

TELMA	Band 41	Seite 171 - 190	4 Abb., 3 Tab.	Hannover, November 2011
-------	---------	-----------------	----------------	-------------------------

# Untersuchungen zum Wasser- und Stoffhaushalt in Einzugsgebieten mit degradierten Hochmooren im oberen Erzgebirge, Talsperre Carlsfeld

Investigation of water and matter balance in catchments with degraded peat bogs in the Oberes Erzgebirge, barrage Carlsfeld

KARSTEN GRUNEWALD, JÖRG SCHEITHAUER, RALF SUDBRACK,  
ANKE HEISER, KARIN FREIER und HENNING ANDREAE

## Zusammenfassung

Mittels eines kombinierten Standort-Kleinstinzugsgebietsansatzes werden Umweltwandel und Maßnahmwirkungen in unterschiedlich degradierten und sich in Revitalisierung befindlichen Fichtenforsten mit hohem Anteil von Hochmooren in oberen Lagen des Erzgebirges am Beispiel Carlsfeld untersucht. Im Fokus stehen Pfade und Steuerungsfaktoren des Wasser- und Stoffhaushaltes. Insbesondere die Parameter „löslicher organischer Kohlenstoff (DOC)“ und „spektraler Absorptionskoeffizient bei 254 nm (SAK<sub>254</sub>)“ werden in zeitlicher Dynamik und räumlich vergleichend diskutiert. Die Ergebnisse stellen Grundlagen sowohl für wasser- und forstwirtschaftliche als auch klima- und naturschutzfachliche Interessensabwägungen dar.

## Abstract

Environmental change and management activities were observed by means of a combined plot sub-catchment approach in forested areas with high share of degraded peat bogs in the upper Ore Mountains using the example of Carlsfeld watershed. The investigation focused on pathways and control factors of water and matter balance. Especially we discuss the parameter ‘Dissolved Organic Carbon (DOC)’ and ‘Spectral Absorption Coefficient at 254 nm (SAK<sub>254</sub>)’ in its time dynamic and spatial characteristic. The results represent basics for stakeholder interests of user and nature protection.

## 1. Einleitung

Im Erzgebirge waren Versauerung und Waldsterben infolge der Luftbelastung der 1970er und 1980er Jahre mit Störungen der biogeochemischen Abläufe in den Böden gekoppelt, was zu Veränderungen der bodeninternen Stoffumsatzprozesse führte. Seit der zweiten Hälfte der 1980er Jahre geht die atmosphärische Deposition zurück (SCHEITHAUER & GRUNEWALD 2007).

Temperaturanstieg, Rückgang der Sulfationenkonzentration im Oberboden, aber auch forstliche Kompensationskalkungen fördern den mikrobiellen Umsatz. Damit steigen die Bildungsraten für Huminstoffe, die mit dem Sickerwasser exportiert werden können. Infolgedessen werden die natürlichen organischen Bestandteile in den Oberflächengewässern erhöht (im Folgenden als NOM bezeichnet: *Natural Organic Matter*, vgl. EVANS et al. 2005, GRUNEWALD & SCHMIDT 2005).

Durch vergleichende Ökosystemanalysen konnten die den NOM-Eintrag bestimmenden Faktoren für ausgewählte Talsperren-Einzugsgebiete im Erzgebirge näher untersucht werden (GRUNEWALD & SCHMIDT 2005). Gebirgsmoore, Moor-, Anmoorstaugleye und Humusauflagen sind die Hauptlieferanten von verlagerbaren NOM. Intensität und Dynamik des NOM-Transfers hängen wesentlich vom Flächenanteil der Nassstandorte und der Vegetationsbedeckung im Einzugsgebiet ab. Kommt zu einem hohen Mooranteil eine geringe Bedeckung mit Wald, muss mit einer großen Schwankungsbreite im Austrag auf hohem Niveau gerechnet werden.

Regulierende Eingriffe in den Gebietswasserhaushalt in den letzten beiden Jahrhunderten wirken sich nachhaltig auf den Stoffhaushalt aus (vgl. ÅSTRÖM et al. 2001, KALBITZ et al. 2002, MEISSNER et al. 2003, WALLAGE et al. 2006) und übertreffen die natürliche Dynamik. So hat die Entwässerung der sauren Waldmoore zu erheblichen wasser- und bodenchemischen Veränderungen geführt (SCHEITHAUER & GRUNEWALD 2006). Dies zog nicht nur einen starken Rückgang moortypischer Arten nach sich, sondern ging mit der Aktivierung der Phenoloxidase, Zersetzung der Torfe, Torfverlust und -sackung sowie der Freisetzung von CO<sub>2</sub>, Lachgas oder Nährstoffen einher. Das Moor wurde zur Quelle für C, N, P und S und kann Atmosphäre und Gewässer belasten (GELBRECHT et al. 2008).

Nachweislich sind aus den stark zersetzten Torfschichten große Mengen an Kohlenstoff mobilisierbar (SCHEITHAUER & GRUNEWALD 2006). Ursache ist die mikrobielle Aktivität, die sogar trotz anaerober Verhältnisse nach Wiederanstau anhält. Umweltbedingungen beeinflussen den NOM-Austrag aus den Torfen unmittelbar (ereignisbezogen) sowie zeitlich verzögert (Hysterese). Es ist zu beobachten, dass bei Starkregen und während der Schneeschmelze große Mengen an DOC ausgewaschen werden. In sommerlichen Dürreperioden fallen die Moorwasserstände auf ein niedriges Niveau. Sind in Folgezeiten die Wasserspiegel wieder nahe der Mooroberfläche, kann es zum verstärkten NOM-Austrag

kommen (z. B. FREEMAN et al. 2004, GELBRECHT et al. 2008), die zu Gewässerbelastungen vor allem infolge Hochwasser führen (z. B. GRUNEWALD et al. 2003, NORDTEST 2003, FREEMAN et al. 2004, EVANS et al. 2005, WORRALL et al. 2006). Im Erzgebirge ist dadurch die Trinkwassergewinnung aus Talsperren betroffen (SUDBRACK et al. 2005). Berücksichtigt man dazu den Klimawandel, müssen sich die Wasserversorger auf weiter steigende NOM-Belastungen einstellen (PAVLIK 2007) und ihre Ziele und Strategien an diese Entwicklung anpassen (GRUNEWALD & SCHMIDT 2005, GRUNEWALD et al. 2009). Untersuchungen zum Problem werden seit 2004 im Einzugsgebiet der Talsperre Carlsfeld durchgeführt.

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Das Einzugsgebiet der Talsperre Carlsfeld ist ca. 5 km<sup>2</sup> groß (Abb. 1A). Das schwach gegliederte Einzugsgebiet gehört mit 905 m ü. NN bis 950 m ü. NN zur Kammhochfläche des Westerzgebirges und liegt im Luvgebiet des Auersberges mit hohen jährlichen Niederschlagssummen (> 1250 mm). Podsole und organische Nässtandorte sind die domi-

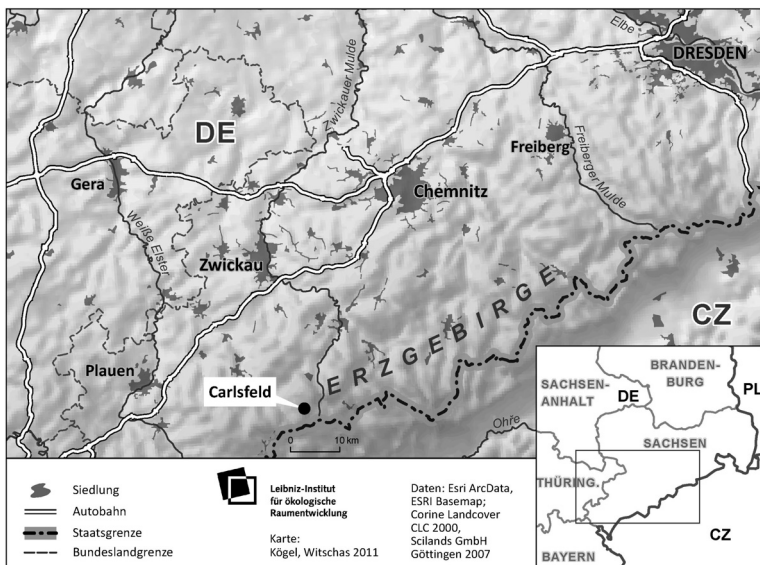


Abb. 1A: Lage des Einzugsgebietes der Talsperre Carlsfeld  
Location of the catchment of the Carlsfeld reservoir

nierenden Böden. Verfestigter Basisschutt aus Granit mit dichten Bs-Horizonten wirkt wasserstauend, was bei hohem Niederschlagsüberschuss den verhältnismäßig hohen Flächenanteil an Hochmooren, Moor- und Anmoorstaugleyen erklärt (ca. 30 %).

Das gesamte Einzugsgebiet der Talsperre Carlsfeld liegt im SPA-Gebiet „Westerzgebirge“ (Europäisches Vogelschutzgebiet im Rahmen des Natura 2000 Netzwerkes) und im Naturpark „Erzgebirge/Vogtland“. Weiterhin ist es überwiegend Teil des FFH-Gebietes „Erzgebirgskamm am Großen Kranichsee“ und des Naturschutzgebietes „Großer Kranichsee“ (RENTSCH & ZITZEWITZ 2005). In diesen Schutzgebieten gehören die Moore zu den Schutzgütern. So dient das größte sächsische Naturschutzgebiet „Großer Kranichsee“ der Erhaltung und Entwicklung des größten natürlichen Fichtenwaldgebietes Sachsens und der darin eingebetteten bedeutenden Hochmoorkomplexe mit ihren spezialisierten Lebensgemeinschaften von Pflanzen und Tieren (SMUL 2010).

Das gesamte Einzugsgebiet der Talsperre ist darüber hinaus in Trinkwasserschutzzonen eingeteilt, wobei mit Ausnahme der Moorreste des ehemaligen Torfkörpers „Weiterswiese“, die in der Wasser-Schutzzone I liegen, alle übrigen Moorbodenflächen zur Wasser-Schutzzone IIA gehören.

## 2.2 Teilgebiete

An vergleichbaren Teileinzugsgebieten (vergleichbar innerhalb eines bestimmten ökologischen Toleranzbereiches) wurde der Einfluss eines gesteuerten Wasserhaushalts untersucht und quantifiziert. Vergleichend wurden Auswirkungen der Grabenräumung, Sukzession und Wiedervernässung messtechnisch erfasst.

Die Teileinzugsgebiete (Lage s. Abb. 1B) sind im Einzelnen.

**Bach von Ost (BvO, 52,5 ha):** Regeneration seit Mitte der 1980er Jahre (verlandete Gräben und kleinflächig vernässte bzw. verlandete Torfstiche, Dominanz von Nässezeigern, partiell Auflichtung und Absterben von Waldbeständen);

**Bach von Südost (BvSO, 59,2 ha):** behutsame Beräumung und Pflege vorhandener Entwässerungsgräben (insgesamt 2,3 km im Zeitraum Okt. 2006 bis Okt. 2009); Untergliederung in „BvSOa“ und „BvSOb“, da hier zwei Bäche das Gebiet entwässern und ein degradiertes Hochmoor auf beider Wasserscheide liegt;

**Großer Kranichsee (Kran, 24,5 ha):** NSG Großer Kranichsee – Referenzgebiet für ein regeneriertes Moor (historisch gestört durch Eingriffe und Stoffdeposition; seit ca. 100 Jahren Naturschutzgebiet mit Regeneration), ehemaliges künstliches Grabensystem aber wahrscheinlich noch wirksam;

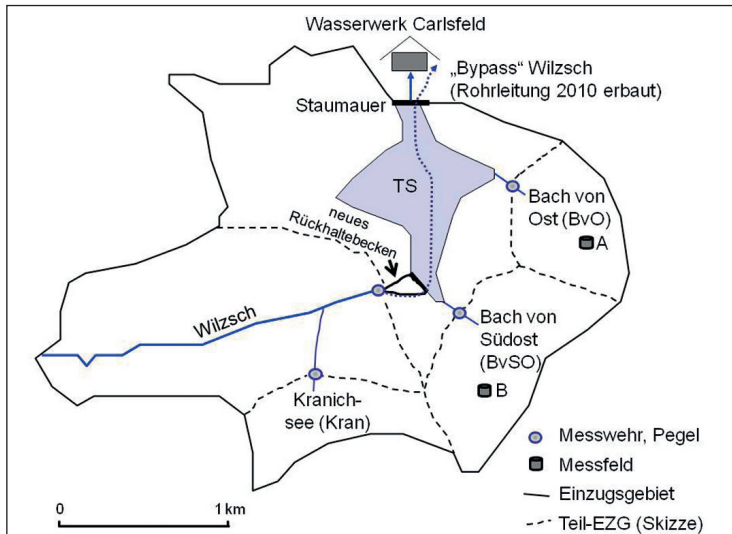


Abb. 1B: Schema mit Teilgebieten und Haupt-Messstellen des Einzugsgebietes der Talsperre Carlsfeld  
 Scheme with sub-catchments and main measurement points of the catchment of the Carlsfeld reservoir

**Summe der Teileinzugsgebiete bis Pegel Wilzsch (Wilzsch, 172,3 ha):** Vergleichsweise großes, heterogenes Teilgebiet, u. a. mit dem Moorgebiet „Große Säure“. Hier wurden 2006/2007 im Auftrag des Zweckverbands „Erzgebirge/Vogtland“ Moor-Revitalisierungsmaßnahmen durchgeführt (i. W. Einbau von Stauen). Im Rahmen des FFH-Managementplans SCI 16E „Erzgebirgskamm am Großen Kranichsee“ (RENTSCH & ZITZEWITZ 2005) ist das gesamte Wilzschgebiet zur Renaturierung und Wiedervernässung vorgesehen.

### 2.3 Mess- und Monitoringkonzept

Aufbauend auf einer detaillierten Inventarisierung von Bodenmerkmalen, Torfmächtigkeit und dem Grabennetz wurde entlang des Stoffverlagerungspfades Mess- und Probenahmetechnik installiert.

**Klima und Witterung:** Die Werte der Klimastation Carlsfeld nahe der Staumauer (Betreiber LTV: Landestalsperrenverwaltung Sachsen) werden für das kleine Einzugsgebiet als repräsentativ angesehen.

**Durchfluss und Wassertemperatur:** Am Gebietsabfluss von „BvO“, „BvSOa“, „BvSOB“ und „Kran“ wurden Pegel (einschließlich Rechteck-Überfall) mit automatischer Datenaufzeichnung (Pegelsonde mit Logger, stündliche Datenspeicherung) installiert. Der Messpegel der „Wilzsch“ vor der Mündung in die Talsperre liefert viertelstündliche Online-Werte.

**Stoffeintrag über Kronentraufe:** Je vier Sammler (Trichter und Sammelkanister) wurden in Messparzellen der Teilgebiete „BvO“ und „BvSO“ aufgestellt (Beprobung 14-tägig).

**Torfeigenschaften:** Mittels Kammerbohrer wurden jeweils drei Bohrungen pro Standort an den Messparzellen „BvO“ und „BvSO“ sowie im Revitalisierungsbereich „Große Säure“ bis zum mineralischen Untergrund abgeteuft. Probenmaterial wurde bis 0,5 m in 10 cm- und ab 0,5 m in 20 cm-Schritten gewonnen. Drei Proben je Tiefe eines Standortes wurden zu einer Mischprobe vereinigt. Die Horizontfolge wurde nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (u.a. Farbe, Feuchte, Torf-Zersetzungsgrad, vgl. AG BODEN 1996) angesprochen.

**Chemismus des Bodenwassers in den Torfen:** Installation von Bodenwassersammlern in den beiden Messparzellen „BvO“ und „BvSO“ analog der Dauerbeobachtungsflächen des Sachsenforstes (DBF Level II, LAF 1996). Die Anordnung der Saugkerzen war den Torfgegebenheiten (Einbautiefe 30 cm = oberer stark zersetzter Torf; 80 cm = mittlerer schwach zersetzter Torf; 150 cm = unterer mäßig zersetzter Torf) sowie der Grabenarchitektur angepasst (gefächerte Lage innerhalb von „Grabenparzellen“); Beprobung 14-tägig (i. d. R. Mai-Nov.).

**Abflusschemie der Teileinzugsgebiete:** Probenahme monatlich und zum Teil ereignisbezogen (bei Starkregen, zur Schneeschmelze und in Trockenperioden) durch LTV.

**Laboranalytik Boden/Torf:** pH-Wert, organischer Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor, Schwefel, Eisen, Aluminium und Mangan (Methoden siehe SCHLICHTING et al. 1995).

**Laboranalytik Niederschlags-, Boden-, Oberflächenwasser:** pH-Wert, DOC, SAK<sub>254</sub>, Farbgrad, An- und Kationen wie Magnesium, Kalium, Calcium, Ammonium, Sulfat, Nitrat etc. (HÜTTER 1994). Die Analysen wurden nach standardisierten Methoden in den Labors von LTV und SBS (Staatsbetrieb Sachsenforst) realisiert.

Der nach DIN EN 1484 bestimmte gelöste organische Kohlenstoff im Wasser (*Dissolved Organic Carbon*: DOC) erfasst den Anteil der gelösten NOM in der wässrigen Phase, die einen Membranfilter mit der Porenweite von 0,45 µm passieren. Der Spektrale Absorptionskoeffizient bei 254 nm (SAK<sub>254</sub>) wird zusätzlich als Indikator für die Huminstoffkonzentration in der wässrigen Phase herangezogen, weil der Zusammenhang zwischen der spektralen Absorbanz und der Konzentration von Huminstoffen in Gewässern, die nicht oder nur sehr wenig durch anthropogene Einleitungen betroffen sind, sehr eng ist (HÜTTER 1994, GRUNEWALD & SCHMIDT 2005). Die Zusammenhänge zwischen SAK<sub>254</sub>, DOC und Fraktionen des DOC wurden für verschiedene Jahreszeiten geprüft. Diese wie auch andere Studien (BERGH 2001, VOGT et al. 2004, PAUL et al. 2004) haben gezeigt, dass Summenparameter wie DOC und SAK<sub>254</sub> die NOM gut bis sehr gut repräsentieren. Aufwändige Messungen zu den Huminstoff-Fractionen sind im Rahmen eines Monitoringprojektes nicht nötig.

Der Gehalt an DOC stellt eine wichtige Größe für die Bilanzierung des NOM-Transfers aus den Einzugsgebieten dar. Die täglichen Abflussmessungen (in  $l \cdot s^{-1}$ ) wurden gemeinsam mit den Terminen der monatlichen Analysen der DOC-Konzentrationen am jeweiligen Pegel (in  $mg \cdot l^{-1}$ ) aus der Datenbank abgerufen. Danach erfolgte die Berechnung von Tagesfrachten für jeden Beprobungstermin, welche wiederum mit der Durchflussmenge korreliert wurden ( $r^2 > 0,8$ ). Die ermittelten Regressionsgleichungen dienten als Grundlage für die Quantifizierung der täglichen DOC-Frachten auf Basis der gemessenen Abflüsse (in  $kg \cdot d^{-1}$ ). Weiterführende Datenabfragen ergaben jährliche und monatliche Frachten (Methodik siehe PAVLIK 2007).

Felderkundungsdaten wie Torfverbreitung und Grabennetz wurden digitalisiert und in ein GIS implementiert (ArcView der Firma ESRI). Die genannten wasser- und stoffhaushaltlichen Parameter werden in einer Datenbank verwaltet. Für die statistische Auswertung der Daten wurde das Softwarepaket „Statistica“ verwendet. Neben nichtparametrischen Verfahren wie ordinalen deskriptiven Statistiken (Mediane, Quartils, Streuung) und Korrelationsanalysen (z. B. nach Spearman,  $rR$ ) kamen multivariate explorative Techniken (Clusteranalysen) zur Anwendung (SCHÖNWIESE 2000).

### 3. Ergebnisse

Zuerst wurde das Einzugsgebiet der Talsperre Carlsfeld charakterisiert, dann die benachbarten Teileinzugsgebiete, die geologisch-morphologisch, pedologisch und klimatisch dem Einzugsgebiet Carlsfeld entsprechen (s. GRUNEWALD & SCHEITHAUER 2011).

#### 3.1 Klima und Witterung

Die Trends der gemessenen und berechneten Parameter von 2005-2010 in Bezug zur langjährigen Dynamik sind: Schneemenge, Schnee-Regen-Verhältnis und Anzahl der Regentage unterlagen keinen signifikanten bzw. nur schwachen Veränderungen; Temperatur, Niederschlag und jährliche Anzahl der Starkregentage nahmen deutlich zu (GRUNEWALD & SCHEITHAUER 2011). Diese Trends sind signifikant. Folgen sind eine stärkere biochemische Aktivität im Boden, höhere Abflüsse und NOM-Austräge, Zunahme der Verdunstung sowie eine teils verbesserte Wasserversorgung der Moorökosysteme, allerdings bei stärkerer Ausprägung von Trocken-Feuchte-Phasen.

Seit den 1990er Jahren ist das Verhältnis von Starkregen- zu Regentagen von vormals etwa 5 auf über 10 Prozent gestiegen. Allein 2007 wies die doppelte Anzahl an Starkregentagen (Temperatur  $> 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , Regenmenge  $> 20 \text{ mm}$ ) auf. Diese Beobachtungen korrespondieren mit den im Klimaatlas Sachsen dargestellten Ergebnissen (SMUL 2005 bzw. BERNHOFER et al. 2008).



Aus der Analyse der saisonalen Dynamik geht hervor, dass seit 2004 in fast allen Monaten die für die Stoffverlagerung relevanten Niederschläge zwischen Frühjahr und Herbst über dem langjährigen Durchschnitt der vorangegangenen drei Jahrzehnte lagen. Ferner begann (April) und endete (Oktober) die Vegetationsperiode bzw. die Zeitspanne mikrobieller Aktivität oft mit einem Niederschlagsdefizit. Zugleich haben die Temperaturen in den Monaten April bis Juni signifikant zugenommen, was in Kombination mit Niederschlagsmangel ein Anzeichen für häufigere Trockenphasen im Frühjahr ist. Außerdem waren die Winterniederschläge überdurchschnittlich hoch, verbunden mit einer signifikanten Zunahme in den Monaten Februar und März seit 1971. Insofern ist für den Untersuchungszeitraum eine Verschiebung hin zu wärmeren und feuchteren Bedingungen mit verstärkt auftretenden Extremereignissen (Starkregen und Dürre) zu verzeichnen.

### 3.2 Durchfluss und Wassertemperatur

In Abbildung 2 sind die gemessenen Jahresdurchflüsse (Q) sowie die flächenbezogenen Durchflusswerte (Abflussspende q generiert aus den Abflussmittelwerten) der Pegel auf Jahresbasis vergleichend dargestellt. Teilgebiet „BvO“ weist die höchsten Abflüsse auf, „BvSOa“ die niedrigsten. Nach der Grabenpflege scheinen die Abflüsse aus dem Gebiet „BvSO“ vergleichsweise etwas zu steigen. Das Jahr 2008 ist aufgrund niedriger Niederschläge durch ein Abflussminimum gekennzeichnet.

Den höchsten Abfluss je Flächeneinheit weist in allen sechs Jahren das Teilgebiet „Großer Kranichsee“ auf, den niedrigsten „BvSOa“. „BvSOb“ und „BvO“ liegen diesbezüglich auf gleichem Niveau. Die Teilgebiete „BvO“ und „BvSOb“ liegen genau im langjährigen Mittel (Mq) der Abflussspende der Talsperre Carlsfeld ( $29,51 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ ). Allerdings ist die Beziehung zwischen Abfluss und Einzugsgebietsgröße nicht linear, sondern unterproportional (SYMADER 2004). Es wirken komplexe Zusammenhänge zwischen Struktur (Oberflächeneigenschaften, Bodenmatrix), Infiltration und Abfluss in den Teileinzugsgebieten. Ausgehend von gleichen Niederschlagsmengen pro Flächeneinheit in den Teilgebieten kann man auf unterschiedliche Versickerungseigenschaften und Grabenfunktionen schließen.

### 3.3 Stoffeintrag über Kronentraufe und Freilandniederschlag

Folgende Mittelwerte (2006-2010) des Kronentraufenchemismus wurden in den Messparzellen im Einzugsgebiet der Talsperre Carlsfeld ermittelt: pH: 6,1; DOC  $19,1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ;  $\text{SAK}_{254}$ :  $6,5 \text{ E} \cdot \text{m}^{-1}$ . Der Vergleich dieser Ergebnisse mit Kronentraufenwerten von der nahe gelegenen forstlichen Dauerbeobachtungsfläche Level II in Klingenthal ergab ähnliche Größenordnungen. Die DOC-Einträge über den Freilandniederschlag (Frachten  $10\text{-}20 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ) sind erwartungsgemäß deutlich niedriger als über die Kronentraufe ( $25\text{-}65 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ). In den Jahresbilanzen zeigten sich Eintragspeaks für 2009 und Minima für 2008 (GRUNEWALD & SCHEITHAUER 2011).



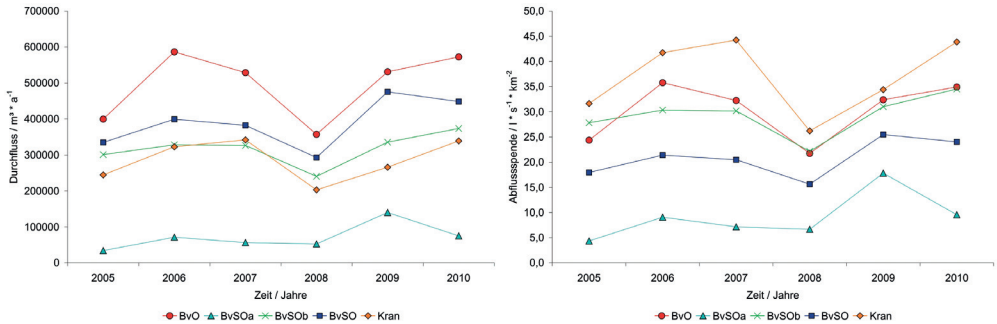


Abb. 2: Durchfluss (links) und Abflusspende in den untersuchten Teileinzugsgebieten im Jahresmittel Discharge (left) and run-off coefficient of the investigated sub-catchments, average per year

### 3.4 Torfeigenschaften

In den Hochmooren im Carlsfeldgebiet nehmen mit der Tiefe die Zersetzungsgrade ab und die für Hochmoore charakteristischen Verhältnisse, wie Säure- und Trophiebedingungen in den Torfmoostorfen ( $\text{pH} < 3,2 \dots 4,0$  und  $\text{C/N} > 33$ ), zu. Die Dynamik ausgewählter Parameter wurde für den Zeitraum 2006 bis 2009 bilanziert (GRUNEWALD & SCHEITHAUER 2011), wobei für pH-Wert, C/N-Verhältnis und C-Gehalt kein Trend ableitbar ist, weil der Beobachtungszeitraum zu kurz war.

### 3.5 Chemismus des Bodenwassers in Torf

In enger Kopplung an die Stoffvorräte bzw. Stoffmengenanteile in den jeweiligen Tiefen der Torfe fällt der mittlere Chemismus des Bodenwassers (analysiertes Wasser aus den Saugkerzen der beiden Messparzellen,  $n = 475$ ) im Untersuchungszeitraum aus (Tab. 1). ähnlich wie in den Tiefen- und Standortgradienten der Torfeigenschaften bestehen auch im Bodenwasser deutliche Unterschiede hinsichtlich organischer Komponenten ( $\text{SAK}_{254}$ , DOC) sowie geogener Stoffe wie Eisen und Mangan. Insbesondere NOM stehen in direkter Beziehung zum Zersetzungsgrad. Folglich können in den oberen, stark zersetzten Horizonten die größten Mengen an DOC mit der höchsten UV-Absorbanz in Lösung gehen. Eisen und Mangan weisen eine entgegengesetzte Desorptionstendenz mit zunehmender Tiefe auf. Zudem bestehen bei den Metallionen standörtliche Unterschiede, bedingt durch die Stoffvorräte (Tab. 1). Nitrat und Ammonium sind wiederum als milieuhängiges Spiegelbild der jeweils aeroben oder anaeroben Verhältnisse anzusehen. Einzelne Stoffe verhalten sich indifferent (Natrium, Calcium, Magnesium).

Tab. 1: Mittlerer Chemismus des Bodenwassers, differenziert nach Messparzellen und Tiefenstufen 30 cm, 80 cm und 150 cm im Messzeitraum 2006-2010; Anmerkung: bei BvO-4 (150 cm) handelt es sich um eine organo-mineralische Mudde (SAK<sub>254</sub> in E · m<sup>-1</sup>, elektrische Leitfähigkeit in  $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , DOC und Ionenkonzentrationen in mg · l<sup>-1</sup>)

Soil water parameters (averages), differentiated for measurement plots and depth scales of 30 cm, 80 cm and 150 cm during the period 2006-2010; note: BvO-4 (150 cm) is an organic-mineral mud (SAK<sub>254</sub> in E · m<sup>-1</sup>, electric conductivity in  $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , DOC and ion-concentration in mg · l<sup>-1</sup>)

Parameter	Carlsfeld gesamt	BvSO			BvO		BvO-3 (150 cm)	BvO-4 (150 cm)
		(30 cm)	(80 cm)	(150 cm)	(30 cm)	(80 cm)		
pH-Wert	4,1	3,9	4,2	4,3	3,8	4,2	4,6	4,9
elektr. Leitf.	52,8	72,4	39,5	38,9	78,1	42,3	28,2	34,2
Nitrat	0,3	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Ammonium	0,6	0,2	0,8	0,9	0,2	0,8	1,0	0,6
Chlorid	1,2	0,6	0,8	1,1	1,0	2,0	1,5	1,6
Sulfat	2,5	2,5	1,6	2,2	2,8	2,7	2,7	6,2
Gesamt-Phosphat	0,21	0,14	0,27	0,57	0,11	0,13	0,11	0,21
Natrium	0,6	0,6	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	1,1
Kalium	0,2	0,1	0,2	0,4	0,2	0,2	0,3	1,0
Calcium	0,3	0,2	0,3	0,5	0,3	0,2	0,3	0,4
Magnesium	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
Eisen	0,95	0,20	0,30	0,72	0,75	2,11	1,91	2,27
Mangan	0,04	0,01	0,01	0,01	0,02	0,08	0,11	0,14
Aluminium	0,64	0,71	0,44	0,50	1,07	0,51	0,60	0,36
SAK <sub>254</sub>	29,4	34,7	25,1	27,3	41,2	24,6	23,4	10,9
DOC	166,2	229,1	124,2	121,6	266,9	126,0	116,7	34,0

### 3.6 Abfluschemie der Teileinzugsgebiete

Die Messstellen „BvSOa“ und „Kran“ weisen die höchsten NOM-relevanten Messparameter auf (Farbgrad, SAK<sub>254</sub> und DOC; vgl. GRUNEWALD & SCHEITHAUER 2011). Im Verlauf der letzten knapp 20 Jahre unterlagen die Konzentrationen der organischen sowie der meisten anorganischen Wasserinhaltsstoffe in allen Zuläufen mehr oder weniger großen Veränderungen (s. Tab. 2). Aus dem Vergleich der Betrachtungszeiträume 1993-2003 und 2004-2009 geht hervor, dass die Parameter Farbgrad, DOC und SAK<sub>254</sub> im Projektzeitraum deutlich höher lagen als in der Dekade zuvor. Besonders deutlich ist die Veränderung im Abfluss des Teilgebietes „BvO“ ausgefallen. Der SAK<sub>254</sub> stieg etwa doppelt so stark wie der DOC. Dies ist ein Indiz dafür, dass der SAK<sub>254</sub> einerseits nicht allein durch gelösten organischen Kohlenstoff, sondern auch andere Stoffe, v.a. komplexiertes Eisen, bestimmt wird, andererseits aber auch qualitative Änderungen der NOM stattfinden.

Der Anstieg des pH-Wertes ist dagegen nur gering (1-4 %). Die übrigen analysierten An- und Kationen sowie die elektrische Leitfähigkeit sind mit Ausnahme von Phosphat durch rückläufige Trends charakterisiert. Besonders deutlich fallen diese Rückgänge bei Sulfat- und Nitrationenkonzentration aus (vgl. hierzu auch SCHEITHAUER 2006, SCHEITHAUER & GRUNEWALD 2006 sowie GRUNEWALD et al. 2009).

Tab. 2: Vergleich der mittleren Abflusschemie für „Bach von Ost“ (BvO), „Bach von Südost“ (BvSO) und „Wilzsch“ in den Jahren 1993-2003 und 2004-2009 sowie Charakterisierung der Testgebiete „BvSOa“, „BvSOB“ und „Kran“ (2004/2005-2009); DOC und Ionenkonzentrationen in mg/l  
Comparison of chemical parameter in the run-off water of the sub-catchments „Bach von Ost“ (BvO), „Bach von Südost“ (BvSO) and „Wilzsch“ during 1993-2003 and 2004-2009 as well as characteristic of the sub-catchments „BvSOa“, „BvSOB“ and „Kran“ (2004/2005-2009); DOC and ion-concentration in mg/l

Zeitraum Parameter	1993-2003			2004-2009					
	BvO	BvSO	Wilzsch	BvO	BvSO	Wilzsch	BvSOa	BvSOB	Kran
pH	4,8	4,8	4,4	4,8	4,9	4,5	4,1	4,9	4,7
Lf ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ , 25°C)	63,2	62,5	66,7	54,7	53,8	55,4	59,7	53,0	47,6
Farbgrad ( $\text{E} \cdot \text{m}^{-1}$ )	3,0	1,3	3,8	4,1	1,7	4,9	6,8	1,8	6,2
DOC	9,0	5,8	10,7	10,5	6,4	12,0	18,7	6,8	14,2
SAK <sub>254</sub> ( $\text{E} \cdot \text{m}^{-1}$ )	39,8	21,5	50,8	53,2	27,0	62,9	95,1	28,3	74,6
Ortho-Phosphat	0,05	0,02	0,03	0,06	0,02	0,04	0,02	0,02	0,03
Ammonium	0,06	0,04	0,08	0,05	0,04	0,07	0,04	0,04	0,09
Nitrat	1,8	2,3	2,0	1,3	2,0	1,6	0,9	2,0	1,2
Aluminium	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,3
Calcium	3,5	3,8	3,4	2,9	3,1	2,5	1,1	2,9	1,8
Magnesium	0,8	0,8	0,5	0,8	0,7	0,5	0,7	0,7	0,4
Sulfat	15,0	15,3	13,2	13,4	13,6	10,7	8,0	13,2	8,5
Chlorid	1,6	1,6	1,7	1,6	1,5	1,5	1,4	1,5	1,4

## 4. Synthese und Diskussion

### 4.1 Pfade und Steuerfaktoren des Stoffaustrages

Aus Abbildung 3, die den Pfad Niederschlag (Kronentraufe) – Boden(Moor)wasser – Gebietsabfluss darstellt, wird ersichtlich, dass im Niederschlag (KT) weitaus geringere Mengen an gelösten organischen Stoffen enthalten sind, als bspw. in den stark zersetzten oberen Torfhorizonten (BW - Hv, 30 cm) mobilisiert werden. Selbst die schwächer degradierten, unteren Torfschichten (BW - Hh, 80 und 150 cm) weisen vergleichsweise hohe DOC- bzw. SAK<sub>254</sub>-Werte auf (vgl. auch SCHEITHAUER & GRUNEWALD 2006, GRUNEWALD et al. 2009). Diese enorme Lösungs- und Verlagerungsintensität an NOM vermindert sich letztlich auf dem Weg zum Vorfluter (vgl. Abb. 3A). Zudem reagieren die untersuchten Kompartimente entlang des Transferpfades im Jahresgang unterschiedlich (Abb. 3B).

Weitgehend ohne Temperatur- und damit Jahreszeitenabhängigkeit (bezogen auf Frühjahr bis Herbst) variiert der NOM-Transfer an allen Pegeln mit dem Regenniederschlag (GRUNEWALD & SCHEITHAUER 2011). Ähnlich sind die Eisen-, Mangan- und Phosphationen sowie die Trübung gekennzeichnet. Je höher die Niederschlagsintensität, umso höher ist meist die Verlagerungsrate. In Kälteperioden mit Schnee verliert die aktuelle Niederschlagsmenge ihre Bedeutung für den Stofftransfer (Rücklage). Stattdessen gewinnen Temperatur und zwischenzeitliche Schneeschmelze an Einfluss.

Die im Projektzeitraum gestiegenen DOC-Konzentrationen im Bodenwasser in 30 cm Tiefe erklären zusammen mit der Witterung die Zunahme der NOM-Konzentrationen in den Gebietsabflüssen. Veränderungen in den rezenten geochemischen Prozessen bewirken den Anstieg der DOC-Konzentrationen in den Oberböden und degradierten oberen Torfschichten (SCHEITHAUER & GRUNEWALD 2006, TITTEL et al. 2010). Landnutzung und Maßnahmen zum Schutz und zur Renaturierung von Moorböden dürfen nicht zur Verringerung des Gehaltes an Kohlenstoff (C) führen. Verluste in gasförmiger oder flüssiger Form in angrenzende Landschaftskompartimente sind aufgrund der Klima- bzw. Trinkwasserrelevanz zu vermeiden (ZEITZ et al. 2010).

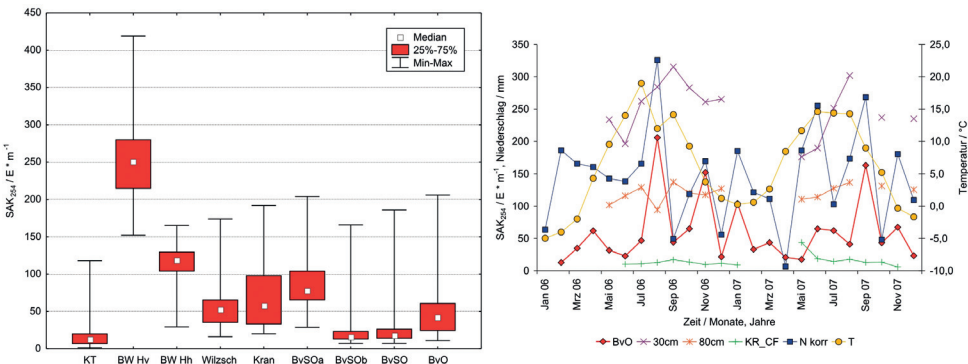


Abb. 3: (A) Box-Whisker-Plots des SAC<sub>254</sub> für die Kronentraufe (KT), das Bodenwasser (BW-Hv, -Hh) und die Gebietsabflüsse im Jahr 2007 sowie (B) Vergleich von Temperatur, Niederschlag und SAC<sub>254</sub> in den Jahren 2006 und 2007

(A) Box-Whisker-Plots of SAC<sub>254</sub> for tree crown eave (KT), soil water (BW-Hv, -Hh) and surface water in year 2007; (B) Comparison of temperature, precipitation and SAC<sub>254</sub> in 2006 and 2007

#### 4.2 DOC-Bilanzierung

Die Teileinzugsgebiete unterscheiden sich sowohl in der mittleren jährlichen DOC-Konzentration (s. Tab. 2) als auch in der absoluten und der flächenbezogenen DOC-Jahresfracht (Abb. 4). Während „BvSOa“ die höchsten Konzentrationen aufwies, gefolgt von

„Kran“ und „BvO“, war im Teilgebiet „BvSOB“ vergleichbar wenig DOC im Vorfluter. Hinsichtlich der Jahresgesamtfrachten nimmt „BvO“ den ersten Platz ein, wohingegen „BvSOa“ als das kleinste Teilgebiet mit dem zugleich geringsten Abflussaufkommen auch die niedrigsten DOC-Mengen exportiert (ca. zwei Tonnen pro Jahr). Das Teilgebiet „Kran“ steuert deutlich größere Frachten bei (2,8 bis 5,4 t DOC / Jahr), begründet im erheblich höheren Abfluss als „BvSOa“. Das Gebiet „BvSOB“ liefert bedingt durch eine relativ hohe Durchflussmenge viel DOC in Richtung Talsperre (2,2 bis 5,1 t DOC / Jahr). Flächenbezogen weist „Kran“ die höchsten DOC-Austräge auf (Abb. 4).

Der jährliche DOC-Export je Flächeneinheit ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) bei „BvO“ und „Kran“ mit ähnlicher Sukzession beträgt über das Oberflächenwasser im Mittel 146 bzw. 179  $\text{kg DOC pro ha}$  und Jahr. Die flächenbezogene DOC-Fracht im „BvSO“-Gebiet liegt mit ca. 100  $\text{kg pro ha}$  und Jahr deutlich darunter.

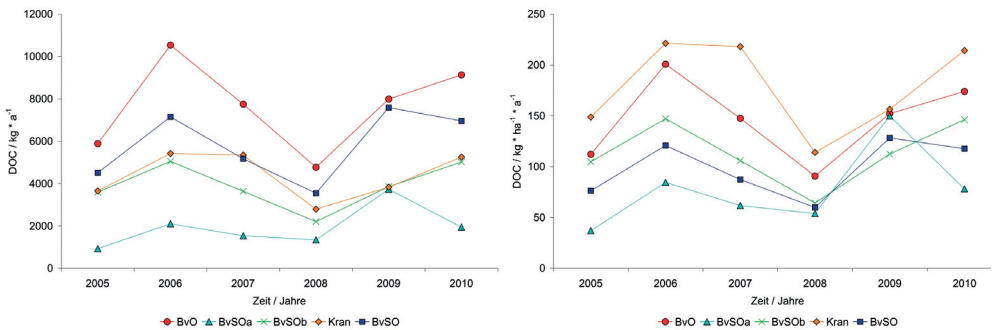


Abb. 4: DOC-Jahresfrachten der Teileinzugsgebiete  
DOC-load per year of the investigated sub-catchments

Eintrags-Austrags-Bilanzen aus den Teilgebieten lassen sich nicht vollständig durchführen, da nicht alle Teilflüsse quantifiziert worden sind: Der Eintrag in die Ökosysteme als DOC-Fracht beträgt im Mittel jährlich über den Freilandniederschlag 15 und über den Bestandsniederschlag 45 bis 50  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$  (Level II-Fläche Klingenthal, Messparzellen Carlsfeld). Da der Bestandsniederschlag im Einzugsgebiet Carlsfeld dominiert, kann man von DOC-Einträgen von ca. 40  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$  ausgehen. Dem stehen DOC-Austräge über die Oberflächenabflüsse von ca. 80-180  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$  gegenüber (Minimum: BvSOa: 37  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ , Maximum: Kran: 221  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ). Das heißt ein starker Austrag findet vor allem in Gebieten mit Sukzession („Großer Kranichsee“, „BvO“) statt; das Eintrags-Austrags-Verhältnis beträgt etwa 1 zu 4. Im „Pflegebachgebiet (BvSOa)“ bzw. „BvSO“ gestaltet sich das DOC-Eintrags-/Austragsverhältnis mit ca. 1 zu 2,5 etwas günstiger. Das heißt, dass von einer C-Senke von mehr oder weniger degradierten Mooren zumindest bzgl. DOC keine Rede sein kann. Allerdings wurde nur die flüssige Phase betrachtet und nicht die terrestrischen Bereiche der Teileinzugsgebiete.

### 4.3 Auswirkungen der Grabenräumung im Teilgebiet „BvSO“

Dazu wurden die  $SAK_{254}$ -Werte an den einzelnen Probenahmetagen verglichen. Die Messungen der  $SAK_{254}$ -Werte seit 1993 zeigen einen ansteigenden Trend in den drei Teileinzugsgebieten „BvO“, „BvSO“ und „Wilzsch“. Daraus folgt, dass überregionale Faktoren wirksam werden (vgl. Kap. 4.1). In Tabelle 3 sind die  $SAK$ -Mittel für den Projektzeitraum dargestellt (auch für „Kran“). Die Werte schwanken von Jahr zu Jahr. Man erkennt jedoch, dass die  $SAK_{254}$ -Werte im Teilgebiet „BvSO“ nach der Grabenberäumung nicht die Spitzenwerte im Vergleich zu den anderen Gebieten erreichen (Jahr 2009). Auch ein Vergleich 2005 zu 2010 lässt einen konzentrationsmindernden Einfluss erkennen.

Tab. 3:  $SAK_{254}$ -Mittelwerte in den Teileinzugsgebietsabflüssen  
Average of  $SAC_{254}$  in run-off of the investigated sub-catchments

	2005	2006	2007	2008	2009	2010
BvO	42,2	63,5	56,5	40,7	67,8	50,2
BvSO	18,5	42,8	26,7	17,9	34,5	23,1
Kran	59,6	66,4	68,9	64,4	86,7	69,2
Wilzsch	52,3	68,9	65,6	50,2	73,5	63,2

## 5. Fazit und Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Monitoringergebnisse sind:

- generell kühle und feuchte Bedingungen (obere Berg- und Kammlagen), aber Zunahme von Temperatur (April bis Juni), Niederschlag (insbesondere Regen) und Anzahl an Starkregentagen ( $T > 0\text{ °C}$ ,  $N > 20\text{ mm}$ ), ferner Unterschiede von Jahr zu Jahr und im Jahresgang,
- Gebietsabflüsse mit unterschiedlicher Menge, aber ähnlicher saisonaler und ereignisbezogener Dynamik (Schneeschnmelze, Starkregen), dagegen Unterschiede im Jahresgang, einschließlich sommerlichem Trockenfallen bei kleinsten Bächen („BvSOa“), zudem Wassertemperatur als Indikator für Herkunft des Wassers (Quellschüttung: „BvSOa“, wärmeres Bodenwasser: „BvSOa“),
- Ausprägung des Kronendaches der Fichte in enger Relation zum Chemismus des Bestandesniederschlages, intraannuelle Dynamik führt zur Bildung von Stoffgruppen (Organik, An- und Kationen, pH-Wert und Phosphat), trotz ähnlicher stofflicher Zusammenhänge (Cluster) unterschiedliche Jahresgänge; die Deposition in den Testgebieten des Einzugsgebietes Carlsfeld korrespondiert signifikant mit den Daten der Level-II-Fläche Klingenthal des Staatsbetriebes Sachsenforst,

- Torfeigenschaften in den Messparzellen mit im Tiefenprofil vergleichbaren organischen und je nach Standort differierenden geogenen Komponenten; vierjährige Beobachtung der Matrixchemie erbrachte keine signifikanten Veränderungen/Trends,
- Stoffkonzentrationen der wässrigen Phase an Torfeigenschaften gebunden (u. a. hohe DOC- und SAK<sub>254</sub>-Werte im oberen, stark zersetzten Torf), Zunahme der DOC-Konzentrationen in den Saugkerzen in 30 cm Tiefe, besonders im Sukzessionsgebiet „BvO“; Datensatz zum in-situ-Chemismus degradiierter Moorstandorte hat Neuheitswert,
- Hauptzuläufe und Testgebietsabflüsse mit jahreszeitabhängigen Gemeinsamkeiten und Unterschieden in der Organik (Farbgrad, SAK<sub>254</sub>, DOC) und Ähnlichkeiten bei den übrigen Ionenkonzentrationen, hinzukommend ein variierendes inter- und intraanuelles Muster der NOM (teils in Korrelation mit Eisen, Aluminium und Phosphat),
- DOC-Einträge (Konzentrationen und Frachten) aus den Zuflüssen in die Talsperre haben sich im Untersuchungszeitraum weiter erhöht; Ursache ist der anhaltende Umweltwandel, vor allem Klima, Deposition und Landnutzung betreffend (SCHEITHAUER 2006, BERNHOFER et al. 2008) und
- Ionenkonzentrationen der Oberflächengewässer zeigten unterschiedliche Trends (generell Rückgang bei Sulfat und Nitrat, partiell Anstieg bei Phosphat); zwischen den exogenen Faktoren und dem stofflichen Austragsverhalten bestehen enge, statistisch signifikante Beziehungen, beispielsweise ist die Auswaschungsintensität von DOC (und auch von Aluminium) direkt an Niederschlagsereignisse (Regen) zwischen Frühjahr und Herbst gekoppelt.

Auswirkungen von Maßnahmen zeigen Ergebnisse des Feldexperiments „Grabenpflege“ im Teilgebiet „BvSO“ mit mehrjährigem Messvorlauf. Die Beräumung (vgl. Kap. 4.3) bedingt im Vergleich zu Nachbareinzugsgebieten mit Sukzession in den Jahren 2009/2010, dass sich das Wasser in den Gräben aufhellt (visuell zeitweise erkennbar), der DOC-Anstieg im Bodenwasser geringer ausfällt und die SAK<sub>254</sub>-Konzentration im Teilgebietsabfluss etwas langsamer steigt.

Aus Referenzgebieten mit „junger“ und „alter“ natürlicher Sukzession („BvO“ und „Kran“) werden hohe und steigende Konzentrationen und Frachten an DOC ausgetragen, obwohl sich „naturnähere Gleichgewichte“ eingestellt haben sollten. Es ist zu vermuten, dass in beiden Gebieten der Wasserspiegel in den oberen degradierten Torfbereichen nach intensiven Witterungsphasen variiert und stärkere DOC-Freisetzungen hervorruft. Der mobilisierbare C-Pool wird insbesondere mit der Schneeschmelze und bei Sättigungsabfluss in Richtung Talsperre verlagert.



Bei Planung und Umsetzung der Revitalisierungsmaßnahmen stark veränderter Moorbereiche müssen Raum-Zeitansätze, naturschutzfachliche Zielsetzungen und insbesondere Belange der Schutzgüter Wasser und Klima noch stärker beachtet werden. Dem Ziel, einen gleichmäßig hohen Wasserstand zu gewährleisten und den DOC-Austrag zu reduzieren, kann bisher nicht entsprochen werden.

Moorschutz galt bis vor wenigen Jahren als ausschließliches Anliegen des Naturschutzes. Vor dem Hintergrund stoffhaushaltlicher Entwicklungen und Klimaveränderungen rückt dieser aber auch in das Interesse anderer Flächennutzer und gesellschaftlicher Akteure. Das Motto lautet deshalb „Moorschutz integrativ“, d. h. Forst- und Wasserwirtschaft nehmen zunehmend auf naturschutzfachliche Belange des Moorschutzes Rücksicht, erarbeiten gemeinsame Konzepte bei durchaus unterschiedlichen Zielen (WENDEL 2010). Dafür ist eine fundierte wissenschaftliche Vorlauf- und Begleituntersuchung wie im Einzugsgebiet der Talsperre Carlsfeld wesentliche Grundlage. Sie kann zur Schonung von Ressourcen, zum effektiven Einsatz von Mitteln sowie zum Erhalt und zur Erhöhung der Ökosystemdienstleistungen beitragen. Derzeit besteht Konsens darin, dass eine räumliche Trennung von Zielkonflikten auf Grundlage einer Ökotopprognose zum Regenerations- und Risikopotenzial sinnvoll erscheint, bevor weitere Eingriffe in den Teileinzugsgebieten der Talsperre Carlsfeld zu realisieren sind.

## 6. Danksagung

Wasserprobenahme und Laboranalytik wurden größtenteils von Kollegen der Landestalsperrenverwaltung Sachsen (Untersuchungsstelle Plauen, Staumeisterei Carlsfeld), des Staatsbetriebes Sachsenforst, der Technischen Universität Dresden und der Landesdirektion Chemnitz, Abteilung Umwelt – Umweltfachbereich, Außenstelle Plauen, ausgeführt. Ihnen sei an dieser Stelle für Ihre Unterstützung gedankt.

## 7. Literaturverzeichnis

- ÅSTRÖM, M., AALTONEN, E.K. & KOIVUSAARI, J. (2001): Effects of ditching operations on stream-water chemistry in a boreal forested catchment. – *The Science of the Total Environment* **279**: 117 - 129.
- AG BODEN (1996): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 4. Aufl.; Hannover (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- BERGH VAN DEN, J. (2001): *Vor-Ort-Charakterisierung von aquatischen Huminstoffen und ihren Metallspezies*. – Dissertation des Fachbereiches Chemie der Universität Dortmund.
- BERNHOFER, C., GOLDBERG, V., FRANKE, J., GEIDEL, K., HÄNTZSCHEL, J., HARMANSA, S., PLUNTKE, T., PRASSE, H., SURKE, M., HÄNSEL, S., MELLENTIN, U., KÜCHLER, W. & FREYDANK, E. (2008): *Sachsen im Klimawandel. Eine Analyse*. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft. Dresden, 211 S.

- 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.
- FREEMAN, C., FENNER, J., OSTLE, N.J., KANG, H., DOWRICK, D.J., REYNOLDS, B., LOCK, M.A., SLEEP, D. HUGHES, S. & HUDSON, J. (2004): Export of dissolved organic carbon from peatlands under elevated carbon dioxide levels. – *Nature* **430**: 195 - 198.
- GELBRECHT, J., ZAK, D. & AUGUSTIN, J. (2008): Phosphor- und Kohlenstoff-Dynamik und Vegetationsentwicklung in wiedervernässten Mooren des Peenetales in Mecklenburg-Vorpommern. – *Berichte des IGB* **26**; Berlin.
- GRUNEWALD, K., KORTH, A., SCHEITHAUER, J. & SCHMIDT, W. (2003): Verstärkte Huminstoffeinträge in Trinkwasserspeicher zentraleuropäischer Mittelgebirge. – *Wasser & Boden* **55/4**: 47-51 .
- GRUNEWALD, K. & SCHEITHAUER, J. (2006): Naturschutz contra Wasserschutz? - Ziele und Zielkonflikte im Erzgebirge. – In: ERDMANN, K.-H., BORK, H.-R., HOPF, T.: Naturschutz im gesellschaftlichen Kontext. – *Naturschutz und Biologische Vielfalt* **38**: 165-190, Bundesamt für Naturschutz; Bonn.
- GRUNEWALD, K., SCHEITHAUER, J., HEISER, A., SUDBRACK, R., FREIER, K. & ANDREAE, H. (2009): Einzugsgebiete mit gestörten Hochmooren und ihre Relevanz für Trinkwassertalsperren im Erzgebirge. – *Wasser+Abfall* **48/8**: 49-54.
- GRUNEWALD, K. & SCHEITHAUER, J. (2011): Forst- und wasserwirtschaftliche Praxis unter Berücksichtigung naturschutzfachlicher Belange in Einzugsgebieten von Trinkwassertalsperren mit hohem Moor- und Fichtenforstanteil im oberen Erzgebirge (Carlsfeld). Forschungsbericht im Auftrag der LTV Sachsen (unveröff.); Dresden/Pirna.
- GRUNEWALD, K. & SCHMIDT, W. (Hrsg.)(2005): Problematische Huminstoffeinträge in Oberflächengewässer im Erzgebirge. Ursachen, Trinkwasserrelevanz, Prognosen, Maßnahmen. Beiträge zur Landschaftsforschung, Bd. 2; Berlin (RHOMBOS Verlag).
- HÜTTER, L.A. (1994): *Wasser und Wasseruntersuchung*; Frankfurt a. Main, Aarau (Salle Verlag, Verlag Sauerländer).
- KALBITZ, K., RUPP, H. & MEISSNER, R. (2002): N-, P- and DOC-dynamics in soil and groundwater after restoration of intensively cultivated fens. – In: BROLL, G.; MERBACH, W. & PFEIFFER, E.M. (Hrsg.), *Wetlands in Central Europe: Soil organisms, soil ecological processes and trace gas emissions*: 99 -116; Berlin, New York, Heidelberg (Springer Verlag).
- LAF, SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR FORSTEN (Hrsg.) (1996): *Waldumbau – Beiträge zum Kolloquium*. – *Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten* **6**: 150 S.
- MEISSNER, R., RUPP, H. & LEINWEBER, P. (2003): Re-wetting of fen soils and changes in water quality - experimental results and further research needs. – *Journal of Water and Land Development* **7**: 75-91.
- NORDTEST (2003): Increase in colour and amount of organic matter in surface waters. Position Paper 009 of NORDTEST, [www.nordtest.org](http://www.nordtest.org) (am 05.06.2006).
- PAUL, A., HACKBARTH, S. ET AL. (2004): Photogeneration of singlet oxygen by humic substances: comparison of humic substances of aquatic and terrestrial origin. – *Photochem. Photobiol. Sci.*: 273-280.

- PAVLIK, D. (2007): Entwicklung und Anwendung eines Modells zur Quantifizierung und Prognose von Huminstoffeinträgen in Oberflächengewässer. – Beiträge zur Landschaftsforschung, Bd. 5; Berlin (RHOMBOS Verlag).
- RENTSCH, M. & ZITZEWITZ, J.V. (2005): Managementplan SCI 16E „Erzgebirgskamm am Großen Kranichsee“. Bürogemeinschaft für Forst- und Umweltplanung Dresden. Im Auftrag des LfULG; Freiberg.
- SCHIEITHAUER, J. (2006): Umweltwandel im Erzgebirge. Beiträge zur Landschaftsforschung, Bd. 4; Berlin (RHOMBOS Verlag).
- SCHIEITHAUER, J. & GRUNEWALD, K. (2006): Biogeochemie von Hochmoortorfen und Umweltwandel im Erzgebirge. – *Telma* **36**: 169-188; Hannover.
- SCHIEITHAUER, J. & GRUNEWALD, K. (2007): Saurer Regen und Waldsterben im ehemaligen „Schwarzen Dreieck“ (Osterzgebirge). – In: ZEPPE, H. (Hrsg.): „Ökologische Problemräume Deutschlands“: 111-132, WBG Darmstadt.
- SCHLICHTING, E.; BLUME, H.P. & STAHR, K. (1995): Bodenkundliches Praktikum – Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte und für Geowissenschaftler. 2. Auflage; Berlin, Wien (Blackwell Wissenschafts-Verlag).
- SCHÖNWIESE, C.D. (2000): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler; Berlin, Stuttgart (Gebrüder Borntraeger).
- SMUL (2005): Klimawandel in Sachsen – Sachstand und Ausblick 2005. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft; Dresden.
- SMUL (2010): Naturschutzgebiete in Sachsen. ISBN 3-932627-17-2.
- SUDBRACK, R., FREIER, K., GRUNEWALD, K., SCHIEITHAUER, J., SCHMIDT, W. & WOLF, C. (2005): Verstärkte Huminstoffeinträge in Trinkwassertalsperren im Erzgebirge (Freistaat Sachsen). – *Wasser & Abwasser* **146/11**: 847-851.
- SYMADER, W. (2004): Was passiert, wenn der Regen fällt? Eine Einführung in die Hydrologie. UTB 2496; Stuttgart (Ulmer).
- TITTEL, J., OLLESCH, G., FREIER, K., SUDBRACK, R. & HEISER, A. (2010): Das Alter des organischen und anorganischen Kohlenstoffs in der Talsperre Muldenberg, DGL-Vortragsskript (unveröff.), UFZ Halle-Leipzig.
- VOGT, R.D. et al. (2004): Key site variables governing the functional characteristic of Dissolved Natural Organic Matter (DNOM) in Nordic forested catchments. – *Aquat. Sci.* **66**: 195-210.
- WALLAGE, Z.E., HOLDEN, J. & McDONALD, A.T. (2006): Drain blocking: An effective treatment for reducing dissolved organic carbon loss and water discolouration in a drained peatland. – *Science of the Total Environment* **367**: 811-821.
- WENDEL, D. (2010): Autogene Regenerationserscheinungen in erzgebirgischen Moorwäldern und deren Bedeutung für Schutz und Entwicklung der Moore. – Diss., TU Dresden, Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften Tharandt.

WORRALL, F., BURT, T.P. & ADAMSON, J. (2006): The rate of controls upon DOC loss in a peat catchment. – *J. of Hydr.* **321**: 311-325.

ZEITZ, J., ZAUF, M. & ROSSKOPF, N. (2010): Die Bedeutung Brandenburger Moore für die Kohlenstoffspeicherung. – In: *Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg* **19 (3/4)**: 202-205.

Anschriften der Verfasser:

K. Grunewald  
Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR)  
Weberplatz 1  
D-01217 Dresden  
E-Mail: k.grunewald@ioer.de

J. Scheithauer  
Landschaftsforschungszentrum e.V. (LFZ)  
Am Ende 14  
D-01277 Dresden

R. Sudbrack, A. Heiser, K. Freier  
Landestalsperrenverwaltung Sachsen (LTV)  
Bahnhofstraße 14  
D-01782 Pirna

H. Andreae  
Staatsbetrieb Sachsenforst (SBS)  
Bonnewitzer Straße 34  
D-01796 Pirna

Manuskript eingegangen am 18. Juli 2011

