1335 mm (korrigiert, Zeitraum 1961 bis 1990). Zusätzlich wird im bewaldeten Einzugsgebiet Niederschlag aus dem Nebel ausgekämmt. Der Nebelniederschlag wird im Untersuchungsgebiet auf 120 bis 200 mm/a geschätzt; die mittlere Lufttemperatur beträgt 4,4 °C (Münch & Kessler 2008). Aufgrund der kühlen und feuchten Witterung der Kammregion sind Hochmoore und vermoorte Fichtenforste auf den lehmigen Verwitterungsböden des Eibenstocker Turmalingranits weit verbreitet (Krüger & Neumeister 2001). Im Einzugsgebiet der Talsperre Carlsfeld nehmen Torfe und organische Nassböden gemäß der Bodenkonzeptkarte BK_{konz} 30 % des Einzugsgebietes ein, im Einzugsgebiet des Hauptzuflusses Wilzsch sogar 40 %. Die Torfe und anmoorigen Bereiche befinden sich vor allem in den Tälchen der Zuflüsse und auf dem Erzgebirgskamm (Abb.1).

Alle Moore sind durch Entwässerungsgräben oder Torfabbau anthropogen beeinflusst. Trotzdem sind im Großen Kranichsee, im Kiebickenmoor und im Tal der Wilzsch noch wertvolle Moorlebensraumtypen vorhanden, die nach Anhang II der FFH-Richtlinie (92/43/EWG) geschützt sind und für die zum Teil Erhaltungsmaßnahmen notwendig sind. Im Einzugsgebiet der Wilzsch liegen die wertvollsten Moore und die Maßnahmenfläche zur Moorrevitalisierung „Große Säure“. In diesem Einzugsgebiet wurde 2006 ein Messnetz für das langfristige Monitoring der Wasserbeschaffenheit durch die Universität Leipzig angelegt (Krüger et. al. 2008). Es wurden fünf Fließgewässermessstellen (FG) eingerichtet. Die Messstellen FG4, FG2 und FG1 liegen in Fließrichtung an der Wilzsch.

FG4 und FG2 liegen vor und nach der Maßnahmenfläche. FG1 ist der Zulaufpegel der Talsperre Carlsfeld. Die Messstellen FG5 und FG3 liegen in Fließrichtung an der Kranizsch, die dann kurz unterhalb von FG2 in die Wilzsch mündet. Für jede Messstelle wurde das jeweilige Teileinzugsgebiet (TEZG) ermittelt. Die Lage der Messstellen, der messstellenbezogenen Teileinzugsgebiete und die Revitalisierungsfläche (4,2 ha), in der jeweils im Herbst 2007 und 2008 insgesamt 60 Staue angelegt wurden, sind in Abbildung 1 eingetragen. Zusätzlich wurden neun Grundwassermessstellen (GWM) in der Revitalisierungsfläche und eine GWM in der Talsohle der Wilzsch eingerichtet (vgl. KRÜGER et al. 2011). Die Tabelle 1 zeigt die zeitliche und räumliche Abfolge der Revitalisierungsmaßnahmen für die Teileinzugsgebiete der Talsperre Carlsfeld.

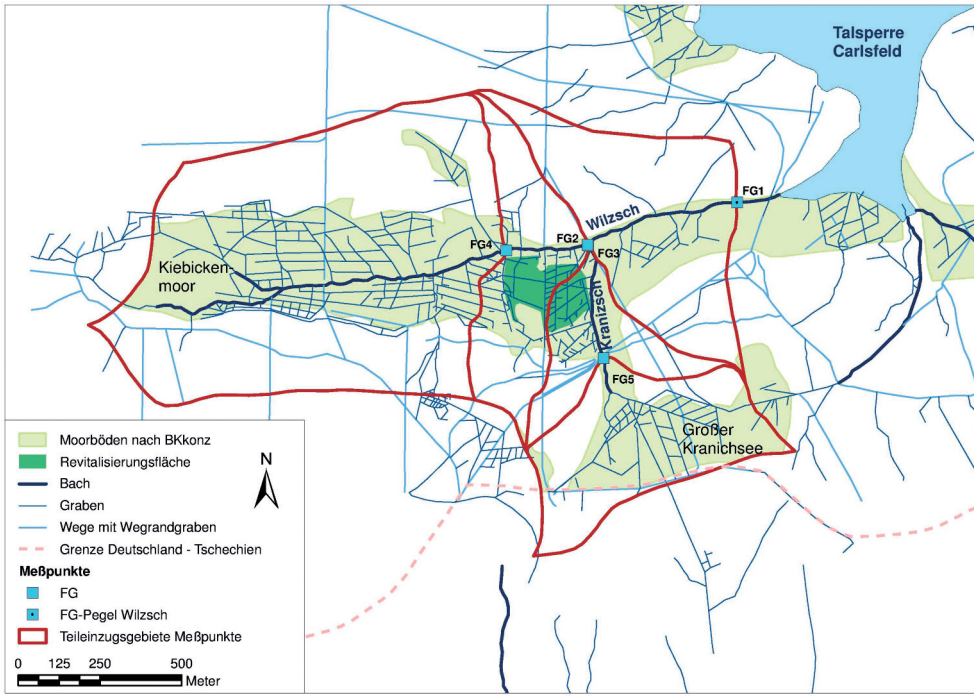

Abb. 1: Lageplan des Maßnahmengebietes Große Säure, Oberflächenmessstellen und Teileinzugsgebiete.
Sitemap of the measurement area „Große Säure“, the surface monitoring stations, and subbasins.

Die Messstellen wurden in der schneefreien Zeit in zweiwöchigem Abstand beprobt. Neben den Vor-Ort-Parametern Temperatur, elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert wurden unter anderem Dissolved Organic Carbon (DOC), Total Organic Carbon (TOC), Inorganic Carbon (IC), der spektrale Absorptionskoeffizient SAK_{254}, Sulfat, Eisen, Alumini-

Tab. 1: Zeitliche und räumliche Abfolge von Revitalisierungsmaßnahmen in Teileinzugsgebieten der Talsperre Carlsfeld (Lage der Messstellen und Teileinzugsgebiete vgl. Abb.1)
Temporal and spatial sequence of revitalisation measures in subbasins of the Carlsfeld Dam (See Figure 1 for the location of the observation points and subcatchment areas)

Fließgewässer		**Wilzsch**		**Kranizsch**		**Gesamtgebiet Zuflusspegel**
Teilgebiete		FG4	FG2 = FG4+TEZG	FG5	FG3 = FG5 + TEZG	FG1 = FG2+FG3+TEZG3
Zeitraum und **Maßnahmen**	2006 - 2007	**keine**				
	2007 - 2010	**keine**	**Herbst 2007 Herbst 2008**	**keine**	**Herbst 2007 Herbst 2008**	**Herbst 2007 Herbst 2008**
Fläche in ha		85	104	24,7	36,5	172,3
Zugehörige Maßnahmefläche in ha		0	2,6	0	1,6	4,2
Anteil der Maßnahmefläche in %		0	2,5	0	4,4	2,4

um, Mangan, ortho-Phosphat, Ammonium, Nitrat, organisch gebundener Stickstoff N_{org}, gesamt gebundener Stickstoff TNb und weitere An- und Kationen sowie Spurenelemente bestimmt (vgl. KRÜGER et al. 2011).

Beschaffenheitsdaten lagen für Fließgewässer für den Zeitraum 9.11.2006 bis 16.11.2010, für das Grundwasser vom 9.11.2006 bis 19.7.2011 vor. Ab 2009 übernahmen der Naturpark Erzgebirge/Vogtland und die Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) das Monitoring. Im Jahr 2009 besteht eine größere Datenlücke. Durchflussdaten liegen prinzipiell für den Zulaufpegel (FG1) vor, standen uns aber für die Auswertung nicht zur Verfügung.

3. Ergebnisse

3.1 Fließgewässermonitoring

Die diskontinuierliche Probenahme ist bedeutsam für die späteren Aussagen. Die Verteilungsfunktion der Beschaffenheitsparameter über einen bestimmten Zeitraum wird meist entscheidend durch die meteorologisch-hydrologischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Probenahme geprägt. Findet die Probenahme überwiegend in Trockenzeiten statt, ergibt sich eine andere Verteilung als bei einer überwiegenden Probenahme in Nasszeiten. Insgesamt ist aber bei gleichzeitiger Probenahme zumindest die flächenhafte Aussagesicherheit gewährleistet, die ereignisspezifische Aussagesicherheit bleibt eingeschränkt.

Wir betrachten die Monitoringergebnisse für DOC in Fließrichtung über den gesamten Datensatz. An der Wilzsch liegen die Messstellen FG4, FG2 und FG1 (Zuflusspegel zur Talsperre), an der Kranizsch die Messstellen FG5 (Abfluss aus dem Großen Kranichsee) und FG3 (Abb.1). Die Wasserbeschaffenheit an FG1 ergibt sich aus der wassermengengewichteten Beschaffenheit FG2 + FG3 zuzüglich der Beschaffenheitsmodifikation durch das Teileinzugsgebiet TEZG3 bis zum Zuflusspegel FG1.

Die DOC-Werte aller Fließgewässermessstellen FG sind **nicht normalverteilt**. Es liegen linksschiefe Verteilungen vor, bei denen die kleineren DOC-Konzentrationen häufiger sind als die großen Konzentrationswerte. Wegen der Nichtnormalverteilung scheiden einfache Tests, beispielsweise auf Mittelwertgleichheit oder auch das Pearson‘sche Korrelationsmaß, für eine Analyse aus.

Tabelle 2 mit den verteilungsfreien Spearman‘schen Rangkorrelationskoeffizienten zeigt für die Gesamtdatenreihe hochsignifikante Zusammenhangsmaße (α = 0,01; n = 53). Folglich reagieren **alle** Messstellen im Wilzscheinzugsgebiet **gleichsinnig**: Mit einer hohen/niedrigen DOC-Konzentration an einer Messstelle sind gleichzeitig hohe/niedrige DOC-Konzentrationen an allen anderen Messstellen vorhanden.

Tab. 2: Spearman’sche Rangkorrelationskoeffizienten der paarweisen DOC-Konzentrationen (Lage der Fliessgewässermessstellen vgl. Abb.1)
Spearman rank correlation coefficients of the pairwise DOC-concentration (See Figure 1 for the location of watercourse measurement points)

Spearman Rangkorrelation, n = 53	**FG4**	**FG2**	**FG5**	**FG3**	**FG1**
FG4	1				
FG2	0,970	1			
FG5	0,984	0,935	1		
FG3	0,879	0,918	0,946	1	
FG1	0,963	0,970	0,943	0,914	1

Die DOC-Zeitreihen wurden in zwei Zeitabschnitte (1) 2006-2007 und (2) 2007-2010 (zeitlicher Aspekt des Monitorings) geteilt und einige statistische Parameter ermittelt. In Tabelle 3 wird neben beiden Zeitabschnitten die Fließgewässer- bzw. Fließrichtungsgruppierung (räumlicher Aspekt) berücksichtigt. FG1 mit dem „Mischwasser“ aus Wilzsch (FG2) und Kranizsch (FG3) ist in beiden Fließrichtungsgruppierungen enthalten.

Räumlicher Aspekt:

- Sowohl in der Kranizsch als auch in der Wilzsch nimmt der DOC-Median in Fließrichtung in beiden Zeitabschnitten ab. Der Median von FG2 (Oberlauf der Wilzsch) und FG1 (Mischwasser aus Wilzsch und Kranizsch) ist höher als der Median der Kra-

Tab. 3: Statistische Parameter der gemessenen DOC-Konzentrationen in mg/l
Statistic parameters of the measured DOC-concentrations in mg/l

Gewässer		**Wilzsch**			**Kranizsch**			**Spannweite**
Fließgewässermeßstelle		FG4	FG2	FG1	FG5	FG3	FG1	in (1) und (2)
(1) 2006 - 2007	Stichprobenumfang	14	14	14	14	14	14	
	Minimum	6,6	5,4	4,9	2,1	2,5	4,9	2 - 5
	Maximum	27,4	25,2	24,8	34,1	28,3	24,8	25 - 34
	Spannweite	21	20	20	32	26	20	20 - 32
	Median	**15,6**	**14,0**	**13,2**	**13,3**	**10,9**	**13,2**	**11 - 16**
(2) 2007 - 2010	Stichprobenumfang	39	40	40	40	39	40	
	Minimum	9,3	6,6	4,3	2,0	2,8	4,3	2 - 9
	Maximum	51,6	52,1	54,5	61,5	53,2	54,5	52 - 62
	Spannweite	42	46	50	59	50	50	42 - 60
	Median	**17,0**	**14,8**	**12,3**	**11,6**	**9,9**	**12,3**	**10 - 17**
Mediandifferenz (2) - (1)		**1,4**	**0,8**	**-0,9**	**-1,7**	**-1,0**	**-0,9**	
Spannweitendifferenz (2) - (1)		**21**	**26**	**30**	**27**	**24**	**30**	

nizsch kurz vor der Mündung in die Wilzsch (FG3, Lage der Messstellen FG, vgl. Abb.1). Die Kranizsch verdünnt damit das Wasser in der Wilzsch.

- Beachtenswert sind die relativ hohen Minimumkonzentrationen der Wilzsch (FG4 und FG2). Verglichen damit sind die Minimumkonzentrationen der Kranizsch (FG5 und FG3) deutlich kleiner.
- Die Kranizsch weist gegenüber der Wilzsch die höheren Maximumkonzentrationen und damit auch die höheren Spannweiten auf.

Zeitlicher Aspekt:

- Im Zeitabschnitt (1) ist der Median des DOC in der Kranizsch (FG5 und FG3) etwas größer als im Zeitabschnitt (2): Die DOC-Konzentration ist im Laufe der Zeit insgesamt in **beiden** Teilgebieten gesunken. An der Wilzsch (FG4 und FG2) ist der Median in **beiden** Teilgebieten leicht gestiegen. **Revitalisierungsmaßnahmen innerhalb der Teilgebiete FG2 und FG3 bewirkten bezogen auf den Monitoringzeitraum 2006-2011 kein Absinken oder Ansteigen der DOC-Konzentration im Vergleich zu den Gebieten ohne Maßnahmen.**
- Die DOC-Spannweite ist an allen FG im Zeitabschnitt (2) größer als im Zeitabschnitt (1): Dies ist wegen der in beiden Zeitabschnitten nahezu identischen Minimalwerte auf witterungsbedingt deutlich höhere Maximalwerte zwischen 52 und 62 mg/l in **allen** Teilgebieten zurückzuführen.

Tabelle 4 zeigt die aus den Mediankonzentrationen berechneten Frachten für die einzelnen Fließgewässermessstellen. Generell ist die DOC-Fracht aus Einzugsgebieten mit einem hohen Anteil an Moor- und Torfböden größer als aus terrestrischen Einzugsgebieten (AITKENHEAD & MCDOWELL 2000). Daher ist der Mooranteil in der Tabelle mit aufgeführt. Die mittlere Abflussspende liegt nach MÜNCH & KESSLER (2008) im Einzugsgebiet der Talsperre Carlsfeld bei 30,7 l/(s·km2). Interessanterweise haben die Teileinzugsgebiete mit den höchsten Mooranteilen (FG5 und FG3 mit 68 bzw. 62 %) kleinere Frachten als Teileinzugsgebiete mit geringerem Mooranteil (FG4 und FG2 mit je 40 %). Am Oberlauf der Kranizsch (FG5) entspricht der Anteil der DOC-Fracht dem Flächenanteil. Vor der Mündung der Kranizsch (FG3) in die Wilzsch liegt der Frachtanteil mit 18 % unter dem Flächenanteil von 22 %. An der Wilzsch (FG2) liegt der Frachtanteil mit 76 % deutlich über dem Flächenanteil von 61 %.

Tab. 4: DOC-Fracht unterschiedlicher Einzugsgebietsteile der Wilzsch im Zeitraum 2007-2010
DOC-load of different subbasins of the Wilzsch from 2007-2010

Fließgewässer	**Wilzsch**		**Kranizsch**		**Gesamtgebiet Zuflusspegel**
Teilgebiete	FG4	FG2 = FG4+TEZG	FG5	FG3 = FG5 + TEZG	FG1 = FG2+FG3+TEZG
Zeitraum und **Maßnahmen** 2007 - 2010	**keine**	**Herbst 2007 Herbst 2008**	**keine**	**Herbst 2007 Herbst 2008**	**Herbst 2007 Herbst 2008**
Fläche A in km²	0,85	1,04	0,247	0,365	1,723
Moor- und Anmoorböden nach der Bodenkonzeptkarte BK_{konz} in km²	0,34	0,42	0,17	0,23	0,70
Mooranteil in %	40	40	68	62	41
Median der DOC-Konzentration C im Zeitabschnitt (2) in mg/l	17	15	12	10	12
Mittlere Abflussspende q in l/(s·km²)	30,7				
Mittlere DOC-Fracht C·q·A in mg/s	444	**479**	92	**114**	634
Frachtanteil an FG1 in %	62	**71**	13	**17**	100
Flächenanteil an FG1 in %	49	**60**	14	**21**	100

3.2 Grundwassermonitoring

Da nicht alle früher geplanten Staue im Maßnahmegebiet Große Säure gebaut wurden, liegen nur vier Grundwassermessstellen (GWM) in der Nähe angestauter Gräben. Im Hochmoor Große Säure wurden von KRÜGER et al. (2008, 2011) die unterschiedlich zu charakterisierenden Abschnitte der Großen Säure in Funktionsbereiche differenziert. Drei GWM

liegen im tief entwässerten Funktionsbereich 2, der mit einem durch Borkenkäferbefall lichter werdenden Fichtenhochwald bestockt ist. In keiner der drei Messstellen konnte ein eindeutiger Grundwasseranstieg infolge der Staumaßnahmen festgestellt werden. Mit 3 bis 5 % Grabengefälle wirken sich die Staumaßnahmen nur lokal aus. Bei zunehmender Grabenverlandung ist in der Fläche mit einem langsamen Anstieg des Grundwasserstandes zu rechnen. Der Verlauf der DOC-Konzentrationen und anderer Wasserinhaltsstoffe ist in den drei Messstellen sehr heterogen und unabhängig vom Grundwasserstand (Krüger et al. 2008, Siegert 2012). Wahrscheinlich sind Zusammenhänge zur Witterung, den davon abhängigen Fließwegen im Torf und zu Veränderungen der Vegetation. Ein Trend ist gegenwärtig nicht festzustellen.

Im regenerierenden Funktionsbereich 5 mit der GWM10 waren bereits vor dem Baubeginn der Staue die Grundwasserstände nahezu flurgleich. Durch die schwach ausgeprägte Muldenform wird der Funktionsbereich sowohl von Niederschlägen als auch von seitlichen Zuflüssen gespeist. Zudem wurden schon 1992 20-40 cm mächtige Staustufen aus Holz errichtet (Revierförster a.D. Rohrbach, 1997, zit. in Krüger et al. 2008). Bei Torfbohrungen im Jahr 2007 wurden 33 cm schwach zersetzter Torfmoostorf (H2 bis H4) über einer stark zersetzten Torfschicht (H7) gefunden (Edom et al. 2009). In ca. 15 Jahren konnte sich durch die günstigen hydromorphologischen Bedingungen ein aufwachsendes Moor entwickeln.

Das GWM10 repräsentiert ideal eine Regenerationsfläche mit aufwachsendem und durchströmtem Akrotelm.

In Abbildung 2 ist der Verlauf der DOC-Konzentrationen und der Sulfatkonzentrationen für den Monitoringzeitraum dargestellt. Sulfat hat einen großen Einfluss auf die Löslichkeit von DOC. Hohe Sulfatkonzentrationen bewirken eine stärkere Versauerung sowie eine größere Ionenstärke in der Bodenlösung, wodurch die DOC-Löslichkeit verringert wird (Evans et al. 2006, Monteith et al. 2007, Clark et al. 2005). Auffällig ist das innerjährliche Muster mit höheren DOC-Konzentrationen im Sommer und niedrigen DOC-Konzentrationen im Winter sowie die tendenzielle DOC-Abnahme über den Gesamtbeobachtungszeitraum. Dieses Muster wurde nur in der GWM10 beobachtet. Der Verlauf der Sulfat-Konzentration ist innerhalb eines Jahres invers zum Verlauf der DOC-Konzentrationen. Bei hohen DOC-Konzentrationen wurden niedrige Sulfatkonzentrationen gemessen. Der inverse Verlauf von DOC und Sulfat wurde auch in den Fließgewässern festgestellt (Krüger et al. 2008, Siegert 2012). Die hier ausgewerteten langfristigen Monitoringergebnisse **bestätigen** die Ergebnisse vorangegangener Untersuchungen (Krüger et al. 2008) sowie den oben angeführten Sulfateinfluss auf die DOC-Löslichkeit.

Vergleicht man die Konzentrationen der einzelnen Jahre untereinander, so wurden im Herbst 2006 sowohl die höchsten DOC- als auch Sulfat-Konzentrationen gemessen. In den Folgejahren lag das generelle Konzentrationsniveau bei beiden Parametern niedriger.

Dieses längerfristige Verhalten wurde ebenfalls nur in der GWM 10 beobachtet. **Im nahezu ständig wassergesättigten Regenerationsbereich scheinen noch weitere Prozesse als der oben angeführte Sulfat-Rückgang wirksam zu sein, die in weiteren Untersuchungen aufzuklären sind.**

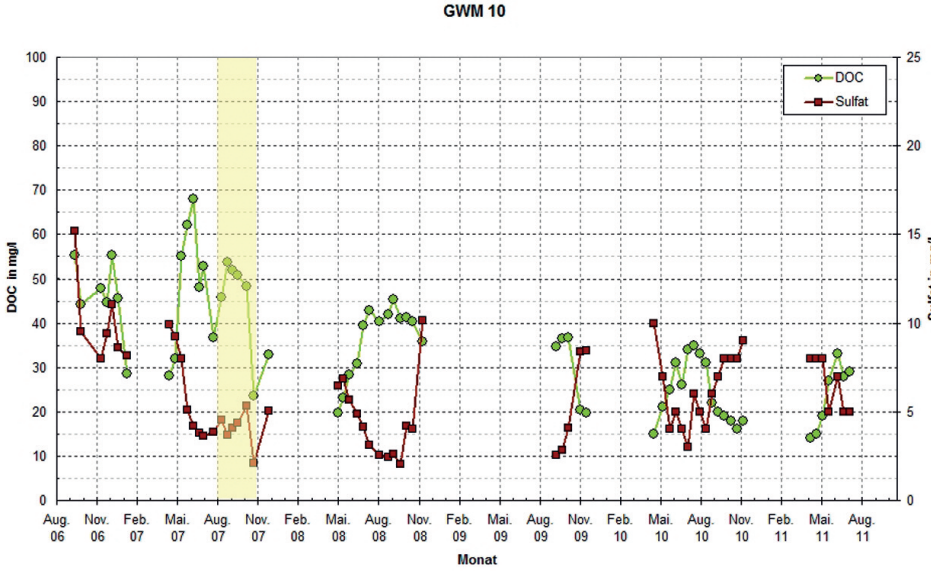

Abb. 2: Verlauf der DOC- und Sulfat-Konzentrationen im regenerierenden Funktionsbereich 5 (Grundwassermessstelle 10) (Gelb hinterlegt ist die Bauzeit der Staue)
Behaviour of DOC and Sulphate concentrations in regenerated functional area 5 (ground water monitoring station 10) (The construction time of the dams is highlighted in yellow)

4. Diskussion

Wie die Ergebnisse zeigen, gibt es einige Unterschiede im Austragsverhalten des DOC in den einzelnen Teilgebieten (räumlicher Aspekt). Die allgemeine Abnahme des DOC in Fließrichtung kann sowohl auf Verdünnungseffekte als auch auf Abbauprozesse im Fließgewässer zurückzuführen sein. Auffällig sind die niedrigeren DOC-Konzentrationen und Frachten aus dem Teileinzugsgebiet der Kranizsch, obwohl dieses Gebiet den größten Mooranteil aufweist. Da sich die Moorflächen stark in Bezug auf Entwässerungsintensität und Vegetation unterscheiden, ist ein Zusammenhang mit dem Moorzustand wahrscheinlich. Die Moorflächen im Teileinzugsgebiet Kranizsch gehören zum Großen Kranichsee, der durch alte, bis heute aktive Entwässerungsgräben geschädigt ist (Neumeister & Krüger 2001, Kessler & Dittrich 2011). Trotzdem weist er mit großflächigen Bergkiefer-Moorwaldbeständen und letzten Resten offenen Hochmoores eine noch relativ typische Moorvegetation auf (Rentsch & Zitzewitz 2005). Dem gegenüber sind die meisten Moorflächen im Oberlauf der Wilzsch massiv entwässert und degradiert. Außer zwei klei-

neren Bergkiefer-Moorwäldern, von denen einer abgängig ist, stocken vor allem Fichten auf den Mooren, die in sehr nassen Bereichen auch als Fichten-Moorwald kartiert wurden (Rentsch & Zitzewitz 2005, Kessler & Dittrich 2011). Mit dem Moorzustand ist der räumliche Aspekt bereits mit dem zeitlichen Aspekt gekoppelt, der im Folgenden näher betrachtet wird.

Nach Clark et al. (2010) ist der Langzeittrend der DOC-Konzentrationen in der Regel um mehrere Größenordnungen kleiner als die **saisonale und innerjährliche Variabilität**. Diese Variabilität wird vor allem durch Witterungseinflüsse verursacht. Temperatur und Niederschlag beeinflussen sowohl die Vegetationsentwicklung und die DOC-Produktion durch den Abbau von organischem Material als auch dessen Transport. Eine **langfristige Erhöhung der DOC-Konzentration** wird in Gebieten mit abnehmender Sulfatdeposition vor allem auf den Rückgang der Sulfatkonzentration in Boden und Wasser zurückgeführt (Evans et al. 2006, Monteith et al. 2007, Clark et al. 2005). Dieser Effekt überprägt andere Faktoren wie z.B. längerfristige klimatische Veränderungen. Nach Monteith (2007) können mit dem Rückgang der Sulfatkonzentration über 85 % des langfristigen DOC-Anstieges erklärt werden. Da auch das Einzugsgebiet der Talsperre Carlsfeld bis Anfang der 90er Jahre des vergangenen Jahrhunderts starken Sulfateinträgen ausgesetzt war, können weitere Faktoren höchstens für 15 % des generellen DOC-Anstieges verantwortlich sein. Damit wird bereits deutlich, dass Landnutzungsänderungen, wie z.B. die Wiedervernässung oder auch Entwässerung von Mooren, nur geringe Auswirkungen auf den langfristigen Trend haben können. Obwohl vorwiegend Moore im Fokus der Diskussion über steigende DOC-Konzentrationen stehen, wurden im Langzeitmonitoring von Waldböden ebenfalls steigende DOC-Konzentrationen infolge des Sulfatrückgangs beobachtet (Borken et al. 2011). Der Sulfatrückgang wirkt damit flächendeckend auf das gesamte Einzugsgebiet.

Durch den Vergleich von Maßnahmegebieten mit benachbarten Kontrollgebieten lassen sich die beobachteten Verläufe der DOC-Konzentrationen interpretieren und von den saisonalen und innerjährlichen Schwankungen abgrenzen (Turner et al. 2013). Die hier vorgestellte Auswertung der Monitoringdaten im Einzugsgebiet der Wilzsch zeigt für die Fließgewässer weder einen Anstieg noch eine Abnahme der DOC-Konzentration für Teilgebiete mit Revitalisierungsmaßnahmen im Vergleich zu den Kontrollgebieten. Vielmehr wurde für alle Teilgebiete eine Abnahme der Medianwerte festgestellt, was auf Witterungseinflüsse und damit auf die innerjährliche Variabilität zurückgeführt wird.

Langfristig ist durch Moorregeneration eher mit einer Abnahme der DOC-Konzentrationen in wachsenden oder regenerierenden Mooren zu rechnen. So wiesen Wallage et al. (2006) sechs Jahre nach Wiedervernässung und Höll et al. (2009) 20 Jahre nach Wiedervernässung geringere DOC-Konzentrationen und veränderte DOC-Zusammensetzungen in regenerierenden Mooren mit flurnahem Wasserspiegel im Vergleich zu nahegelegenen entwässerten Mooren nach. Die im vorigen Kapitel dargestellten Messwerte für die

GWM10 und auch die gegenüber dem Oberlauf der Wilzsch niedrigeren DOC-Konzentrationen und Frachten der Kranizsch deuten in die gleiche Richtung. Für das Prozessverständnis sind vertiefende Untersuchungen notwendig.

Insgesamt kann festgehalten werden: Bei Maßnahmeflächen, die im Vergleich zum Gesamteinzugsgebiet klein sind, gibt es kurzfristig keine negativen Auswirkungen auf die DOC-Konzentrationen. Längerfristig ist bei ausreichender Maßnahmenfläche und gutem Wiedervernässungspotenzial eher mit einer geringfügigen Abnahme der DOC-Austräge zu rechnen, wenn auch die jährliche Witterung und die Erholung von der vorausgegangenen Sulfatbelastung die Hauptsteuergrößen für den DOC-Austrag im Erzgebirge sind.

Die zitierten Studien und auch die hier vorgestellten Monitoringergebnisse stehen im Widerspruch zu den ebenfalls für das Einzugsgebiet der Talsperre Carlsfeld veröffentlichten Untersuchungen von Grunewald et al. (2009, 2011). So konnte gezeigt werden, dass von einer „hohen Grundbelastung“ durch den Großen Kranichsee, wie von Grunewald et. al. (2009: 51) postuliert, keine Rede sein kann. Insgesamt sind die Arbeiten von Grunewald et al. (2009, 2011) kritisch zu sehen, da neben rein messtechnischen Problemen, die zum Teil bereits in Steinberg & Krüger (2011) kommentiert wurden, auch methodisch den Autoren nicht gefolgt werden kann. Wir beschränken uns auf zwei Beispiele.

So vergleichen Grunewald et al. (2011) ein Teileinzugsgebiet mit „vorsichtiger Grabenräumung“ (BvSO) mit anderen Teileinzugsgebieten, wie z.B. dem Gebiet mit „Regeneration seit Mitte der 1980-er Jahre“ (BvO). In beiden Teileinzugsgebietsflächen wurden Messfelder für die Bodenwasseranalytik eingerichtet (Grunewald et al. 2011). Das Messfeld der „Regenerationsfläche“ ist nach unserer Sicht keinesfalls in Regeneration. Es liegt auf dem Randgehänge eines zum Teil abgetorften Moores. Grunewald et al. (2011) beschrieben das Gebiet als ein durch „Dominanz von Nässezeigern, partielle Auflichtung und Absterben von Waldbeständen“ geprägten Bereich, jedoch sind Moor und Torfstich tatsächlich von einem beerstrauchreichen Fichtenwald bestockt. Er wurde 2003 als Montaner Fichtenwald (LRT 9410, ID 10051) kartiert. Bereits daran wird die Austrocknung des Moores deutlich. Resttorfkörper, Torfstich und auch das Messfeld sind von 0,5 bis 1 m tiefen Gräben durchzogen. Eine typische Moorvegetation und moortypische Nässezeiger, wie Seggen oder Wollgräser, beobachteten wir bis zum Ende des Monitoringzeitraums 2011 und auch bis 2013 nicht. Torfmoose sind nur vereinzelt vorhanden. Grundwasserstandsmessungen liegen nicht vor. Nach Wendel (2010) gehören verlandende Grabensysteme und lokale Wiedervernässungen mit typischer Moorvegetation bis hin zu einer absterbenden Baumschicht zu den leicht kartierbaren Regenerationsmerkmalen. Das Minimalkriterium für einen Regenerationsbereich ist ein „entwässertes Moor mit in Teilflächen verlandetem Grabensystem“ (Wendel 2010: 23). Dieses Minimalkriterium ist nicht erfüllt. Somit verglichen Grunewald et al. (2011) zwei degenerierte Standorte miteinander.

In Grunewald et al. (2009, 2011) wird in Bezug auf die Eintrags-Austrags-Bilanzen der messtechnisch erfasste Pfad als Niederschlag - Bodenwasser - Gebietsabfluss beschrieben und der Eintrag (Niederschlag) dem Austrag (Fließgewässer) gegenübergestellt. **Sowohl messtechnisch als auch in der Interpretation der Werte bleibt der Haupteintrag von DOC über die Primärproduktion unberücksichtigt.** DOC entsteht vor allem aus der sich jährlich erneuernden Streu der aktuellen Vegetation, deren unvollständigen Abbau sowie über organische Ausscheidungen der Pflanzenwurzeln und Mikroorganismen (vgl. Clark et al. 2010, Scheffer & Schachtschabel 1998). Anhand von ^{14}C-Analysen wurde ein überraschend geringes Alter des DOC in Talsperren und Fließgewässern nachgewiesen (Schiff et al. 1997, Evans et al. 2007, Tittel et al. 2010). In Torfböden war der DOC der Bodenlösung generell jünger als der umgebende Torf selbst. Älterer DOC aus der Bodenmatrix wurde nur zu einem kleinen Anteil unter niedrigen Basisabflussbedingungen, d.h. in niederschlagsarmen Zeiten festgestellt. Der größte Teil des DOC-Exports entsteht bei stärkeren Abflüssen nach Niederschlägen mit jungem DOC-Austrag. Außerdem war das Alter des ausgetragenen DOC abhängig von der Bodenart. So stellten Evans et al. (2007) fest, dass **der aus Torfböden exportierte DOC vor allem aus der rezenten Biomasse stammt**, während kohlenstoffarme Böden unter moderater bis intensiver Beweidung alten Kohlenstoff exportierten.

Aufgrund der methodischen und messtechnischen Schwächen in Grunewald et al. (2009, 2011) sind naturschutzfachlich kritische Maßnahmen, wie die von Grunewald et al. (2011) vorgestellte Grabenräumung, nicht zu rechtfertigen.

5. Danksagung

Wir danken dem Regierungspräsidium Chemnitz, der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen und dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie für die interessanten Aufträge, auf deren Grundlage die vorliegende Publikation entstand.

6. Literaturverzeichnis

Aitkenhead, J. A, & McDowell, W. H. (2000): Soil C:N ratio as a predictor of annual riverine DOC flux at local and global scales. - Global Biogeochemical Cycles **14**: 127-138.

Böhm, A. K. (2005): Hochmoore im Erzgebirge – Untersuchungen zum Zustand und Stoffaustragsverhalten unterschiedlich degradierter Flächen. – Dissertation TU Dresden, Institut für Geographie, Lehrstuhl Landschaftslehre / Geoökologie.

Borken, W., Ahrens, B., Schulz, C. & Zimmermann, L. (2011): Site-to-site variability and temporal trends of DOC concentrations and fluxes in temperate forest soils. – Global Change Biology **17**: 2428-2443.

Bufkova, I., Stibal, F, & Loskotovova, E. (2008): Ecology and restoration of drained mires in the Šumava National Park (Czech Republic). – Proc. 13th Intern. Peat Congress, Tullamore, Ireland. Vol. I: 380-382.

Bufkova, I., Stibal, F, & Mikulaškova, E. (2010): Restoration of drained mires in the Sumava National Park, Czech Republic. – In: Restoration of lakes, streams, floodplains and bogs in Europe: principles and case studies. – Springer Verlag, pp. 331-354.

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.

Clark, J. M., Bottrell, S. H., Evans, C. D., Monteith, D. T., Barlett, R., Rose, R., Newton, R. J. & Chapman, P. J. (2010): The importance of the relationship between scale and process in understanding long-term DOC dynamics. – Science of the Total Environment **408**: 2768-2775.

Edom, F., Michaelis, D., Stegmann, H. Kessler. K., Schlöffel, M., Dienemann, H. & Dittrich, I. (2009): Torfschichtung im Ostteil der Großen Säure als Grundlage für das wasserchemische Monitoring und das FFH-Management. – Unveröffentlichtes Gutachten von HYDROTELM – Frank Edom im Auftrag des Regierungspräsidiums Chemnitz.

Evans, C. D., Chapman, P. J., Clark, J. M., Monteith, D. T., & Cresser, M. S. (2006). Alternative explanations for rising dissolved organic carbon export from organic soils. – Global Change Biology **12**: 2044-2053.

Evans, C. D., Freeman, C., Cork, L., G., Thomas, D. N., Reynolds, B., Billett, M., F., Garnett, M., H. & Norris, D. (2007): Evidence against recent climate-induced destabilisation of soil carbon from ^{14}C analysis of riverine dissolved organic matter. – Geophysical Research Letters **34**: L07407, pp.5.

Grunewald, K., Scheithauer, J., Heiser, A., Sudbrack, R., Freier, K. & Andreae, H. (2009): Einzugsgebiete mit gestörten Hochmooren und ihre Relevanz für Trinkwassertalsperren. – Wasser und Abfall **11/2009**: 49-54.

Grunewald, K., Scheithauer, J., Sudbrack, R., Heiser, A., Freier, K. & Andreae, H. (2011): Untersuchungen zum Wasser- und Stoffhaushalt in Einzugsgebieten mit degradierten Hochmooren im oberen Erzgebirge, Talsperre Carlsfeld. – Telma **41**: 171-190; Hannover.

Höll, B. S., Fiedler, S. Jungkunst, H. F., Kalbitz, K., Freibauer, A., Drösler, M. & Stahr, K. (2009): Characteristics of dissolved organic matter following 20 years of peatland restoration. – Science of the Total Environment **408**: 78-83.

Heiser, A. & Sudbrack, R. (2007): 25 Jahre Trinkwasser aus der Talsperre Eibenstock – eine ständige Herausforderung. – Tagungsband zum Fachkolloquium 15 Jahre Landestalsperrenverwaltung: 19-26.

Kessler, K. & Dittrich, I. (2011): Moorhydrologisches Gutachten. Ökotopprognose mit Maßnahme- und Monitoringkonzept für die Moore im Einzugsgebiet der Talsperre Carlsfeld. – Unveröffentlichtes Gutachten im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.

Krüger, A. & Neumeister, H. (2001): Fichtenforst und Hochmoore im Einzugsgebiet von Trinkwassertalsperren in ihrer Wirkung auf den Stoffhaushalt. – Geoökodynamik, GeoÖko **22**/2-3: 161-188.

Krüger, A., Neumeister, H., Friedrich, C. & Leuner, S. (2008): Erarbeitung und Erprobung eines Monitoringkonzeptes für hydrochemische Parameter im Einzugsgebiet der Oberen Wilzsch und dem regenerierenden Hochmoor „Große Säure“. – Unveröffentlichter Bericht der Universität Leipzig, Institut für Geographie im Auftrag des Regierungspräsidiums Chemnitz.

Krüger, A., Neumeister, H., Tolke, D., & Heinrich, J. (2011): Hydrologisch-hydrochemisches Monitoring zu den Folgen der Renaturierung Hochmoor Große Säure, Oberes Westerzgebirge. – Telma **41:** 191-207; Hannover.

Monteith, D. T., Stoddard, J. L., Evans, C. D., de Wit, H. A., Forsius, M., Høgåsen, T., Wilander, A., Skjelkvåle, B. L., Jeffries, D. S., Vuorenmaa, J., Keller, B., Kopácek, J. & Vesely, J. (2007): Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry. – Nature **7169**: 537-540.

Münch, A. & Kessler, K. (2008): Wasserhaushalt des Moorgebietes Große Säure im Einzugsgebiet der Wilzsch/Westerzgebirge. – Unveröffentlichtes Gutachten. Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH, Bannewitz im Auftrag der Universität Leipzig, Institut für Geographie.

Oni, S. K., Futter, M. N., Bishop, K., Köhler, S. J., Ottosson-Lövenius, M. & Laudon, H. (2013): Long term patterns in dissolved organic carbon, major elements and trace metals in boreal headwater catchments: trends, mechanisms and heterogenity. – Biogeosciences **10**: 2315-2330.

Neumeister, H. & Krüger, A. (Hrsg.) (2001): Hochmoore im Westerzgebirge. – Unveröffentlichter Bericht der Universität Leipzig, Institut für Geographie, Projektseminar 1999-2001; 132 S.

Přikryl, I., Benedová, Z., Hruška, J., Kröpfelová, L., Kosík, M., Pechar, L., Pokorný, J. & Šulcová, J. (2004): Auswirkung von Trends bei der langfristigen Entwicklung der Wasserqualität im Trinkwasserspeicher Flaje nach CHSK- und Huminstoffindikatoren und Vorschlag von Vorgehensweisen zur Verbesserung der Wasserqualität (Hodnocení trendu v dlouhodobém vývoji jakosti vody v nádrži Fláje v ukazatelích CHSK a huminové látky a návrh postupu jejího zlepšení). Unveröffentlichtes Gutachten ENKI, o.p.s., - 13 S.; Třeboň.

Rentsch, M. & Zitzewitz, J. v. (2005): Managementplan SCI 16E „Erzgebirgskamm am Großen Kranichsee“. – Unveröffentlichter Bericht der Bürogemeinschaft für Forst- und Umweltplanung Dresden im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie; Freiberg.

Roulet, N. & Moore, T. R. (2006): Environmental chemistry: Browning the waters. – Nature **444**: 283-284.

Scheffer, F. & Schachtschabel, P. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde, 14. Auflage, – 494 S.; Stuttgart (Enke).

Schiff, S.L., Aravena, R., Trumbore, S.E., Hinton, M. J., Elgood, R. & Dillon, P. J. (1997): Export of DOC from forested catchments on the Precambrian Shield of Central Ontario: Clues from ^{13}C and ^{14}C. – Biogeochemistry **36**: 43-65.

Siegert, C. (2012): Ursachen für erhöhte Einträge von gelöstem organischem Kohlenstoff in Trinkwassereinzugsgebiete im oberen Westerzgebirge. – Unveröffentlichte Bachelorarbeit Universität Leipzig, Institut für Geographie.

STEINBERG, C. E. W. & KRÜGER, A. (2011): Hochmoore im Erzgebirge: Liegt die Störung wirklich in den Mooren? Kommentar zu dem Aufsatz von GRUNEWALD et al. in „Wasser und Abfall“ Heft 11/2009. – Wasser und Abfall **5/2011:** 41-45.

SUDBRACK, R., FREIER, K., GRUNEWALD, K, SCHEITHAUER, J., SCHMIDT, W. & WOLF, C. (2005): Verstärkte Huminstoffeinträge in Trinkwassertalsperren im Erzgebirge (Freistaat Sachsen). – Wasser & Abwasser **146/11**: 847-851.

TURNER, E. K., WORRALL, F. & BURT, T.P. (2013): The effect of drain blocking on the dissolved organic carbon (DOC) budget of an upland peat catchment in the UK. - Journal of Hydrology **479**: 167-179.

TITTEL, J., OLLESCH, G., FREIER, K., SUDBRACK, R., HEISER, A. (2010): Das Alter des organischen Kohlenstoffs in der Talsperre Muldenberg, Sachsen. Abstract des Vortrages zur 26. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Limnologie 2010.

WALLAGE, Z. E., HOLDEN, J. & MCDONALD, A. T. (2006): Drain blocking: An effective treatment for reducing dissolved organic carbon loss and water discolouration in drained peatland. – Science of the Total Environment **36**: 811-821.

WENDEL, D. (2010): Autogene Regenerationserscheinungen in erzgebirgischen Moorwäldern und deren Bedeutung für Schutz und Entwicklung der Moore. – Dissertation TU Dresden, Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften Tharandt.

Anschriften der Verfasser:

Dr. I. Dittrich und K. Keßler
Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH
Gerlinger Straße 4
D-01728 Bannewitz
E-Mail: dittrich@hydro-consult.de
kessler@hydro-consult.de

Dr. A. Krüger und Prof. H. Neumeister
Universität Leipzig
Institut für Geographie
Johannisallee 19a
D-04103 Leipzig
E-Mail: akrueger@rz.uni-leipzig.de

Manuskript eingegangen am 30. April 2013,
begutachtet und angenommen am 17. Juni 2013