

Bilanzierung des Dümmers

Endbericht 29.11.2012

Auftraggeber: NLWKN - Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Betriebsstelle Sulingen, Am Bahnhof 1, 27232 Sulingen

Auftragnehmer: Dr. habil. Klaus-Dieter Wolter, Kolberger Str. 3, 65191 Wiesbaden, E-Mail: kd.wolter@web.de
Dipl.-Ing. Gert Köhler, Trenckmannstraße 35, 16816 Neuruppin, E-Mail: koehler@wasser-boden-luft.de

Wiesbaden/Neuruppin

Inhalt

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	5
1 Einleitung.....	7
2 Material und Methoden.....	7
2.1 Abfluss	7
2.2 Korrekturen im Datensatz	7
2.3 Mathematische und graphische Methoden.....	8
3 Bilanz.....	8
3.1 Zielsetzung	8
3.2 Hydrologie.....	9
3.2.1 Atmosphärische Deposition	9
3.2.2 Zufluss zum Dümmer.....	9
3.2.3 Verdunstung	9
3.2.4 Änderungen des Seevolumens	11
3.2.5 Abfluss aus dem See	11
3.3 Parameter der Bilanz.....	11
3.4 Aufstellung der Bilanz.....	12
4 Ergebnisse und Diskussion der Bilanzierung.....	20
4.1 Hydrologie.....	20
4.2 Genauigkeit der Bilanz	22
4.3 Einzelparameter	23
4.3.1 Gesamt-Phosphor Bilanz	23
4.3.2 Gesamt Stickstoff und Nitrat-Stickstoff Bilanz	27
4.3.3 Calcium und Hydrogenkarbonat Bilanz	32
4.3.4 Die Bilanz von organischem Kohlenstoff	37
4.3.5 Sulfat Bilanz	40
4.3.6 Bilanz der Summe aller Salze	43
4.3.7 Chlorid Bilanz	46
4.4 Jahresmittel und Jahressummen der bilanzierten Parameter	50
4.5 Einfluss von Gänseexkrementen auf die Phosphorbilanz des Dümmers	51
5 Zusammenfassung	52
6 Abkürzungsverzeichnis.....	54
7 Quellenverzeichnis - Literatur, Rechtsgrundlagen und Internet	56

Abbildungen und Tabellen

Abbildungen

- Abb. 1: Methodenvergleich Berechnung Tagesdaten Verdunstung nach den Methoden Dalton und Penman. Zeitraum 1979 - Sep. 2012. Rohdaten zur Berechnung: Meteorologische Station Diepholz. Daten: NLWKN..... 10
- Abb. 2: Hunte Schäferhof 1990-2011. Abfluss, Ges-P, Ges-N. Tagesdaten und GÜN-Proben. Daten: NLWKN 13
- Abb. 3: Hunte Schäferhof. Gesamt-Phosphor (Ges-P), Gesamt-Stickstoff (Ges-N) und Nitrat-Stickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$) 1993-2011. Tagesmischproben, Proben des Gewässerüberwachungssystems Niedersachsen (GÜN) und kubischer Spline. Korrigierte Werte. Daten NLWKN (verändert). 14
- Abb. 4: Hunte Schäferhof. Calcium (Ca), Hydrogenkarbonat (HCO_3) und *Total Organic Carbon* (TOC) 1993-2011. Tagesmischproben, Proben des Gewässerüberwachungssystems Niedersachsen (GÜN) und kubischer Spline. Unkorrigierte Werte. Daten NLWKN (verändert). 15
- Abb. 5: Hunte Schäferhof. Sulfat (SO_4), Salzsumme und Chlorid (Cl) 1993-2011. Tagesmischproben, Proben des Gewässerüberwachungssystems Niedersachsen (GÜN) und kubischer Spline. Unkorrigierte Werte. Daten NLWKN (verändert). 16
- Abb. 6 : Dümmer Olgahafen. Gesamt-Phosphor (Ges-P), Gesamt-Stickstoff (Ges-N), Nitrat-Stickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$). 1986-2011. Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen (GÜN) und kubischer Spline. Rohdaten NLWKN..... 17
- Abb. 7: Dümmer Olgahafen. Calcium (Ca), Hydrogenkarbonat (HCO_3), *Total Organic Carbon* (TOC). 1986-2011. Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen (GÜN) und kubischer Spline. Rohdaten NLWKN. 18
- Abb. 8: Dümmer Olgahafen. Sulfat (SO_4), Salzsumme, Chlorid (Cl). 1986-2011. Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen (GÜN) und kubischer Spline 19
- Abb. 9: Hydrologie des Dümmers, Wochenmittelwerte. Verdunstung des Wassers mit Dalton- und Penman-Verfahren, Verdunstung Schilf: Grasreferenzverdunstung. Berechnung des Seeabflusses mit Verdunstung nach dem Penman-Verfahren. Wasserstand. Daten NLWKN, meteorologische Daten: Station Diepholz. 21
- Abb. 10: Wochenmittel der Gesamt-Phosphor Bilanz des Dümmers. (a) Ges-P-Inhalt des Wasserkörpers, Ges-P-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe P-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abauffracht höher, (c) interne P-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der P-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN..... 25
- Abb. 11: Phosphorbilanz des Dümmers - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) Ges-P-Inhalt des Wasserkörpers, Ges-P-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe P-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abauffracht höher, (c) interne P-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der P-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN..... 26
- Abb. 12: Wochenmittel der Gesamt-Stickstoff Bilanz des Dümmers. (a) Ges-N-Inhalt des Wasserkörpers, Ges-N-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe N-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abauffracht höher, (c) interne N-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ:

Festlegung) und (d) Summenkurve der N-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN..... 28

Abb. 13: Stickstoffbilanz des Dümmer - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) Ges-N-Inhalt des Wasserkörpers, Ges-N-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe N-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne N-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der N-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN..... 29

Abb. 14: Wochenmittel der Nitrat-Stickstoff Bilanz des Dümmer. (a) $\text{NO}_3\text{-N}$ -Inhalt des Wasserkörpers, $\text{NO}_3\text{-N}$ -Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe $\text{NO}_3\text{-N}$ -Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne $\text{NO}_3\text{-N}$ -Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN 30

Abb. 15: Nitrat-Stickstoffbilanz des Dümmer - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) $\text{NO}_3\text{-N}$ -Inhalt des Wasserkörpers, $\text{NO}_3\text{-N}$ -Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe $\text{NO}_3\text{-N}$ -Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne $\text{NO}_3\text{-N}$ -Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN 31

Abb. 16: Wochenmittel der Calcium Bilanz des Dümmer. (a) Calcium-Inhalt des Wasserkörpers, Calcium-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe Calcium-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne Calcium-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der Calcium-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN..... 33

Abb. 17: Calciumbilanz des Dümmer - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) Ca-Inhalt des Wasserkörpers, Ca-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe Ca-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne Ca-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der Ca-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN..... 34

Abb. 18: Wochenmittel der Hydrogenkarbonat Bilanz des Dümmer. (a) $\text{HCO}_3\text{-Inhalt}$ des Wasserkörpers, $\text{HCO}_3\text{-Fracht}$ der Zu- und Abflüsse, (b) externe $\text{HCO}_3\text{-Bilanz}$ (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne $\text{HCO}_3\text{-Nettobilanz}$ (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der $\text{HCO}_3\text{-Freisetzung}$ (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN 35

Abb. 19: Hydrogenkarbonatbilanz des Dümmer - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) $\text{HCO}_3\text{-Inhalt}$ des Wasserkörpers, $\text{HCO}_3\text{-Fracht}$ der Zu- und Abflüsse, (b) externe $\text{HCO}_3\text{-Bilanz}$ (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne $\text{HCO}_3\text{-Nettobilanz}$ (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der $\text{HCO}_3\text{-Freisetzung}$ (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN 36

Abb. 20: Wochenmittel der *Total Organic Carbon* (TOC) Bilanz des Dümmer. (a) TOC-Inhalt des Wasserkörpers, TOC-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe $\text{HCO}_3\text{-Bilanz}$ (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne TOC-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der TOC-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN..... 38

Abb. 21: *Total Organic Carbon* (TOC) Bilanz des Dümmer - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) TOC-Inhalt des Wasserkörpers, TOC-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe TOC-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne TOC-Nettobilanz (positiv:

Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der TOC-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN 39

Abb. 22: Wochenmittel der Sulfat (SO_4) Bilanz des Dümmer. (a) SO_4 -Inhalt des Wasserkörpers, SO_4 -Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe SO_4 -Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne SO_4 -Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der SO_4 -Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN . 41

Abb. 23: Sulfat Bilanz des Dümmer - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) SO_4 -Inhalt des Wasserkörpers, SO_4 -Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe SO_4 -Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne SO_4 -Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der SO_4 -Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN..... 42

Abb. 24: Wochenmittel der Salzsumme Bilanz des Dümmer. (a) Salz-Inhalt des Wasserkörpers, Salz-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe Salz-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne Salz-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der Salz-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN 44

Abb. 25: Salzsumme Bilanz des Dümmer - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) Salz-Inhalt des Wasserkörpers, Salz-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe Salz-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne Salz-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der Salz-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN..... 45

Abb. 26: Paralleler Verlauf von Chloridkonzentration und Abfluss an der Messstelle Hunte Schäferhof. Daten NLWKN, verändert. 46

Abb. 27: Chloridkonzentration gegen Abfluss an der Messstation Hunte Schäferhof. Daten NLWKN. 46

Abb. 28: Wochenmittel der Chlorid (Cl) Bilanz des Dümmer. (a) Cl-Inhalt des Wasserkörpers, Cl-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe Cl-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne Cl-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der Cl-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN... 48

Abb. 29: Chlorid Bilanz des Dümmer - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) Cl-Inhalt des Wasserkörpers, Salz-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe Cl-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne Cl-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der Cl-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN..... 49

Tabellen

Tab. 1: Statistische Kennzahlen der für die Verdunstungsberechnung verwendeten Verfahren (Beschreibung im Text) 10

Tab. 2: Jahresmittel und -summen von Bilanzgrößen im Dümmer (Externe Bilanz, mittlerer Stoffinhalt, Summe jährliche Freisetzung) und Quotient „Inhalt/Freisetzung“ als Maß für ein „Netto-Umsatzzeit“. Diskussion vgl. Text. 50

1 Einleitung

Im Zuge der Bestrebungen zur Sanierung des Dümmer und der Planungen für ein Schilfpoldersystem sollte eine Nährstoffbilanz für den Dümmer erstellt werden. Zielsetzung ist das Herausarbeiten von langfristigen Trends und von Jahresmustern, die eine bessere Anpassung von Sanierungs-/Restaurierungsmaßnahmen an die Prozesse ermöglichen.

2 Material und Methoden

2.1 Abfluss

Es wurden Tagesdaten des Abflusses an der Messstelle Hunte Schäferhof zugrundelegt. Die weitere Verarbeitung der Daten und die Berechnung der anderen Abflüsse im System Zuflüsse - Dümmer - Abflüsse sind im Kap. 3.2 Hydrologie (S. 9) beschrieben.

2.2 Korrekturen im Datensatz

Im Datensatz der GÜN-Daten Hunte Schäferhof waren die Tage 11.12.1986, 26.11.1987, 08.03.1994, 04.01.-20.06.2005 und 08.01.-11.12.2007 doppelt vorhanden. Teilweise (O_2 und Ges-N) unterschieden sich die Werte. Die doppelten Tage wurden gelöscht, bei abweichenden Werten wurden die plausibleren verwendet.

Die Werte für Ges-P vom 31.01.-10.02.2005 und 19.10.-26.10.2009 waren mit bis zu 7,5 und 38 mg/L unplausibel hoch und wurden gelöscht.

Es wurde der Parameter Ges-N Kor (Aufschluss nach Koroleff) verwendet, ab 2009 der Parameter Ges-N (andere Methode), da Ges-N Kor nicht angegeben war. Negative Werte im Datensatz bedeuten einen N-Gehalt unterhalb der Bestimmungsgrenze.

Konzentrationswerte von „0“ und mit „<“ wurden aus dem Datensatz gelöscht und gegebenenfalls durch Interpolation ersetzt oder auf die halbe Bestimmungsgrenze ersetzt.

Die Leitfähigkeit (25 °C) [$\mu S/cm$] wurde in Leitfähigkeit (20 °C) [mS/m] durch Abzug von 2 %/K und Division durch 10 umgerechnet. Aus der Leitfähigkeit (20 °C) wurde nach Ripl, Feibicke *et al.* (1994) der Salzgehalt nach der Formel

$$\text{Salz [mg/l]} = 111,9 + 5,73 * \text{LF [mS/m]}$$

(LF bei 20 °C im Labor gemessen)

berechnet.

2.3 Mathematische und graphische Methoden

Alle Daten 1993 bis 2011 wurden mit einem kubischen Spline und einer linearen Interpolation von *srs1software* (*cubic spline, linear interpolation*, Version 2, www.srs1software.com) als Tagesdaten berechnet. Normalerweise wurde mit den Tagesdaten des kubischen Splines weitergerechnet. Falls der kubische Spline starke Ausschläge aufwies (z.B. Konzentrationswerte unter 0, extrem hohe Werte außerhalb des Verlaufs der Einzelwerte) wurde die lineare Interpolation zwischen den einzelnen Messpunkten weiterverwendet. In Einzelfällen (z.B. um ein Jahr zur Berechnung von Jahreswerten mit einzelnen Konzentrationswerten aufzufüllen) wurden die Daten auch extrapoliert.

Es wurde zunächst auf Tagesbasis gerechnet, die erhaltenen Bilanzdaten wurden dann durch Mittelwert- oder Summenbildung zu Wochenwerten aggregiert. Aus den Wochenmitteln wurden danach durch Mittelwert- oder Summenbildung auch Jahreswerte berechnet bzw. die einzelnen Wochen mehrerer Jahre durch Mittelwertbildung zu Jahresgängen verrechnet.

Die Daten wurden graphisch mit *gnuplot* (www.gnuplot.info) dargestellt.

3 Bilanz

3.1 Zielsetzung

Die Bilanz sollte einerseits die Nährstoffbilanz des Dümmers fortschreiben, andererseits die Beantwortung spezielle Fragestellungen für Dimensionierung und Betrieb des Schilfpoldersystems unterstützen (z.B. Phosphorretention des Dümmers im Frühjahr, saisonale Verteilung von Retention und Freisetzung von Phosphor im Dümmer).

In der vorliegenden Bilanzierung wurden Gesamt-Phosphor, Gesamt-Stickstoff und Nitrat-Stickstoff betrachtet.

Über die eigentliche Aufgabenstellung hinaus wurden außerdem Parameter einbezogen, die in engem Zusammenhang mit der Produktion/Respiration im See stehen. Diese liefern zusätzlichen Erkenntnisse über die Prozesszusammenhänge und könnten bei einer Fortschreibung der Bilanz die Rückkehr des Sees zu einem guten ökologischen Zustand dokumentieren bzw. bei einer verzögerten Antwort des Sees auf eine Nährstoffentlastung das Verständnis für die ablaufenden Prozesse und damit auch für weitere effiziente Steuerungsmaßnahmen ermöglichen. Deshalb wurden zusätzlich folgende Parameter bilanziert:

- Summe alle Salze (berechnet aus der elektrischen Leitfähigkeit) und Chlorid (Cl),
- Bilanzierung des organischen Kohlenstoffs (TOC),
- die im Zusammenhang mit der Primärproduktion stehende biogene Kalkfällung durch Bilanzierung von Calcium und Hydrogenkarbonat (Alkalinität),
- Desulfurikation und Denitrifikation als wichtige Steuergrößen der Sedimentprozesse durch Bilanzierung von Sulfat und Nitrat.

3.2 Hydrologie

3.2.1 Atmosphärische Deposition

Nach Scheer in NLWKN (2012, Kap. 3.1) wird von atmosphärischen Depositionen auf den See von etwa 0,2 t P/a, oder von 25 µg P/L im Niederschlag (Scheer, pers. Mitt.) ausgegangen.

3.2.2 Zufluss zum Dümmer

Zuflüsse zum Dümmer bilden die Hunte (Pegel Hunte Schäferhof) und der Marler Graben.

Marler Graben

Nicht durch kontinuierliche Messungen von Konzentration und Abfluss erfasst wurde der Marler Graben. Der mittlere Abfluss des Marler Grabens beträgt 0,04 m³/s (Scheer & Voermanek 2012c).

Nach dem erweiterten Monitoring von 2011 lag seine P-Konzentration im Mittel bei 0,12 mg P/L, während am gleichen Tag genommene Proben an der Messstelle Hunte Schäferhof ein Mittel von 0,17 mg P/L ergaben (n=11).

Für die vorliegende Bilanzierung wurden im Marler Graben die gleichen Konzentrationswerten wie in der Hunte angenommen.

Gesamtzufluss zum See

Der Gesamtzufluss zum See wurde mit dem mittleren Abfluss der Hunte (Pegel Schäferhof) und dem mittleren Abfluss des Marler Grabens (0,04 m³/s, Scheer & Voermanek 2012c) abgeschätzt, danach ergab sich für die Zeit vor und nach der Bornbachumleitung:

$$Q_{\text{GesZu}} = Q_{\text{HteShf}} * 1,013 \quad (\text{Formel } Q_{\text{GesZu}} \text{ vor 04-2009})$$

$$Q_{\text{GesZu}} = Q_{\text{HteShf}} * 1,018 \quad (\text{Formel } Q_{\text{GesZu}} \text{ nach 04-2009})$$

3.2.3 Verdunstung

Die Verdunstung der Uferzone (Feuchtgebietsvegetation, Schilffläche) wurde nach der Methode Grasreferenzverdunstung (Allen *et al.* 1998, ATV-DVWK 2002) berechnet. Für die Monate Mai bis August wurde eine um den K_c-Faktor 1,2 erhöhte Verdunstung zugrundegelegt. Die Methode ist genauer in Wolter & Köhler (2012) beschrieben.

Die Verdunstung von der freien Wasseroberfläche wurde nach dem Dalton-Verfahren und nach dem Penman-Verfahren (beide nach Wendling *et al.* 1996) berechnet. Beim Penman-Verfahren wurde abweichend von der Anleitung die Temperatur der Wasseroberfläche für die Verdunstung von derselben verwendet. Die Wassertemperatur wurde aus der Lufttemperatur nach dem in Wendling *et al.* (1996) beschriebenen Verfahren berechnet. Dabei wurde für die Berechnung von Tageswerten der Wassertemperatur im Dümmer (See mit bis zu 3 m mittlerer Wassertiefe) der Mittelwert aus der Temperatur des aktuellen und von 5 zurückliegenden Tagen für die Wassertemperatur verwendet. Für die Windfunktion im Dalton-Verfahren wurden die von Richter (1977, nach Wendling *et al.* 1996) für norddeutsche Seen entwickelten Koeffizienten angewandt

Für alle Verdunstungsberechnungen wurden meteorologische Daten der Station Diepholz verwendet.

Die mittleren Verdunstungsraten unterschieden sich bei den beiden Verfahren mit Mittelwerten von jeweils 2,02 mm/d (1979 -Sep. 2012) nicht. Teilweise traten negative Werte der Verdunstung auf. Da die Verdunstung bei der Gesamtwasserbilanz des Sees im Vergleich zu Zufluss, Niederschlag und Abfluss eine untergeordnete Rolle spielt (vgl. Abb. 9, S. 21), wurden keine Korrekturen an den Werten durchgeführt. Weitere statistische Kennzahlen sind in Tab. 1 (S. 10) aufgeführt. Ein Vergleich der beiden Verfahren Penman und Dalton für die Verdunstung der Wasseroberfläche ist in Abb. 1 (S. 10) dargestellt. Für die weitere Datenbearbeitung wurde das Penman-Verfahren für die Wasseroberfläche und die Grasreferenzverdunstung für die Uferzone (Schilffläche) verwendet.

Verdunstung mm/d	Wasseroberfläche Dalton-Verfahren	Wasseroberfläche Penman-Verfahren	Schilf nach Verfahren Grasreferenzverdunstung
Minimum	-2,60	-1,19	0,1
Quantil 10 %	0,22	0,12	0,35
Median	1,70	1,63	1,50
Mittelwert	2,02	2,02	2,10
Standardabweichung	1,67	1,73	1,82
Quantil 90 %	4,31	4,55	4,86
Quantil 95 %	5,28	5,32	5,98
Maximum	13,30	8,14	8,94

Tab. 1: Statistische Kennzahlen der für die Verdunstungsberechnung verwendeten Verfahren (Beschreibung im Text)

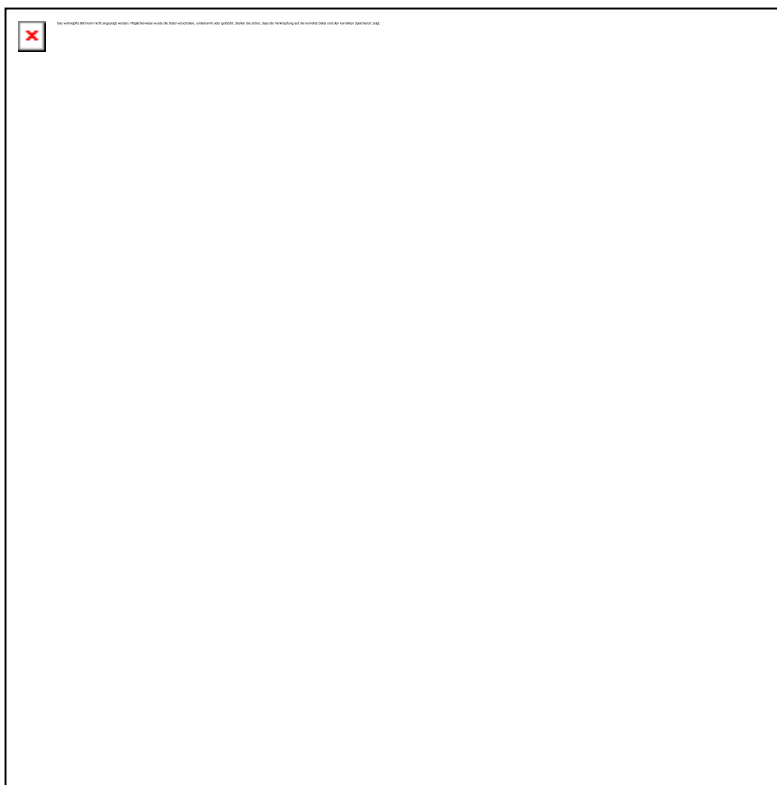


Abb. 1: Methodenvergleich Berechnung Tagesdaten Verdunstung nach den Methoden Dalton und Penman. Zeitraum 1979 - Sep. 2012. Rohdaten zur Berechnung: Meteorologische Station Diepholz. Daten: NLWKN

3.2.4 Änderungen des Seevolumens

Die täglichen Änderungen des Seevolumens wurde über den Wasserstand Wst (Messstelle Dümmer Olgahafen), die Wasserfläche von 12,4 Mio m² und die Schilffläche (eigentlich Fläche mit Ufervegetation) von 2,57 Mio m² (Differenz zur eingedeichten Fläche von 15 Mio m² (Flächenangaben NLWKN). berechnet. Dabei wurde für den Bodengrund in der Schilffläche eine Porosität von 50% angenommen.

3.2.5 Abfluss aus dem See

Der Abfluss aus dem See geschieht über die Lohne (festgesetzter Mindestabfluss 0,3 m³/s), die Gra-wiede, die Alte Hunte und weitere kleine Gräben.

Der Abfluss aus dem See (Formel Q_{Ab} , unten) wurde berechnet als Summe bzw. Differenz aller positiv auf den Abfluss wirkenden Parameter Gesamt-Zufluss Q_{GesZu} , Niederschlag Nd auf die eingedeichte Fläche, negative Volumenänderungen VolÄnd) und aller negativ auf den Abfluss wirkenden Parameter (Verdunstung Wasser (Penman- oder Dalton-Verfahren) Vd_{Was}), Verdunstung Schilf Vd_{Sch} , positive Volumenänderungen VolÄnd) (alle Einheiten m³/d). Besonders sensitiv reagiert der berechnete Abfluss auf die Volumenänderungen des Sees, die aus dem Wasserstand abgeleitet wurden. Der Wasserstand wurde mit einer Auflösung von 1 cm aufgezeichnet.

$$Q_{Ab} = Q_{GesZu} + Nd - Vd_{Was} - Vd_{Sch} - VolÄnd \quad (\text{Formel } Q_{Ab})$$

Die tägliche Messung des Wasserstandes war bis zu einem gewissen Grad fehlerbehaftet. Es wird davon ausgegangen, dass der Wasserstand sich am Olgahafen (Nordwesten des Sees) bei starken Nordwest- oder Südost-Winden durch das auf- bzw. ablaufende Wasser erheblich unterscheiden kann. Eine Änderung des Wasserstandes um 1 cm/d wirkt sich auf den Abfluss rechnerisch mit 136.850 m³/d oder 1,58 m³/s aus, was etwa das 5-fache der mittleren Verdunstung, das 3-fache der 10%-Perzentile des Abflusses Hunte Schäferhof und das 5-fache des mittleren täglichen Niederschlages ist. Der Fehler aus den täglichen Wasserstandsänderungen kann durch Mittelung/Aufsummierung über längere Zeiträume minimiert werden.

3.3 Parameter der Bilanz

Die Bilanz wurde für die Parameter: Ges-P, Ges-N, NO₃-N, TOC (*Total Organic Carbon*), SO₄, Ca, HCO₃, Salzsumme (berechnet aus der elektrischen Leitfähigkeit) und Cl aufgestellt.

3.4 Aufstellung der Bilanz

Für die Stoffbilanz des Dümmer wurde abgewandelt nach Ripl, Feibicke *et al.* (1994) die Fracht aus Abfluss (Q) und Konzentration (C) ermittelt:

$$\text{Fracht} = Q * C$$

Die Stoffbilanz kann dann aus einzelnen Frachten aufgestellt werden. Indices der einzelnen Frachten sind: $_{\text{GesZu}}$ = Gesamt-Zufluss zum See, $_{\text{Ab}}$ = Abfluss aus dem See, $_{\text{Was}}$ = offene Wasserfläche, $_{\text{Sch}}$ = Schilf, $_{\text{ext}}$ = extern, $_{\text{Int}}$ = intern. Für die externe Stoffbilanz (Bil_{Ext}) ergibt sich dann (Formel Bil_{Ext}):

$$\text{Bil}_{\text{Ext}} = Q_{\text{GesZu}} * C_{\text{Zu}} + N_d * C_{N_d} - Q_{\text{ab}} * C_{\text{ab}} \quad (\text{Formel Bil}_{\text{Ext}})$$

mit:

Bil_{Ext} = Externe Stoffbilanz (g/d)

Q_{GesZu} = Wasserzuflussmenge (m^3/d)

C_{Zu} = Konzentration im Zufluss (Hunte Schäferhof oder Niederschlag) (g/m^3)

N_d = Niederschlag auf die offene Wasserfläche (m^3/d)

C_{N_d} = Konzentration im Niederschlag (g/m^3)

Q_{ab} = Abfluss aus dem See (m^3/d)

C_{ab} = Konzentration im Abfluss (g/m^3)

Um den Einfluss der Verdunstung mit ihrer Erhöhung der Konzentration im Wasser zu berücksichtigen, wird in die Formel (Bil_{Ext}) die obige Formel zur Berechnung des Abflusses aus dem See (Formel Q_{ab}) eingesetzt:

$$\text{Bil}_{\text{Ext}} = Q_{\text{GesZu}} * C_{\text{Zu}} - (Q_{\text{GesZu}} + N_d - V_{d_{\text{Was}}} - V_{d_{\text{Sch}}} - \text{Vol}_{\text{Änd}}) * C_{\text{ab}} + N_d * C_{N_d} \quad (\text{Formel Bil}_{\text{Ext}} 2)$$

Die interne Nettobilanz (Formel Bil_{Int}) wurde aus der Änderung des Stoffinhaltes (Stoffmenge) im Wasserkörper im Bilanzzeitraum t_1 bis t_2 abzüglich der externen Bilanz Bil_{Ext} berechnet:

$$\text{Bil}_{\text{Int}} = \text{Vol}_{t_2} * C_{t_2} - \text{Vol}_{t_1} * C_{t_1} - \text{Bil}_{\text{Ext}} \quad (\text{Formel Bil}_{\text{Int}})$$

mit

Vol_{t_1} = Wasservolumen zum Bilanzzeitpunkt t_1 = Wassertiefe * Wasserfläche

Vol_{t_2} = Wasservolumen zum Bilanzzeitpunkt t_2

C_{t_1} = Konzentration im Wasser zum Zeitpunkt t_1

C_{t_2} = Konzentration im Wasser zum Zeitpunkt t_2

Die Wassertiefe wurde aus Pegeldata des Wasserstandes im Dümmer mit einem mittleren Pegel von 37,11 m ü. NN und einer mittleren Wassertiefe von 1,10 m berechnet.

Um anschauliche Größen zu erhalten, wurden alle Bilanzen durch Division durch die Seefläche (offene Wasserfläche, m^2) auf die Einheit [$\text{g}/(\text{m}^2 * \text{d})$] gebracht.

Bei den errechneten Parametern „Externe Bilanz“ und „Interne Nettobilanz“ sind die Vorzeichen so gewählt, dass positive Werte immer eine Erhöhung der Konzentration im Wasser des Dümmer ergeben (z.B. durch Zufluss oder durch Freisetzung von Stoffen aus dem Sediment), während negative Werte eine Verringerung der Konzentration im Wasser ergeben (z.B. durch Abfluss, Sedimentation/Festlegung im Sediment oder durch Abgabe in die Atmosphäre).



Abb. 2: Hunte Schäferhof 1990-2011. Abfluss, Ges-P, Ges-N. Tagesdaten und GÜN-Proben. Daten: NLWKN



Abb. 3: Hunte Schäferhof. Gesamt-Phosphor (Ges-P), Gesamt-Stickstoff (Ges-N) und Nitrat-Stickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$) 1993-2011. Tagesmischproben, Proben des Gewässerüberwachungssystems Niedersachsen (GÜN) und kubischer Spline. Korrigierte Werte. Daten NLWKN (verändert).

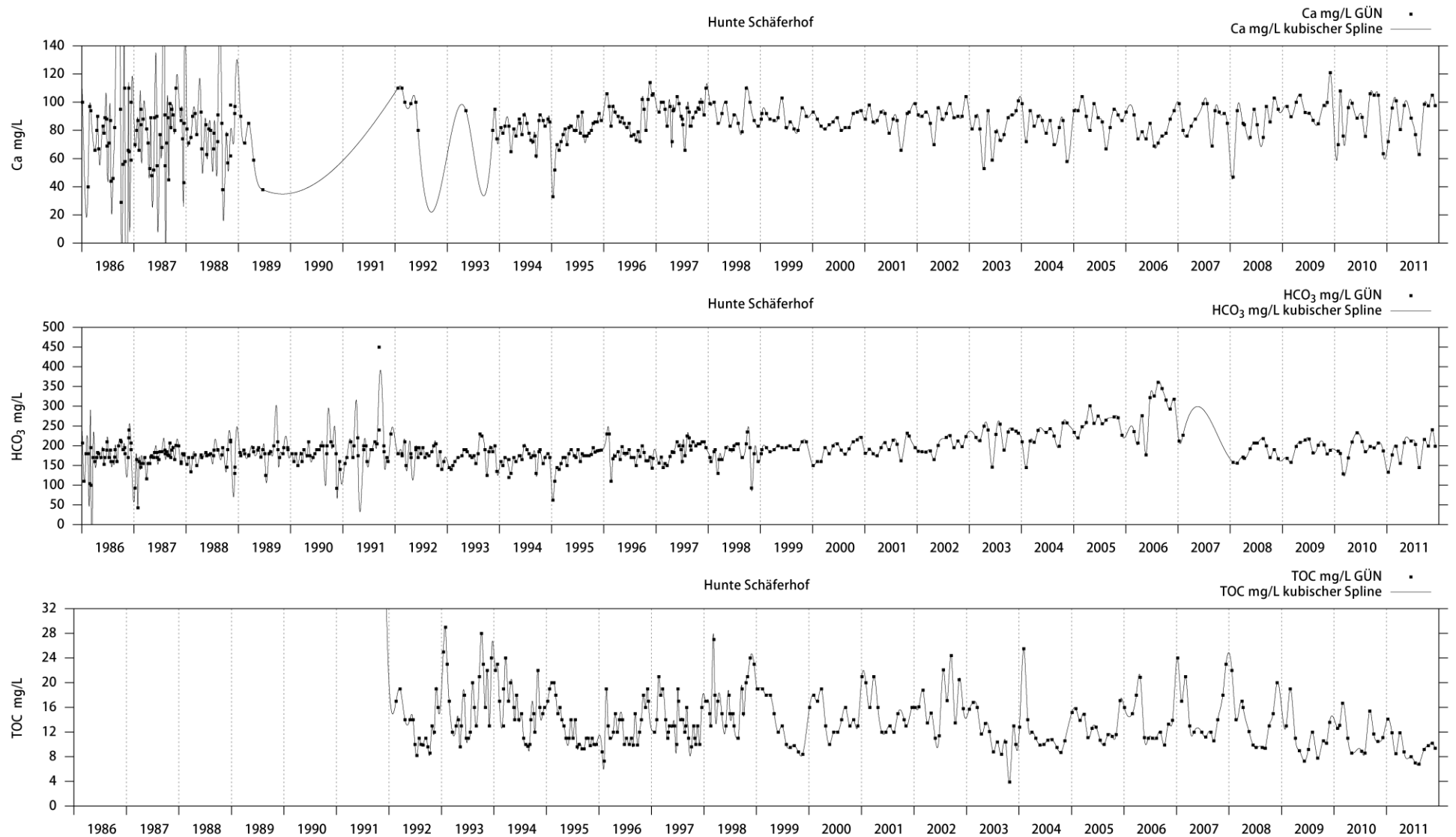


Abb. 4: Hunte Schäferhof. Calcium (Ca), Hydrogenkarbonat (HCO₃) und *Total Organic Carbon* (TOC) 1993-2011. Tagesmischproben, Proben des Gewässerüberwachungssystems Niedersachsen (GÜN) und kubischer Spline. Unkorrigierte Werte. Daten NLWKN (verändert).

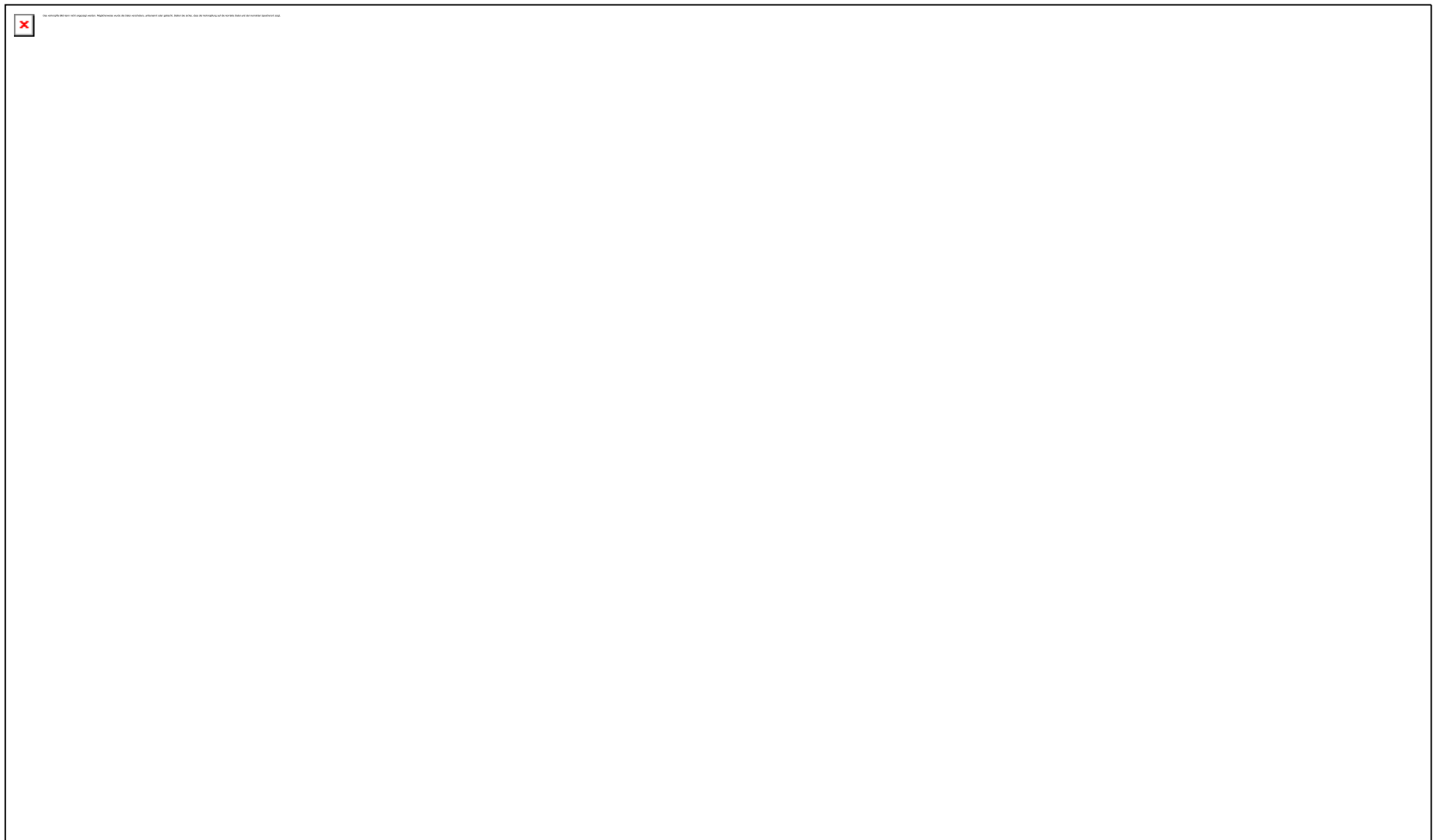


Abb. 5: Hunte Schäferhof. Sulfat (SO_4), Salzsumme und Chlorid (Cl) 1993-2011. Tagesmischproben, Proben des Gewässerüberwachungssystems Niedersachsen (GÜN) und kubischer Spline. Unkorrigierte Werte. Daten NLWKN (verändert).



Abb. 6 : Dümmer Olgahafen. Gesamt-Phosphor (Ges-P), Gesamt-Stickstoff (Ges-N), Nitrat-Stickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$). 1986-2011. Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen (GÜN) und kubischer Spline. Rohdaten NLWKN.



Abb. 7: Dümmer Olgahafen. Calcium (Ca), Hydrogenkarbonat (HCO_3), *Total Organic Carbon* (TOC). 1986-2011. Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen (GÜN) und kubischer Spline. Rohdaten NLWKN.



Abb. 8: Dümmer Olgahafen. Sulfat (SO_4), Salzsumme, Chlorid (Cl). 1986-2011. Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen (GÜN) und kubischer Spline

4 Ergebnisse und Diskussion der Bilanzierung

4.1 Hydrologie

Die Hydrologie des Dümmer wird hauptsächlich vom Zufluss bestimmt. Die nächst wichtigen Bilanzterme sind Niederschlag, Verdunstung der freien Wasserfläche und Verdunstung der Uferzone („Schilffläche“). (Abb. 9, S. 21).

Die aus den Zuläufen (Gesamtzufluss + Niederschlag) und der Verdunstung (freie Wasseroberfläche und Schilffläche) berechneten Gesamtabflüsse aus dem Dümmer verteilen sich auf Lohne (größter Abfluss), Grawiede, Alte Hunte und weitere kleine Gräben. Bei einem Vergleich des berechneten Gesamtabflusses mit dem Abfluss der Lohne zeigte sich, dass die Kurven sehr eng parallel laufen und bei Hochwasser der Gesamtabfluss erheblich über dem der Lohne liegt (ohne Abbildung). Dabei weisen wie nicht anders zu erwarten die Tageswerte aufgrund der Messvarianz des Wasserstandes im Dümmer eine erhebliche Schwankung auf, während die Wochenmittelwerte bereits eine gute Korrelation ergeben.

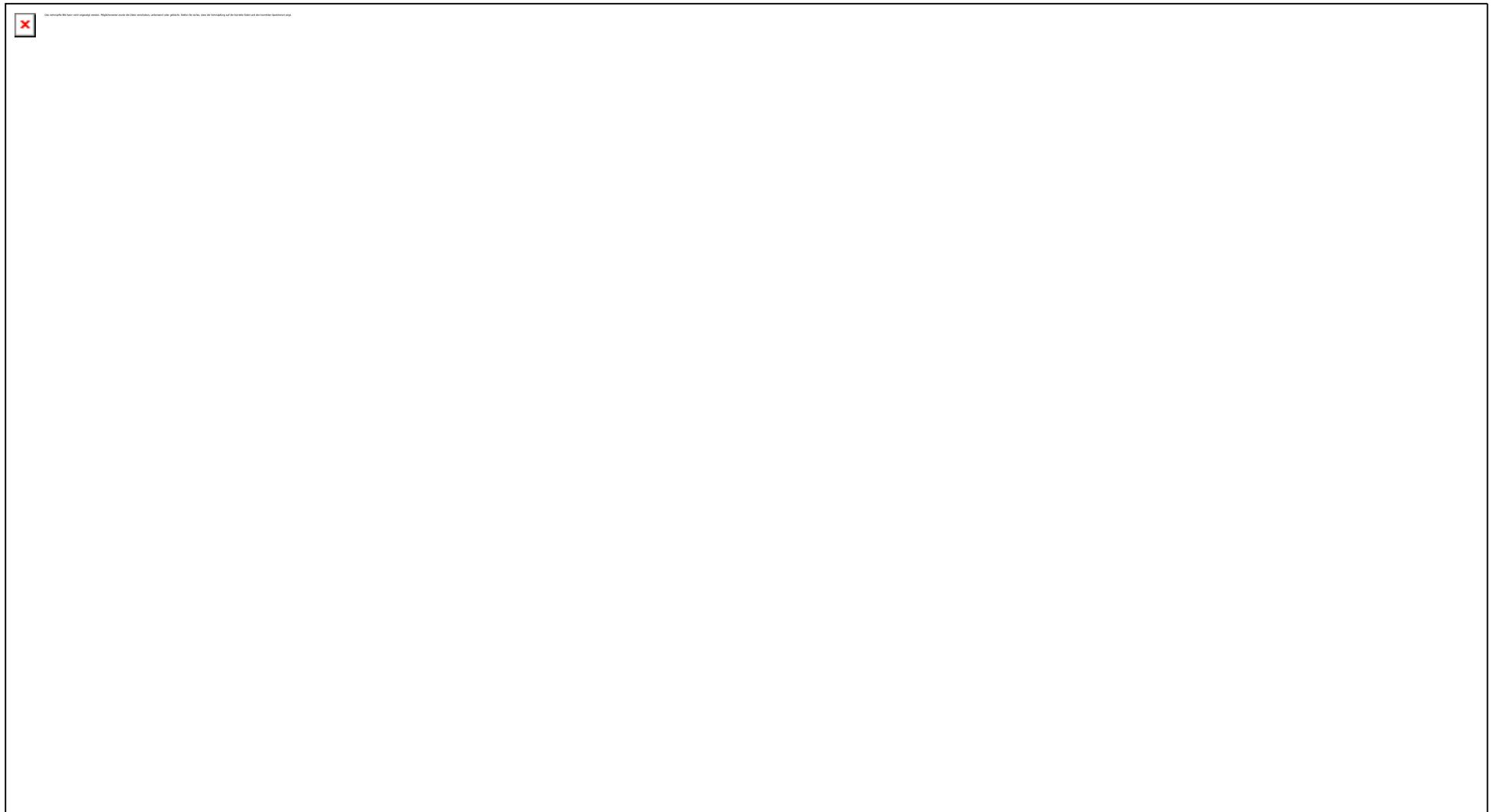


Abb. 9: Hydrologie des Dümmer, Wochenmittelwerte. Verdunstung des Wassers mit Dalton- und Penman-Verfahren, Verdunstung Schilf: Grasreferenzverdunstung. Berechnung des Seeabflusses mit Verdunstung nach dem Penman-Verfahren. Wasserstand. Daten NLWKN, meteorologische Daten: Station Diepholz.

4.2 Genauigkeit der Bilanz

Durch verschiedene Tests mit der Variation verschiedener Werte wurde die Sensitivität der Ergebnisse getestet. Aus Zeitgründen konnten noch nicht alle wünschenswerten Tests durchgeführt werden. Aus den Tests lassen sich Aussagen über die Genauigkeit der aufgestellten Bilanz ableiten.

Auf die Probleme mit dem Abfluss aus dem See und seiner Abhängigkeit vom Wasserstand im See wurde bereits hingewiesen. Durch die Betrachtung langer Zeiträume oder von Mittelwerten mit hoher Anzahl lassen sich diese Ungenauigkeiten sehr weitgehend minimieren.

Die größte Fehlerquelle für die Bilanz stellt offensichtlich die Berechnung der Fracht im Zufluss dar. Von einem geringen Fehler wird dabei für die Parameter Ges-P, Ges-N, $\text{NO}_3\text{-N}$ und TOC ausgegangen, die ca. 2003 bis 2010 als Tagesmischproben bestimmt wurden. Die Salzsumme (berechnet aus der elektrischen Leitfähigkeit) wurde ca. 2003 bis 2007 in Tageswerten erfasst. Starke Ausschläge der Konzentration durch Schwankungen des Tagesabflusses werden hierbei gut abgebildet. Für eine Präzisierung der Bilanz müssten in Zukunft bei diesen Parametern die saisonalen Mittelwerte für diese Zeiträume getrennt berechnet werden. Diese Fragestellung wird besonders interessant, wenn sich im nächsten Jahr komplette Jahresmuster für die dann vorliegenden 3 Jahre nach der Bornbachumleitung berechnen lassen.

Bei den anderen Parametern (Ca, HCO_3 , SO_4 und Cl) liegen generell keine Tagesdaten vor. Für Chlorid hat sich gezeigt, dass das Fehlen von Tagesdaten zu einem Fehler in der Bilanzierung führt. Bei der Berechnung der Bilanz wurde generell von mit kubischem Spline interpolierten Konzentrations-Tageswerten und ihrer Multiplikation mit dem Tagesabfluss ausgegangen. Bei Hochwasserereignissen mit einem hohen Anteil von Niederschlagswasser im Abfluss ist jedoch mit einer Konzentrationsänderung (Abnahme für gelöst eingetragene Komponenten, evtl. Zunahme für erosiv eingetragene Komponenten) zu rechnen. Für alle Parameter müsste daher in einem weiteren Schritt geprüft werden, ob sich bessere Verfahren zur Abschätzung der Tagesfracht finden lassen.

Die stoffliche Bilanzierung des Dümmers baut auf den Wasseranalysen (ca. monatliche GÜN-Probenahme) im Dümmer auf. Es ist bekannt, dass sich in einem See gerade in der Vegetationszeit eine deutliche Differenzierung der Konzentrationen einstellen kann. Dies wird noch verschärft durch aufrahmende Blüten von Cyanobakterien, die danach vom Wind verdriftet und teilweise wieder ins Wasser eingemischt werden. Diese realen Konzentrationsdifferenzen werden noch durch analytische Unschärfen, die in der Regel auch über 3 % betragen dürften, verstärkt.

Beim Volumen des Dümmers von 13,6 Mio m^3 bedeutet ein Varianz der Analysen von 1 mg/L eine Änderung des Stoffinhaltes im See von 13,6 t. Kleinste Schwankungen der Messgrößen führen deshalb schon rein rechnerisch zu entsprechenden Schwankungen der Bilanzergebnisse. Dies ist z.B. bei der Internen Bilanz des Gesamt-Phosphors (Abb. 10c, S. 25) zu scheinbaren Mustern der Freisetzung und Festlegung, die jedoch eng korreliert sind mit den Schwankungen der P-Konzentration im See und damit für die Interpretation von Wochenwerten der Internen Bilanz keine Bedeutung haben.

Es wurde trotzdem mit den über einen kubischen Spline erzeugten Wochendaten gearbeitet um die Aussagefähigkeit die Information für weitere Berechnungen, insbesondere der Berechnung eines langjährigen Jahresganges (z.B. Abb. 11, S. 26), zu erhalten. Durch die Bildung von Mittelwerten aus mehreren Einzelwerten (hier 19 Jahre) dürften auch die Auswirkungen von Messwertvarianzen weitgehend minimiert sein.

Für den Dümmer scheint sich damit zu zeigen, dass Tagesdaten weniger wichtiger für die Bilanzierung sind als die Erfassung von räumlichen Differenzen.

4.3 Einzelparameter

4.3.1 Gesamt-Phosphor Bilanz

Die Ges-P-Bilanz des Dümmer wird vom Zufluss bestimmt (Abb. 10a, S. 25). Auffällig sind winterliche Maxima der P-Fracht im Zufluss. Ein gleich hoher Export von Phosphor über die Abflüsse des Sees findet nicht statt.

Auffällig sind Phasen verstärkter P-Festlegung im Winterhalbjahr, die mit hohen externen Belastungen des Sees verbunden sind. Die bei hohen Abflüssen transportierten Phosphor-haltigen Partikel sind wahrscheinlich sehr gut sedimentierbar und verursachen daher die hohen Festlegungsraten.

Die Langzeitenentwicklung zeigt hohe winterliche P-Festlegungen 1993/94, 1994/95 und 1998/99. Ab Frühjahr 1995 bis Ende 1997 wurden geringe P-Festlegungen bilanziert, die allerdings darauf beruhen, dass die Zulaufkraft besonders gering ist. 2010 und 2011 (seit der Bornbachumleitung) gibt es einen Trend zu geringfügigen P-Freisetzen aus dem Sediment. In diesen Jahren ist wiederum eine relativ geringe P-Zulaufkraft beobachtet worden, so dass diese Freisetzung nicht ursächlich mit der Bornbachumleitung zu tun haben muss. Verwunderlich wäre dieser Zusammenhang allerdings nicht, da extern entlastete Seen oft mit einer mehrjährigen Phase erhöhter P-Freisetzung aus dem Sediment reagieren.

Zum Vergleich von P-Tagesmischproben und GÜN-Daten

Für die Bilanzierung wurden einerseits ca. monatliche GÜN-Gewässerproben (1994 bis 2002) und andererseits P-Tagesmischproben (2003-2010) verwendet (Abb. 3, S. 14). Da die Tagesmischproben punktuell höhere Konzentrationen aufwiesen, bestand die Möglichkeit, dass in Phasen mit monatlichen GÜN-Gewässerproben die Zulaufkräften unterschätzt würden. In der langjährigen P-Freisetzung (Abb. 10d, S. 25) findet sich jedoch das Muster der Verwendung von GÜN-Monatsproben nicht wider, vielmehr ist das Muster von Phasen stärkerer und schwächerer P-Festlegung klar mit dem Auftreten von höheren Abflüssen und Abflussspitzen korreliert (Abb. 2, S. 13).

Langjähriger Jahresgang der Ges-P Bilanz

Im mittleren Jahresgang der Ges-P Bilanz treten saisonale Unterschiede bei der Festlegung und Freisetzung auf. Im Januar und Februar werden bei hoher Zulaufkraft die höchsten Festlegungsraten erreicht (Abb. 11c, S. 26).

Im März betragen die P-Festlegungsraten im langjährigen Mittel immer noch $3,6 \text{ mg P}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (Abb. 11c, S. 26). Bezogen auf die gesamte Wasserfläche des Dümmer sind das demnach $45 \text{ kg P}/\text{d}$. Die Ges-P Fracht der Zuflüsse liegt dagegen im März bei $9,6 \text{ mg P}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, d.h. es werden 38 % des eingetragenen Phosphors sedimentiert. Der Anteil der Sedimentation im März hatte eine besondere Bedeutung für die Dimensionierung des Schilfpoldersystems (Wolter & Köhler 2012), da der Monat März wegen seiner hohen Abflüsse, hohen Phosphorkrachten und der Wirkung auf den Beginn der jährlichen Phytoplanktonentwicklung im Dümmer als besonders kritisch angesehen wurde. Die Sedimentation von 38 % des eingetragenen Phosphors wäre ein guter Wert; er würde bedeuten, dass die Ablaufkonzentration aus dem Schilfpoldersystem sogar bei $81 \text{ } \mu\text{g P}/\text{L}$ liegen könnte, um nach der Sedimentation von 38 % des eingetragenen Phosphors im Dümmer die Zielkonzentration von $50 \text{ } \mu\text{g P}/\text{L}$ zu erreichen. Allerdings ist dies eine hypothetische Betrachtung, da nach einer Behandlung des Wassers im Schilfpoldersystem die gut sedimentierbaren Phosphorfractionen entfernt sein werden und schwerer sedimentierbarer Phosphor den Dümmer erreichen wird. Eine Spekulation über das zukünftige Ausmaß der Sedimentation kann nicht angestellt werden, trotzdem ist die März-Sedimentation günstig, weil die im Schilfpoldersystem schwer zu erreichende P-Ablaufkonzentration von $50 \text{ } \mu\text{g P}/\text{L}$ etwas überschritten werden kann.

Im Mittel ist die interne P-Bilanz von Anfang Mai bis Mitte Juni weitgehend ausgeglichen (Abb. 11c, S. 26). Danach beginnt eine sommerliche Phase der P-Freisetzung, die Mitte Juli ihr Maximum erreicht und ab Mitte August in eine P-Festlegung übergeht. Die mittleren P-Freisetzungsraten aus dem Sediment erreichen im Juli $3,3 \text{ mg P}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, was für den gesamten Juli eine mittlere Aufstockung der Wassersäule mit Phosphor von $89 \text{ } \mu\text{g P/L}$ ergibt. Dies sind keine sehr hohen Werte, aber für eine Ankurbelung von Phytoplanktonblüten durchaus ausreichend. Zum Vergleich: die Phosphorfreisetzung aus den Sedimenten der Inneren Schlei erreicht im Sommer Werte von ca. $20\text{-}25 \text{ mg P}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (Ripl 1986). Der Wert von $3,3 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ P-Freisetzung ist ein langjähriger Mittelwert für den Monat Juli, der natürlich in einzelnen Jahren über- oder unterschritten werden kann (vgl. Abb. 10c, S. 25).

Für den Rest des Jahres dominiert im Dümmer meist die Sedimentation (Festlegung) von Phosphor, die im Oktober durch eine Phase fast ausgeglichener Verhältnisse unterbrochen wird (Abb. 10, S. 25). Darin spiegeln sich wahrscheinlich die herbstlichen Freisetzungen von Phosphor nach dem Absterben von dichten Algenblüten wider.

Vergleich von P-Ablagerung und P-Export durch Entschlammung

Die Sedimentation von Phosphor (= negative P-Freisetzung) kann mit der Massenbilanz der Entschlammung des Dümmer verglichen werden. Nach der P-Bilanz wurden von 1994 bis 2009 netto $13,7 \text{ g P}/\text{m}^2$ Seefläche oder $0,855 \text{ g P}/(\text{m}^2 \text{ Seefläche} \cdot \text{a})$ sedimentiert (Abb. 10, S. 25). Für die gesamte Seefläche bedeutet das eine mittlere Sedimentation von $10,6 \text{ t P/a}$.

Durch die Entschlammung wurden von 1994 bis 2009 ca. 684.600 m^3 Frischschlamm oder $42.800 \text{ m}^3/\text{a}$ entnommen (Prante, NLWKN, pers. Mitt.). Von Yasseri (Institut Dr. Nowack) wurden 2011 Sedimentanalysen (3 Kerne) im Dümmer durchgeführt. Dabei wurden in 0-10/10-15/15-20 cm Sedimenttiefe im Mittel $1100/510/400 \text{ mg P/kg TS}$ gefunden. Nach Umrechnung mit dem Trockensubstanzanteil $19/25/34 \%$ und der Dichte (eigene Berechnung: $1,1/1,2/1,2 \text{ g/cm}^3$) ergeben sich $230/150/170 \text{ g P/m}^3$ Sediment. Mit der entnommenen Sedimentmenge wurden auf Grundlage dieser Sedimentanalysen je nach den betrachteten Sedimentschichten $9,9/6,3/7,3 \text{ t P/a}$ aus dem See entfernt. Auffällig ist, dass die höchsten P-Mengen mit der relativ wässrigen obersten Sedimentschicht von 0-10 cm entfernt werden.

Das Mittel der P-Gehalte im Sediment liegt bei den Analysen von Yasseri (Institut Dr. Nowack) bei ca. 680 mg P/kg TS . Bei den Sedimentuntersuchungen von Ripl (1983) wurden in analogen Sedimentschichten im Mittel etwa 1900 mg P/kg TS ermittelt. Wahrscheinlich hat der P-Gehalte der Sedimente erst im Laufe der Jahre abgenommen und es sind früher noch mehr als doppelt so hohe Phosphormengen mit dem Sediment aus dem See entfernt worden, als es auf der Grundlage der Sedimentanalysen von 2011 berechnet worden ist. Damit hat die Entschlammung zu Zeiten hoher P-Gehalte im Sediment vermutlich mehr Phosphor aus dem Sediment entfernt, als durch die Sedimentation im See abgelagert wurden. Für eine positive Wirkung dieser Maßnahme auf die Wasserqualität des Dümmer sind jedoch die Phosphoreinträge in den See und die daraus resultierenden Konzentrationen im Wasserkörper zu hoch.

Bei diesen Größenordnungen des P-Exportes kann davon ausgegangen werden, dass die Abnahme der Phosphorgehalte im Sediment zwischen 1983 und 2011 durch die alljährlichen Entschlammungsmaßnahmen verursacht wurde. Das ist auch insofern nachvollziehbar, als die P-Gehalte im Sediment des Dümmer mit der Tiefe abnehmen und bei der Entschlammung vornehmlich obere Sedimentschichten und Treibmudde entfernt werden. In der Bilanz (Abb. 10, S. 25) erscheint dieser „anthropogene“ P-Export aus dem Dümmer nicht, da der freie Wasserkörper und der Abfluss aus dem See bei der Entschlammungsmaßnahme nicht oder kaum beeinflusst werden.

Es ist davon auszugehen, dass nach Errichtung eines Schilfpolders ein Teil des heute im Dümmer zur Sedimentation kommenden Materials im Schilfpolder zurückgehalten wird und damit die Notwendigkeit für Entschlammungsmaßnahmen in der Zukunft abnehmen wird.



Abb. 10: Wochenmittel der Gesamt-Phosphor Bilanz des Dümmers. (a) Ges-P-Inhalt des Wasserkörpers, Ges-P-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe P-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne P-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der P-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN

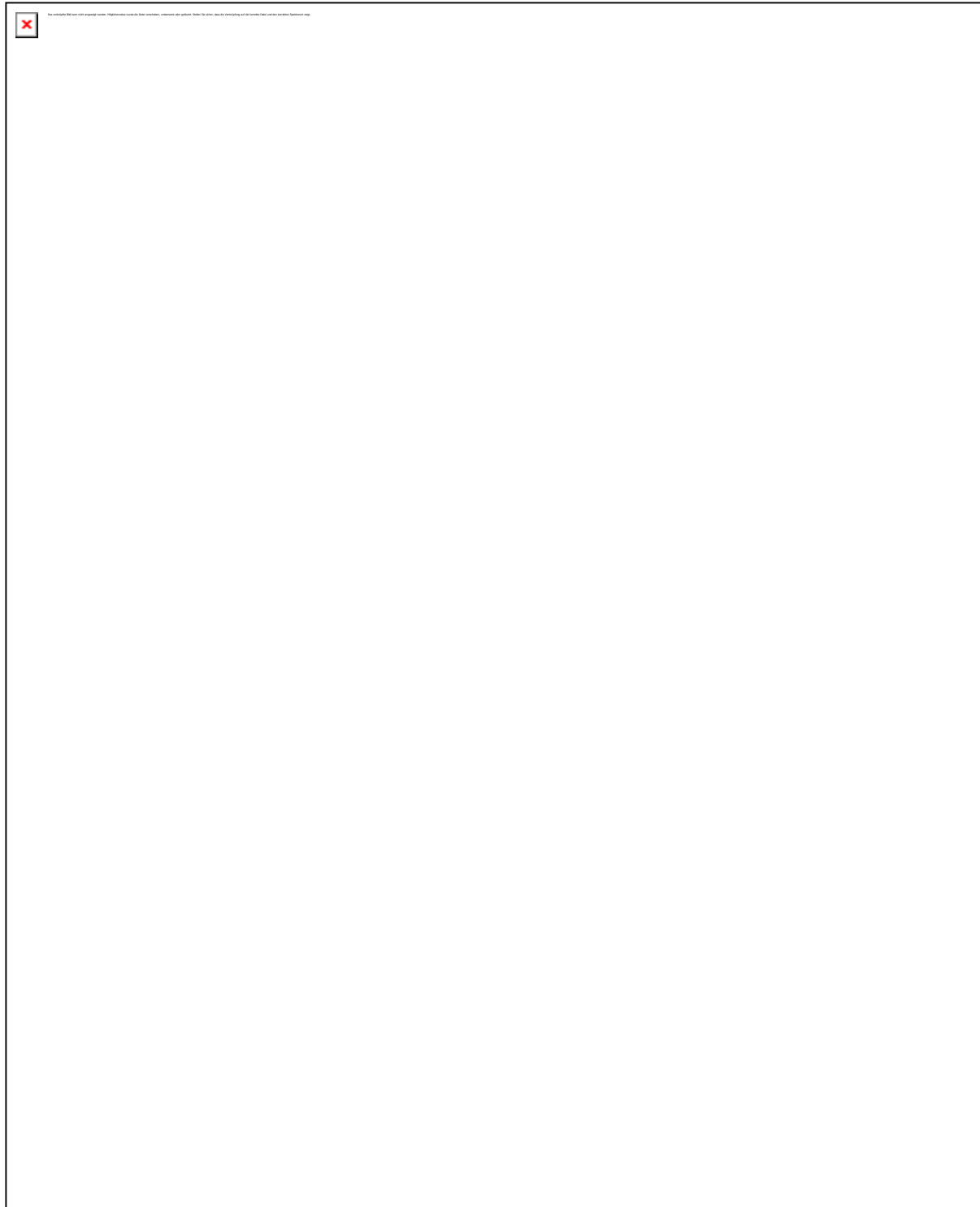


Abb. 11: Phosphorbilanz des Dümmer - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) Ges-P-Inhalt des Wasserkörpers, Ges-P-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe P-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne P-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der P-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN

4.3.2 Gesamt Stickstoff und Nitrat-Stickstoff Bilanz

Die Parameter Gesamt-Stickstoff und Nitrat-Stickstoff müssen gemeinsam betrachtet werden. Gesamt Stickstoff ist im Sommer eher durch den Gehalt an Phytoplankton bzw. Detritus bestimmt, im Winter eher durch die hohe Nitratfracht der Hunte.

Durch den hohen Nitratgehalt der Hunte kommt es im Dümmer in den Wintermonaten zu einer erheblichen Denitrifikation, die mit einer Teiloxidation der Sedimente verbunden ist. Aus bilanztechnischen Gründen erscheint die Denitrifikation als negative interne Nettobilanz. Das Maximum der Denitrifikation wird mit ca. $0,2 \text{ g NO}_3\text{-N}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ Ende März bis Anfang April erreicht (Abb. 15c, S. 31). Über den Sommer und vor allem im Herbst dominiert wahrscheinlich die Stickstoffsedimentation (Abb. 13c, S. 29). Eine geringe Nitratbildung Ende Juli/Anfang August ist wahrscheinlich auf Nitrifikation zurückzuführen, die aus bilanztechnischen Gründen als positive Freisetzung berechnet wird (Abb. 15c, S. 31). Die langjährige mittlere „Ablagerung“ des Gesamt-Stickstoffs (Abb. 13d, S. 29) von $30 \text{ g N}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ rührt zum größten Teil aus der Denitrifikation von $25 \text{ g NO}_3\text{-N}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ (Abb. 15d, S. 31).



Abb. 12: Wochenmittel der Gesamt-Stickstoff Bilanz des Dümmers. (a) Ges-N-Inhalt des Wasserkörpers, Ges-N-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe N-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne N-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der N-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN

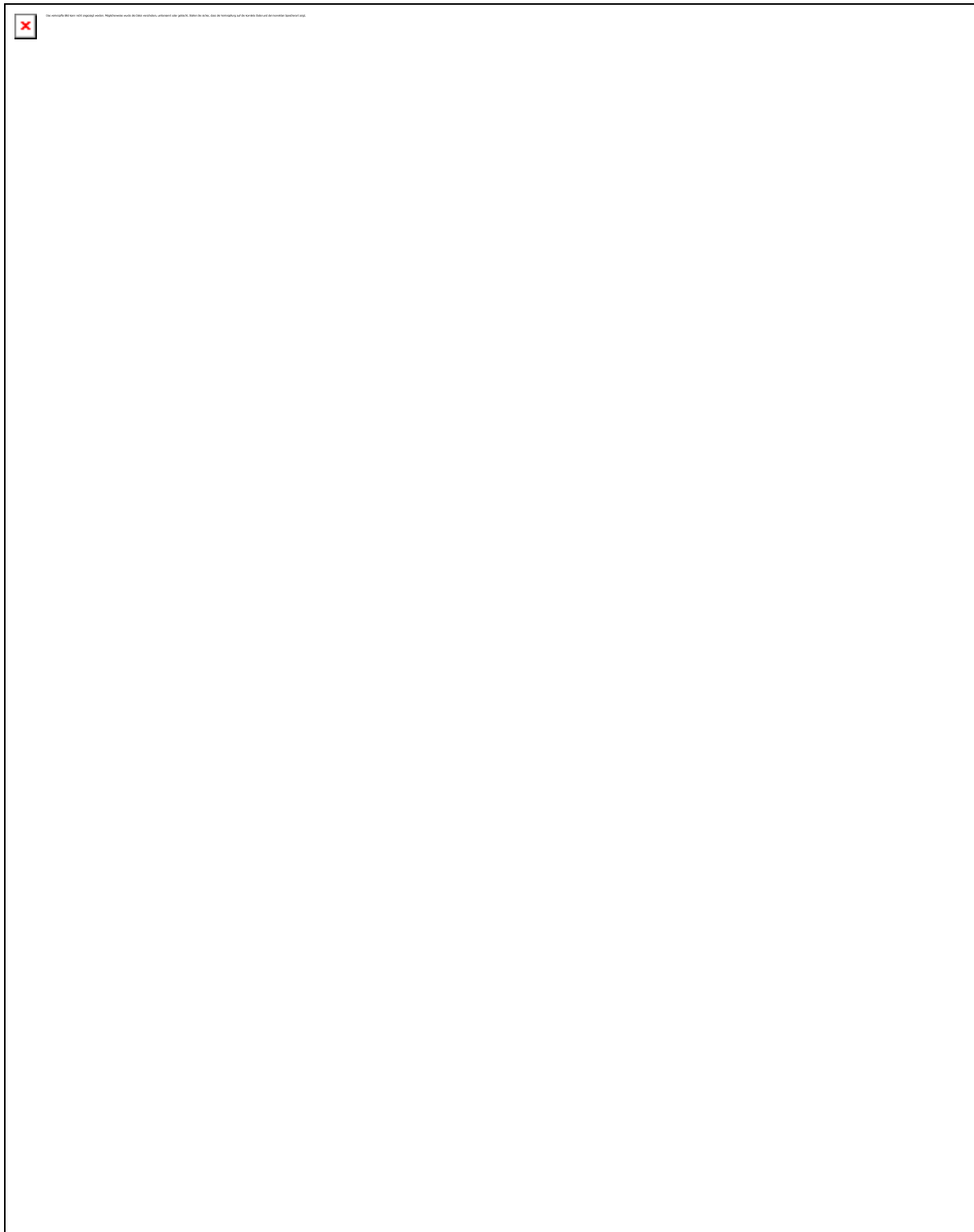


Abb. 13: Stickstoffbilanz des Dümmers - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) Ges-N-Inhalt des Wasserkörpers, Ges-N-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe N-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne N-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der N-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN



Abb. 14: Wochenmittel der Nitrat-Stickstoff Bilanz des Dümmers. (a) $\text{NO}_3\text{-N}$ -Inhalt des Wasserkörpers, $\text{NO}_3\text{-N}$ -Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe $\text{NO}_3\text{-N}$ -Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher), (c) interne $\text{NO}_3\text{-N}$ -Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN

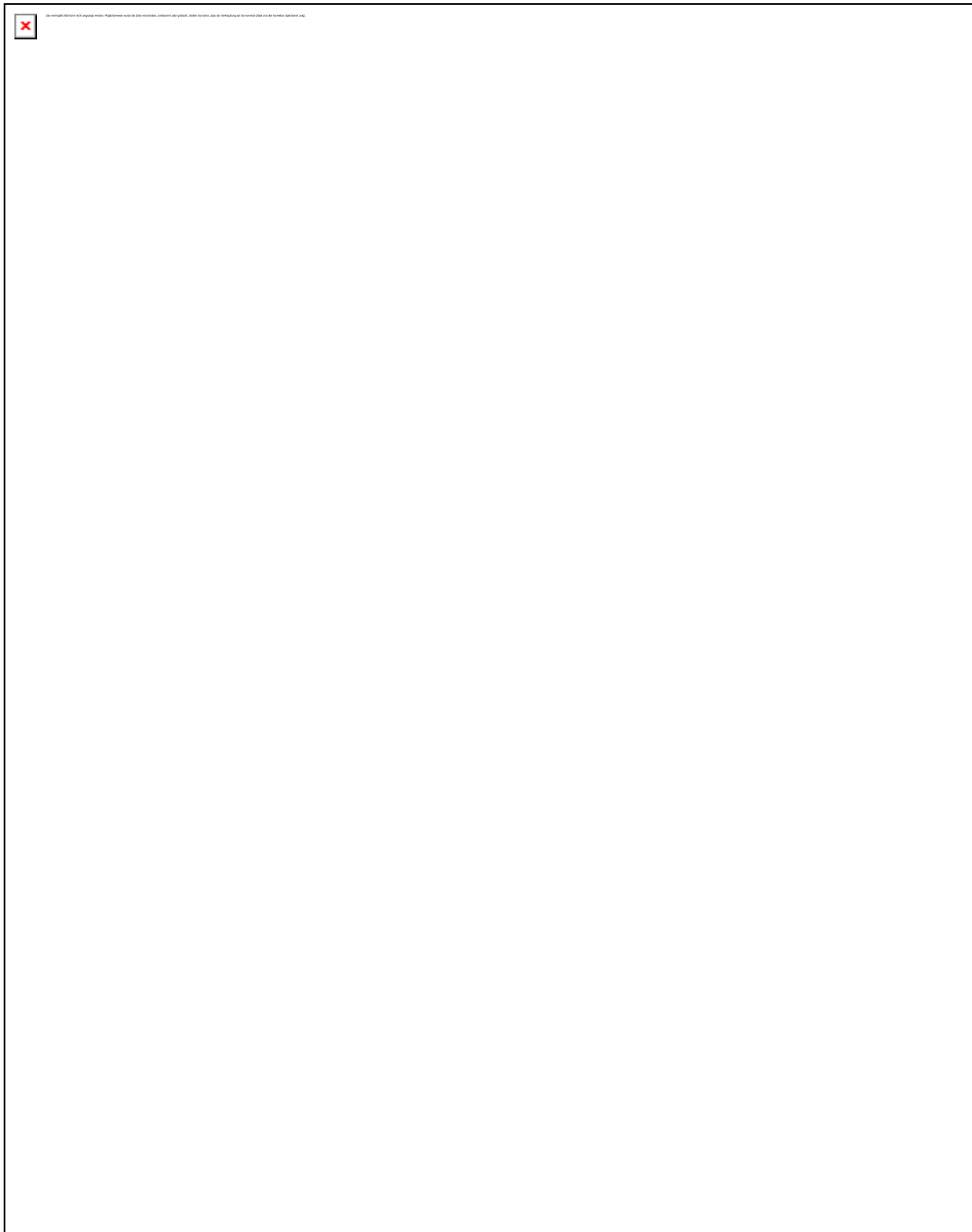


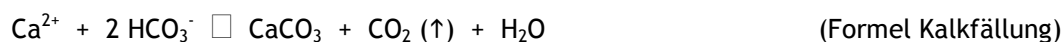
Abb. 15: Nitrat-Stickstoffbilanz des Dümmers - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) $\text{NO}_3\text{-N}$ -Inhalt des Wasserkörpers, $\text{NO}_3\text{-N}$ -Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe $\text{NO}_3\text{-N}$ -Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne $\text{NO}_3\text{-N}$ -Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN

4.3.3 Calcium und Hydrogenkarbonat Bilanz

Calcium und Hydrogenkarbonat können im See bei intensiver Produktion als Kalk ausgefällt werden. Die Ausfällung von Kalk ist neben der Sedimentation von organischer Substanz der quantitativ wichtigste Ablagerungsprozess in kalkreichen Seen. Da Kalk einer der Hauptbestandteile des Sedimentes ist, besteht über den Kalk die Möglichkeit, über die Wasserbilanz berechnete Sedimentationsraten und über Sedimentanalysen oder Sedimentkartierungen gewonnene Abschätzungen zur Sedimentation zu vergleichen. Darüber hinaus kann bei der Kalkfällung Phosphor mitgefällt und im Sediment festgelegt werden. Bei intensiven Respirationsprozessen am Sediment kann es durch Kohlendioxidbildung auch wieder zu einer Auflösung von Kalk kommen, die in der Bilanz ebenfalls erfasst werden kann.

Mit der Kenntnis der saisonalen Verteilung von Sedimentation und Auflösung von Kalk können Erkenntnisse über die Intensität und zeitliche Verteilung von Produktions- und Respirationsprozessen im See gewonnen werden.

Bei der Kalkfällung wird Kalk aus Calcium und Karbonat gebildet und ausgefällt. Da das Karbonat aus Hydrogenkarbonat (auch Alkalinität genannt) nachgebildet wird, können bei der Kalkfällung pro Calcium-Ion 2 Hydrogenkarbonat-Ionen aus dem Wasser entfernt werden. Dabei kann das gebildete CO_2 entweder in die Atmosphäre entgasen oder für die Kohlenstofffixierung im Zuge der Photosynthese von Pflanzen aufgenommen werden (Formel Kalkfällung unten). Stöchiometrisch werden dann pro 40 g Calcium ca. 122 g Hydrogenkarbonat aus dem Wasser gefällt. Andere Möglichkeiten zur Veränderung der Alkalinität liegen in der Desulfurikation und Denitrifikation (Bildung/Erhöhung von Alkalinität) und in der Sulfurikation und Nitrifikation (Verbrauch/Senkung von Alkalinität).



In der Bilanz des Dümmer wurden im Mittel 87 g $\text{Ca}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (Abb. 17, S. 34) und 206 g $\text{HCO}_3/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (Abb. 19, S. 36) und damit ein Defizit der Sedimentation von 59 g $\text{HCO}_3/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ errechnet. Dieses Defizit wird auf die hohen Raten der Desulfurikation und der Denitrifikation im Dümmer (vgl. Kap. 4.3.5 Sulfat Bilanz, S. 40 und Kap. 4.3.2 Gesamt Stickstoff und Nitrat-Stickstoff Bilanz, S. 27) zurückgeführt.

Nach der berechneten Calciumbilanz im Dümmer beginnt die Kalkfällung im Februar (was etwas zu früh im Jahr ist) und endet etwa Mitte September. Es wurden im mittleren Jahresgang keine Zeiten mit besonders intensiver Kalkfällung beobachtet. Eine regelmäßige Kalkauflösung von größerem Ausmaß konnte nicht beobachtet werden, sie kann allerdings durch andere gegenläufige Prozesse überkompensiert sein.



Abb. 16: Wochenmittel der Calcium Bilanz des Dümmers. (a) Calcium-Inhalt des Wasserkörpers, Calcium-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe Calcium-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne Calcium-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der Calcium-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN

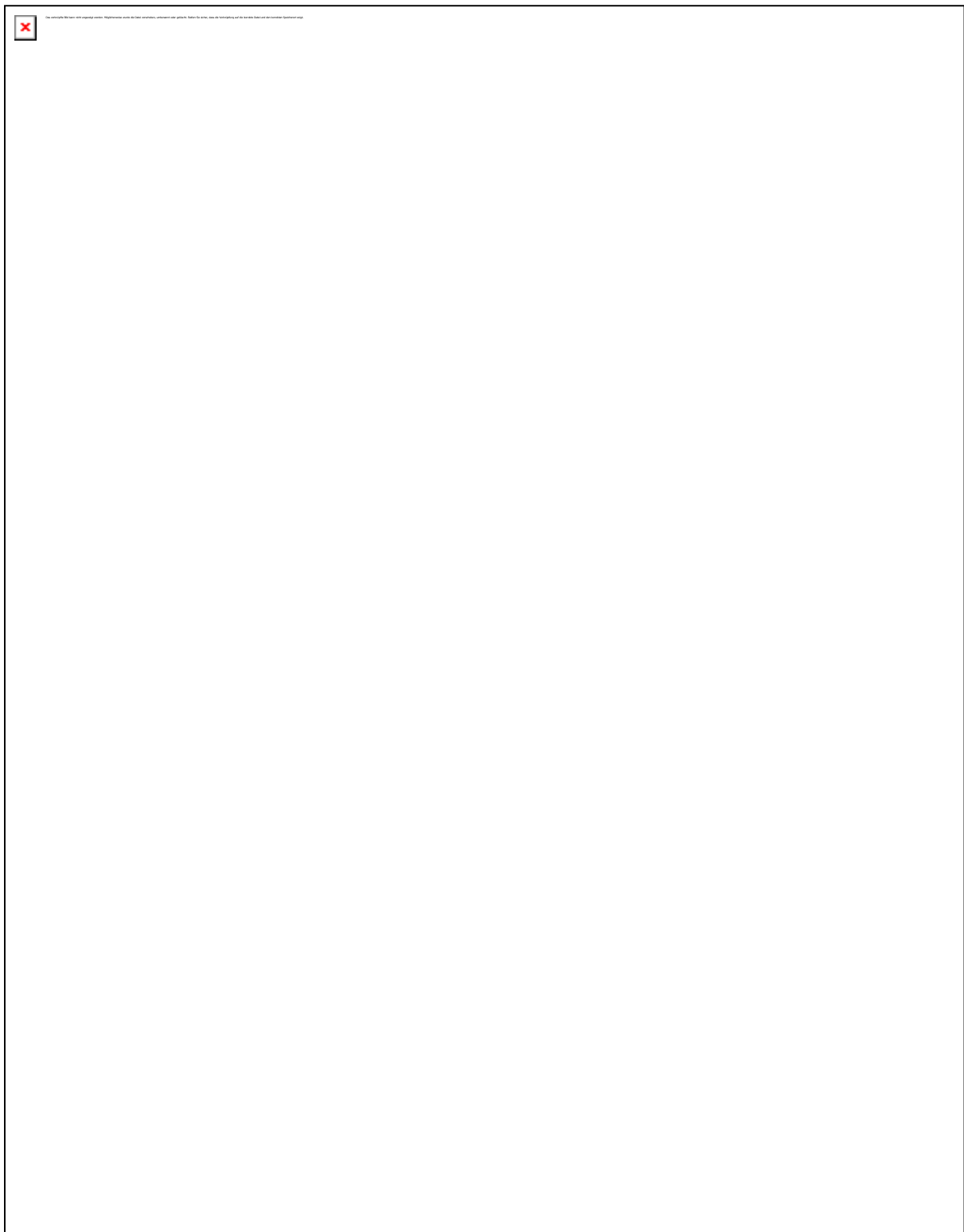


Abb. 17: Calciumbilanz des Dümmers - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) Ca-Inhalt des Wasserkörpers, Ca-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe Ca-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne Ca-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der Ca-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN



Abb. 18: Wochenmittel der Hydrogenkarbonat Bilanz des Dümmers. (a) HCO_3^- -Inhalt des Wasserkörpers, HCO_3^- -Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe HCO_3^- -Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne HCO_3^- -Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der HCO_3^- -Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN

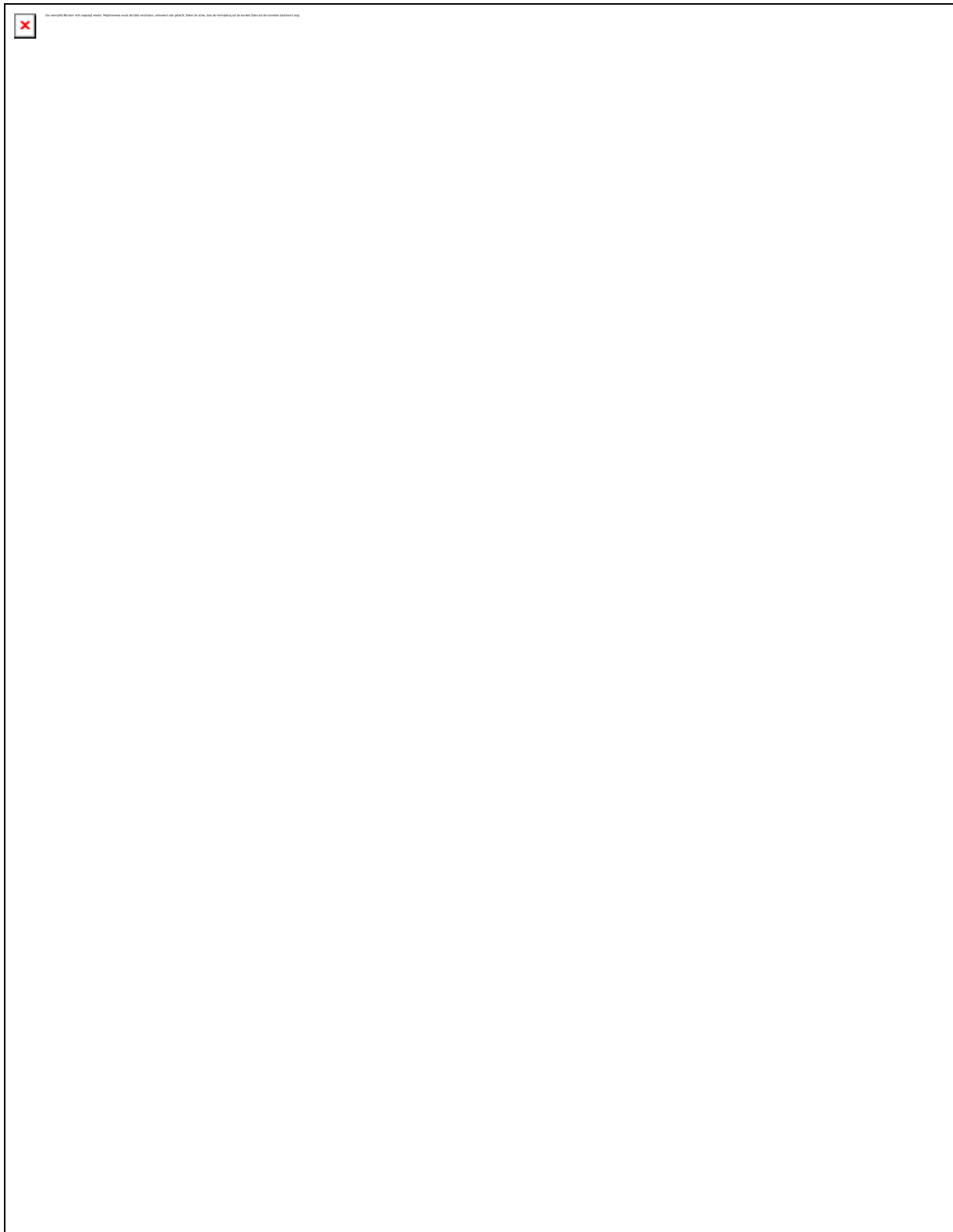


Abb. 19: Hydrogenkarbonatbilanz des Dümmer - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) HCO_3^- -Inhalt des Wasserkörpers, HCO_3^- -Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe HCO_3^- -Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne HCO_3^- -Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der HCO_3^- -Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN

4.3.4 Die Bilanz von organischem Kohlenstoff

Die Berechnung der Bilanz von organischem Kohlenstoff (*Total Organic Carbon* - TOC) wies in den Jahren 1994/1995 und 2004/2005 eine erhebliche Freisetzung bzw. Sedimentation auf, die sich stark vom Muster der anderen Jahre unterschied (Abb. 20, S. 38). Daher ist die Berechnung des langjährigen Jahresganges (Abb. 21, S. 39) mit einem erheblichen Fehler behaftet. Die Probleme entstehen offensichtlich durch eine Diskrepanz zwischen der TOC-Fracht im Zufluss und im Dümmer.

1994/1995 könnte dies durch eine erhebliche Resuspension von Sediment im See und einen damit erhöhte Export von TOC aus dem See zurückzuführen sein, worauf die hohen TOC-Frachten im Ablauf (Abb. 20a, S. 38) hinweisen. Am Übergang 2004/2005 kam es bei extrem hohen TOC-Frachten der Hunte möglicherweise zu einer verstärkten Sedimentation (Abb. 20c und d, S. 38).

Beide Extremwerte der Freisetzung/Sedimentation können noch nicht abschließend beurteilt werden. Damit ist auch der mittlere Jahresgang (Abb. 21, S. 39) als vorläufig anzusehen.



Abb. 20: Wochenmittel der *Total Organic Carbon* (TOC) Bilanz des Dümmers. (a) TOC-Inhalt des Wasserkörpers, TOC-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe HCO_3 -Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne TOC-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der TOC-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN

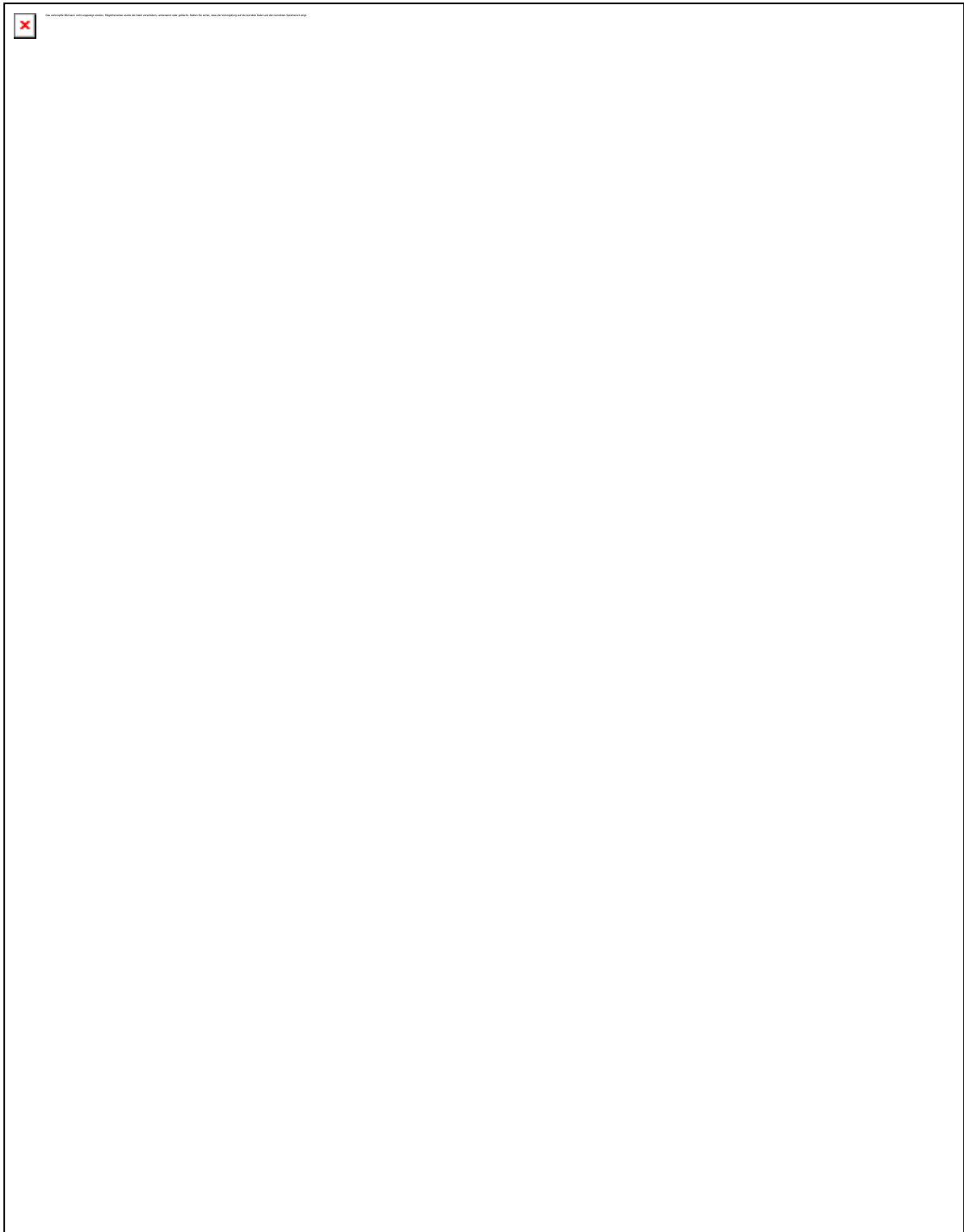


Abb. 21: *Total Organic Carbon* (TOC) Bilanz des Dümmers - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) TOC-Inhalt des Wasserkörpers, TOC-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe TOC-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne TOC-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der TOC-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN

4.3.5 Sulfat Bilanz

Die sommerliche Abnahme von Sulfat im Wasserkörper des Dümmer von Mitte April bis Mitte September (Abb. 23, S. 42) deutet auf eine intensive Desulfurikation hin. Auch eine gewisse Aufnahme von Sulfat in die Algen könnte eine Rolle bei der Abnahme spielen. Die Abnahme liegt bei ca. $0,4 \text{ g SO}_4 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$.



Abb. 22: Wochenmittel der Sulfat (SO_4) Bilanz des Dümmers. (a) SO_4 -Inhalt des Wasserkörpers, SO_4 -Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe SO_4 -Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne SO_4 -Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der SO_4 -Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN

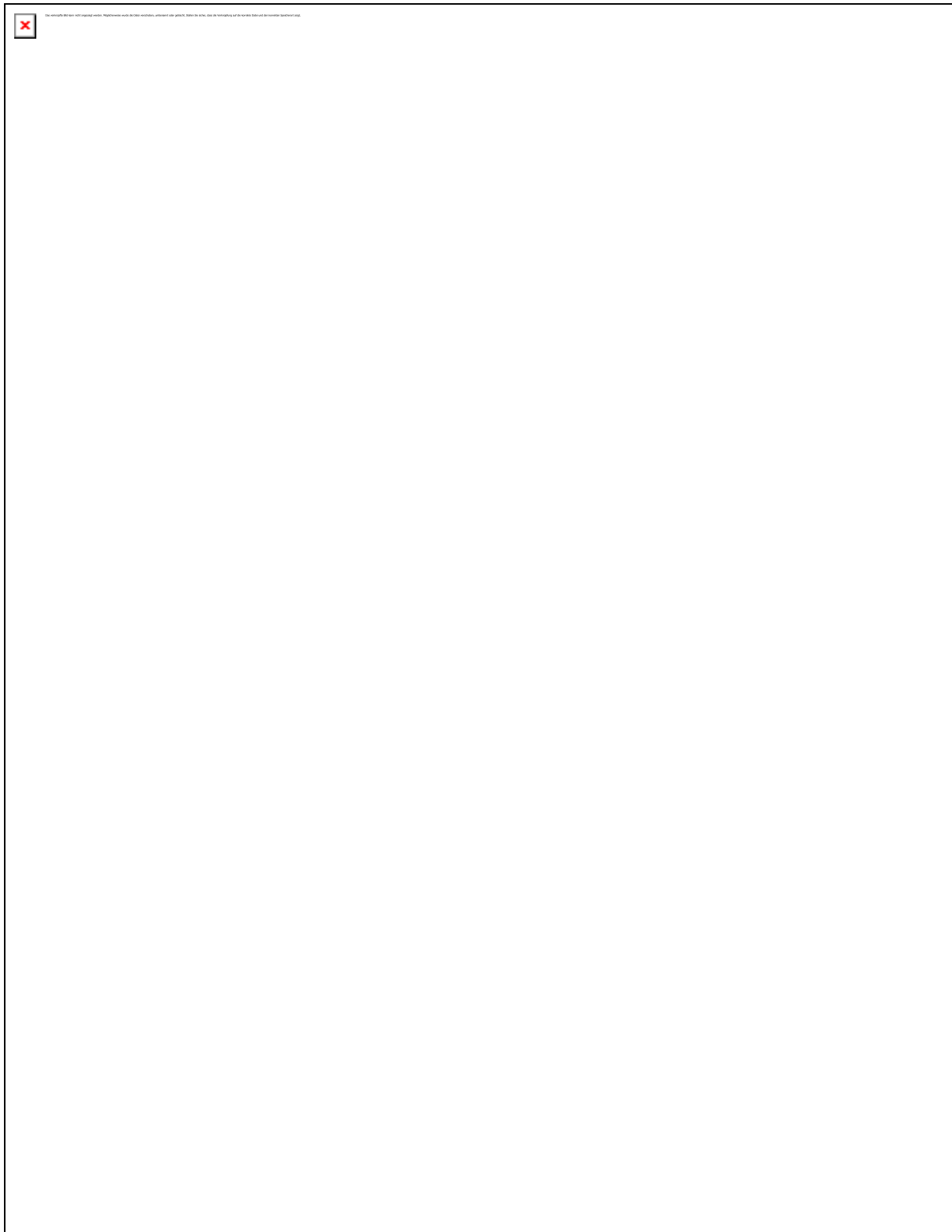


Abb. 23: Sulfat Bilanz des Dümmer - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) SO_4 -Inhalt des Wasserkörpers, SO_4 -Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe SO_4 -Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne SO_4 -Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der SO_4 -Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN

4.3.6 Bilanz der Summe aller Salze

Quantitativ wichtig für die Bilanz der Salze sind hauptsächlich Ca , HCO_3 , SO_4 , NO_3 und Cl . Diese Salze tragen auch hauptsächlich zur elektrischen Leitfähigkeit des Wassers bei, weshalb die berechnete Salzsumme (vgl. Kap. 2.2, S. 7) ebenfalls bilanziert werden kann.

Das jährliche Muster der Ablagerung von Salz im Dümmer (Abb. 25c, d, S. 45) stimmt weitgehend mit der negativen Freisetzung der genannten Komponenten überein. Die Summe der Salzablagerungen von $408 \text{ g}/(\text{m}^2\text{a})$ (Abb. 25d, S. 45) stimmt sehr gut mit der berechneten Summe der Ablagerung der Einzelkomponenten Ca , HCO_3 , SO_4 , NO_3 und Cl von $379 \text{ g}/(\text{m}^2\text{a})$ überein (vgl.



Abb. 24: Wochenmittel der Salzsumme Bilanz des Dümmers. (a) Salz-Inhalt des Wasserkörpers, Salz-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe Salz-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne Salz-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der Salz-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN

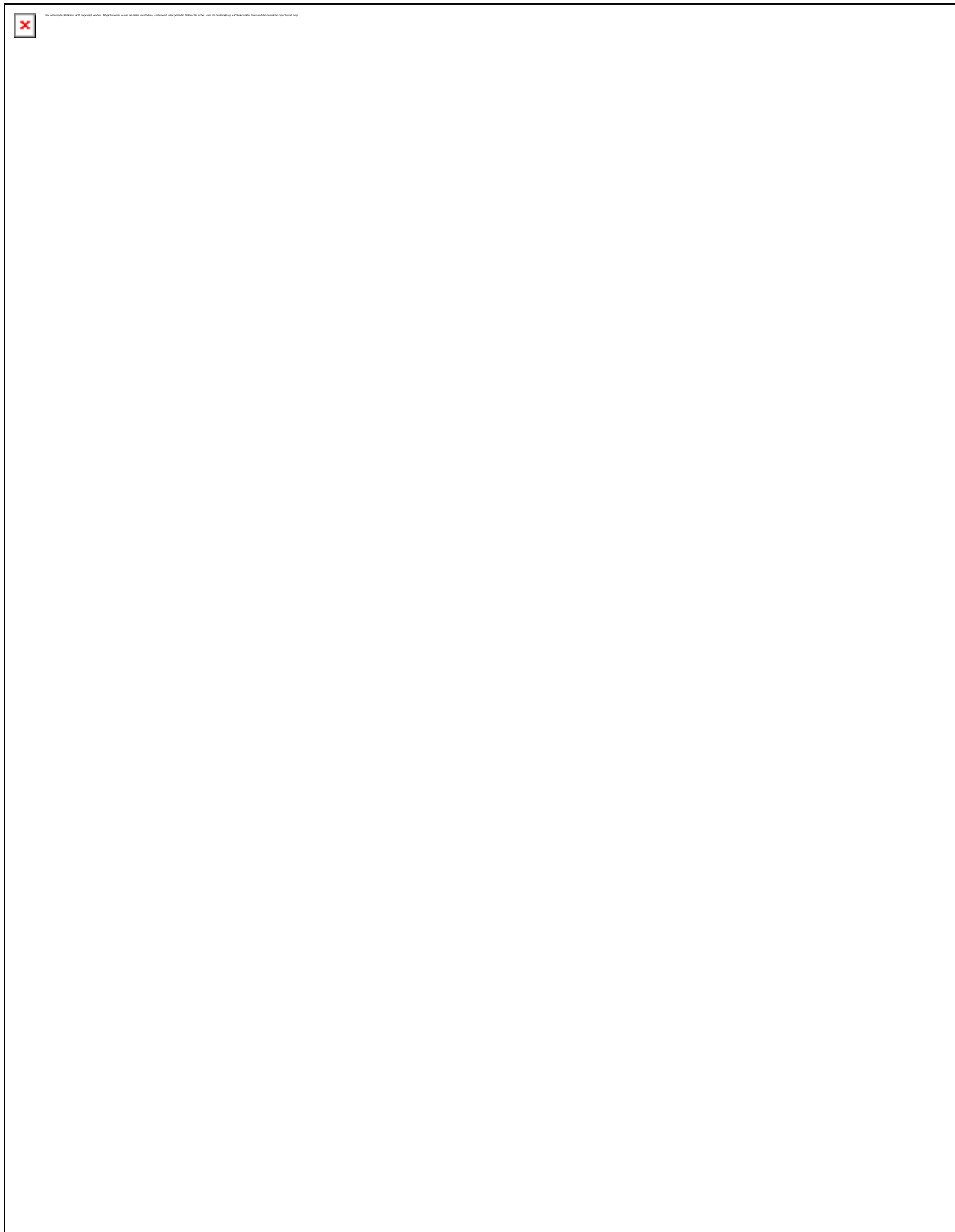


Abb. 25: Salzsumme Bilanz des Dümmer - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) Salz-Inhalt des Wasserkörpers, Salz-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe Salz-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne Salz-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der Salz-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN

4.3.7 Chlorid Bilanz

Chlorid ist der einzige gemessene Parameter, der in Gewässern nur minimal physikalisch, biologisch und chemisch umgesetzt wird und stellt damit einen *Tracer* für die Güte der Bilanzierung dar. Chlorid wurde an der Hunte Schäferhof nur ca. monatliche mit den GÜN-Proben gemessen.

Bei einer parallelen Auftragung von Abfluss und Chloridkonzentration (Hunte Schäferhof) zeigt sich eine negative Korrelation der beiden Parameter - bei hohen Abflüssen sinkt die Chloridkonzentration deutlich ab (vgl. Abb. 26 und Abb. 27).

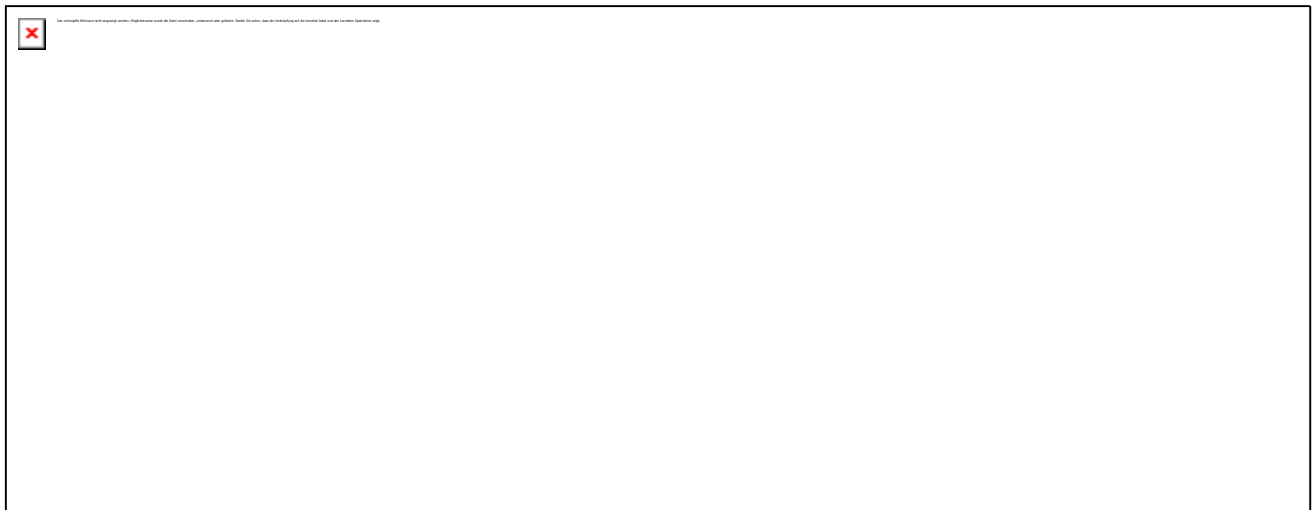


Abb. 26: Paralleler Verlauf von Chloridkonzentration und Abfluss an der Messstelle Hunte Schäferhof. Daten NLWKN, verändert.

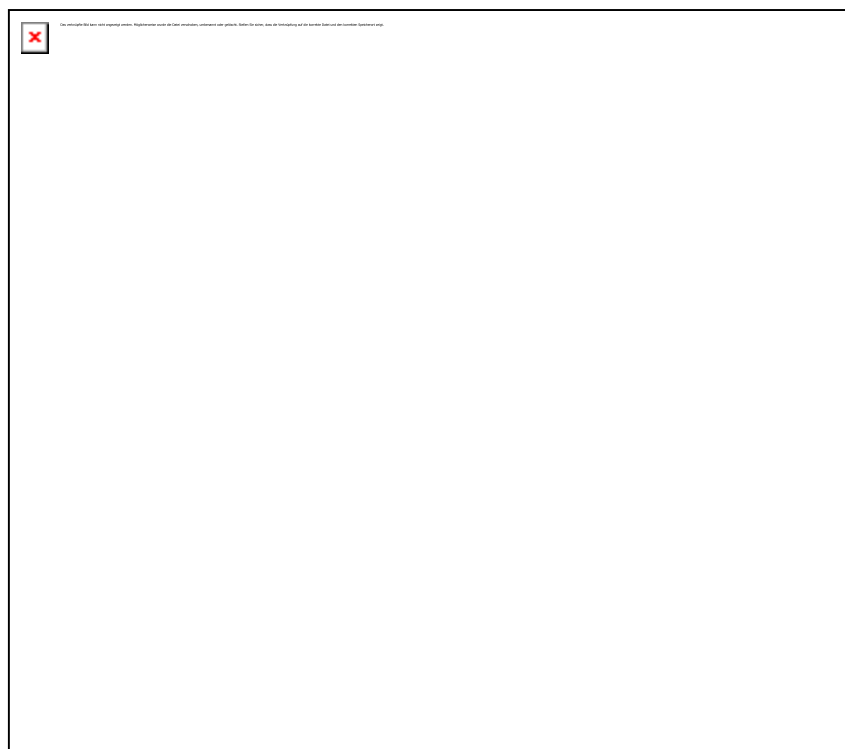


Abb. 27: Chloridkonzentration gegen Abfluss an der Messstation Hunte Schäferhof. Daten NLWKN.

Hochwasserereignisse sind selten und daher bei den monatlichen GÜN-Messungen unterrepräsentiert. Bei Hochwasserereignissen wird das Wasser in der Hunte durch Regenwasser verdünnt, so dass die Chloridkonzentration abnimmt. Bei der üblicherweise angewandten Interpolation der Konzentration mit dem kubischen Spline werden die rechnerisch ermittelten Chloridfrachten im Zufluss zu hoch angesetzt. Im Dümmer treten diese Probleme nicht auf, da das Wasser im See eine Aufenthaltszeit in der Größenordnung von Wochen oder Monaten hat. Rechnerisch führt die Überschätzung der Zulauffracht bei fehlender hoher Abauffracht von Chlorid aus dem Dümmer zu einer hohen internen „Chloridfestlegung“ im See, die chemisch gar nicht möglich ist. Dementsprechend werden bei einem mittleren Gehalt von Chlorid im See von 58 g/m^2 rechnerisch $25 \text{ g/(m}^2\text{*a)}$ scheinbar festgelegt (vgl. Abb. 29, S. 49), was angesichts der Größenordnung der Chloridabnahme bei Hochwasserereignissen durchaus noch ein moderater Fehler ist.

Es wird darauf hingewiesen, dass dieses Problem bei anderen Parametern nicht unbedingt besteht. Z.B. wurde Phosphor teilweise als Tagesmischprobe bestimmt, so dass die Fracht bei Hochwasser direkt in die Bilanz eingeht. Durch den anderen Eintragsmechanismus für Phosphor (hoher Anteil von Erosion), kommt es außerdem bei Hochwasser eher zu einer Erhöhung der Konzentration.

Es wurde auch versucht, die Chloridbilanz mit einem veränderten Rechenweg zu verbessern. Dazu wurde nicht die Konzentration durch einen kubischen Spline nach Tageswerten interpoliert, sondern die tägliche Chloridfracht. Anschließend wurde durch Division durch den Tagesabfluss wieder die Chloridkonzentration auf Tagesbasis errechnet. Dabei ist die Chloridkonzentration während Hochwasserereignissen deutlich verringert. In der Summe lag dann die mittlere rechnerische „Chloridfestlegung“ bei nur $7,2 \text{ g Cl/(m}^2\text{*a)}$ (ohne Abbildung). Da jedoch bei der Berechnung der Wochenbilanz zweimal unplausibel hohe Freisetzungen und Festlegungen von ca. $100 \text{ g/(m}^2\text{*a)}$ auftraten, kann diese Berechnung noch nicht als ausgereift angesehen werden. Aus Zeitmangel ist eine Weiterbearbeitung der Chloridbilanz derzeit nicht möglich.



Abb. 28: Wochenmittel der Chlorid (Cl) Bilanz des Dümmers. (a) Cl-Inhalt des Wasserkörpers, Cl-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe Cl-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne Cl-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der Cl-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN

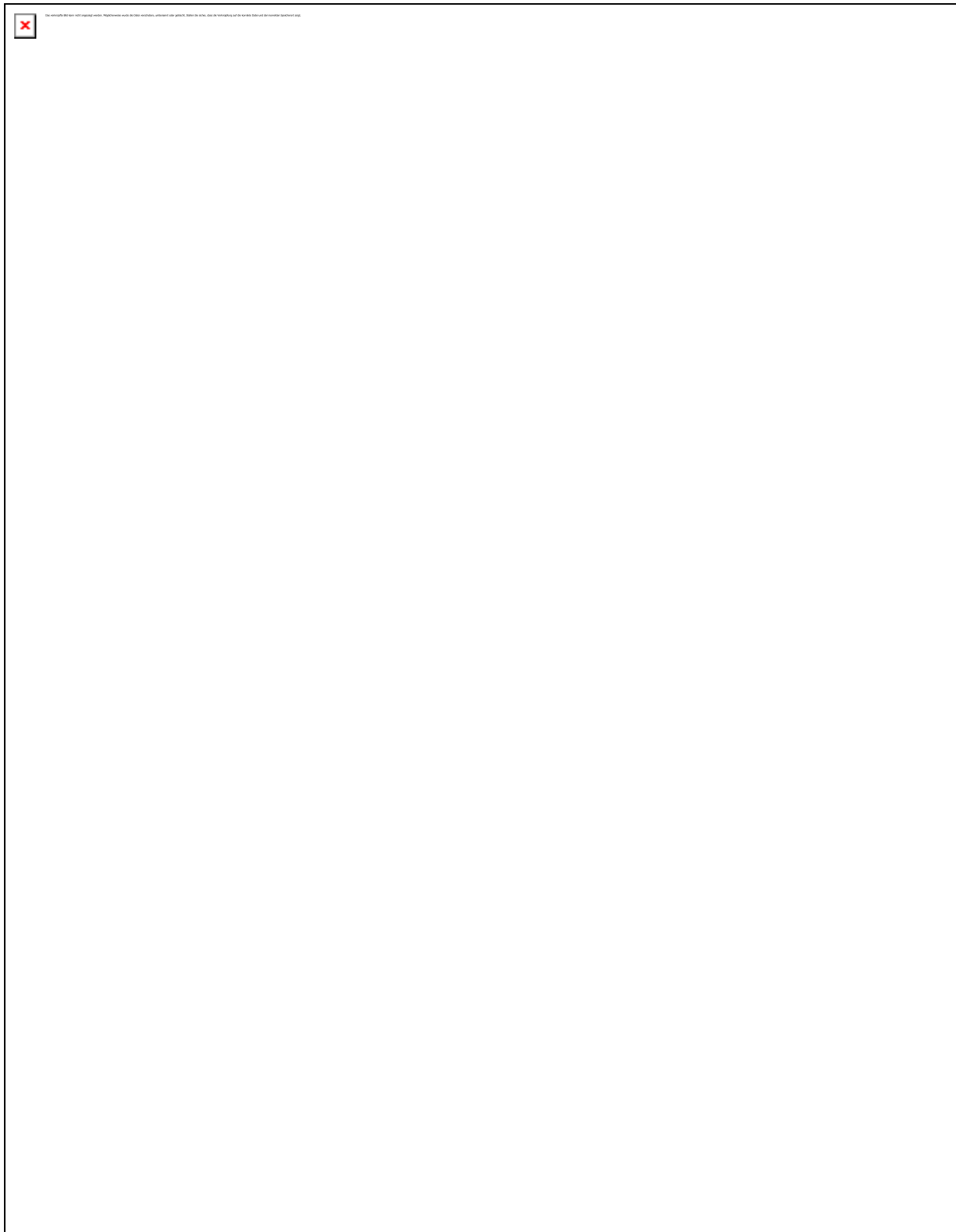


Abb. 29: Chlorid Bilanz des Dümmer - mittlerer Jahresgang 1993-2011. (a) Cl-Inhalt des Wasserkörpers, Salz-Fracht der Zu- und Abflüsse, (b) externe Cl-Bilanz (positiv: Zuflussfracht höher, negativ: Abflussfracht höher, (c) interne Cl-Nettobilanz (positiv: Freisetzung, negativ: Festlegung) und (d) Summenkurve der Cl-Freisetzung (negativ: Festlegung im Sediment). Rohdaten: NLWKN

4.4 Jahresmittel und Jahressummen der bilanzierten Parameter

Die bilanzierten Parameter können hinsichtlich Externer Bilanz in $\text{g}/(\text{m}^2 \text{ Seefläche} \cdot \text{a})$, Stoffinhalt in der Wassersäule in g/m^2 und Freisetzung/Ablagerung (positiv: Freisetzung, negativ: Ablagerung) zusammenfassend bewertet werden (vgl. Tab. 2, S. 50). Durch Bildung des Quotienten „Inhalt/Freisetzung“ erhält man eine theoretische "Netto-Umsatzzeit" (Einheit a), welche die Zeitdauer des Umsatzes der Stoffe in der Wassersäule hinsichtlich des internen Austausches widerspiegelt. Hierbei bedeuten wiederum positive Werte eine Freisetzung und - nur mathematisch definierte - negative Zahlen eine Sedimentation. Je nach Parameter können dabei auch eine Aufnahme aus der bzw. Abgabe in die Atmosphäre und die stoffliche Umwandlung in eine andere Fraktion (z.B. beim Stickstoff beteiligt sein).

Mit diesem Quotienten kann die Geschwindigkeit der einzelnen Prozesse in Relation zur verfügbaren Stoffmenge beschrieben werden. Bei der Interpretation der Zahlen ist jedoch immer zu bedenken, dass die berechneten Netto-Umsatzzeiten auch durch gegenläufige Prozesse beeinflusst sind. Durch diese gegenläufigen Prozesse kann die berechnete Netto-Umsatzzeit nicht mit der tatsächlichen Umsatzzeit der Stoffe gleichgesetzt werden.

Die kürzeste Netto-Umsatzzeit hat demnach Nitrat, das wie bekannt im Dümmer zur Denitrifikation im Sediment genutzt wird. Gesamt-Phosphor hat eine mittlere Netto-Umsatzzeit, während die Salzkomponenten eine relativ lange Netto-Umsatzzeit besitzen. Auch das Sulfat wird relativ langsam genutzt (Tab. 2, S. 50).

Tab. 2: Jahresmittel und -summen von Bilanzgrößen im Dümmer (Externe Bilanz, mittlerer Stoffinhalt, Summe jährliche Freisetzung) und Quotient „Inhalt/Freisetzung“ als Maß für ein „Netto-Umsatzzeit“. Diskussion vgl. Text.

4.5 Einfluss von Gänseexkrementen auf die Phosphorbilanz des Dümmers

Überwinternde Gänse fressen tagsüber an Land und nächtigen auf dem See. In der Arbeit von Tappenbeck & Raschewski (1993) wurde der Beitrag von Gänseexkrementen zum Phosphoreintrag in den Arendsee (Sachsen-Anhalt) bemessen. Danach werden pro Gans und Nacht 143 gFS (Frischsubstanz) Exkremente in das Wasser abgegeben, der P-Gehalt liegt bei 1,045 mg P/gFS. Die Exkremente sinken zu Boden, allerdings werden nach Laborversuchen etwa 50 % des Phosphors ins Wasser freigesetzt. Da die Gänse noch zusätzlich Futter in ihrem Kropf speichern, müsste die Düngung des Wassers durch die Gänse noch etwas höher sein. Auf der anderen Seite ist bei der Bestimmung der P-Freisetzung im Labor durch Aufschlännen mit destilliertem Wasser damit zu rechnen, dass mehr Phosphor freigesetzt wird als in der Natur, wo die Exkremente an der Sedimentoberfläche den gleichen Transportlimitierungen unterliegen wie die Sedimente selber. Diese führen wahrscheinlich dazu, dass geringere Phosphormengen freigesetzt werden als unter Laborbedingungen. In der Summe wurden 269 kg P während einer Wintersaison von 120 Tagen als Eintrag aus Gänseexkrementen berechnet (Tappenbeck & Raschewski 1993).

Durch Rönicke *et al.* (2008) wurde der Beitrag von Gänseexkrementen zum Phosphoreintrag am Arendsee mit einer anderen Methode ermittelt. Dabei war die Anzahl der Gänse nicht bekannt, der Phosphorbeitrag wurde durch das Einsammeln von Gänseexkrementen vom Eis und Analyse derselben bestimmt. Der mittlere Wassergehalt der Gänseexkremente lag bei 88-92 %FS. Am Arendsee wurde dabei 1996 ein P-Eintrag von 27,8 und 1997 von 17,3 kg P/d ermittelt. Für die gesamte Winterperiode von 100 Tagen wurden demnach 2780 und 1730 kg P berechnet, was 7-11 mal mehr als nach der Untersuchung von Tappenbeck & Raschewski (1993) für das Jahr 1992 ist. Durch die verschiedenen angewandten Methoden und da die Anzahl der Gänse in weiten Bereichen variieren kann, kann dieser Unterschied nicht erklärt werden. Die Methode von Rönicke *et al.* (2008) ist am Dümmer nicht anwendbar, da keine entsprechenden Analysen von Exkrementen vorliegen.

In der Summe wird davon ausgegangen, dass die Gänse am Dümmer wie in der Untersuchung von Tappenbeck & Raschewski (1993) am Arendsee 143 gFS/d mit einem P-Gehalt von 1,045 mg P/gFS ins Wasser abgeben. Am Dümmer wurden als bisheriges Maximum von Oktober 2006 - März 2007 insgesamt 730.670 Gänsetage (im Mittel entsprechend 4100 Gänse an 180 Tagen) gezählt (U. Marxmeier, H.-H. Schuster, pers. Mitt.). Die P-Aufstockung des Wassers durch die Exkremente der Gänse läge in dieser Zeit demnach bei 109 kg P oder 18,2 kg P/Monat. Da die P-Konzentration in den Exkrementen (3,5-5,2 mg P/gTS, Tappenbeck & Raschewski (1993), umgerechnet) auch gut doppelt so groß sein kann (4,6-9,2 mg P/gTS, Rönicke *et al.* 2008), könnte sich der maximale Eintrag auf 26 oder rund 40 kg P/Monat erhöhen. Da in vielen Jahren auch weniger Gänse als 2006/2007 am Dümmer gezählt wurden (U. Marxmeier, H.-H. Schuster, pers. Mitt.), wäre der P-Eintrag aus Gänseexkrementen manchmal auch geringer als 18 kg P/Monat.

Die Einträge von maximal 40 kg P/Monat stellen angesichts der mittleren Phosphoreinträge in den Dümmer nach der Bornbachumleitung von 13,3 t P/a (also weit über 1 t P/Wintermonat) einen geringfügigen Anteil dar. Die Relevanz wird noch geringer, wenn man bedenkt, dass der Dümmer im Winter Wasseraustauschzeiten in der Größenordnung von 1 Monat hat. Am Arendsee kamen die Gänse Anfang November und verließen den See wieder Ende Februar (Rönicke *et al.* 2008). Durch diese beiden Tatsachen wird der durch die Gänse eingetragene Phosphor am Dümmer kaum für die sommerlichen Algenblüten wirksam.

Auch in der Phosphorbilanz des Dümmers (Abb. 10, S. 25 und Abb. 11, S. 26) gibt es keinen Hinweis auf eine sichtbare Wirkung der P-Einträge aus Gänsekot in den Wintermonaten. Der Rechenweg der Stoffbilanz bedingt, dass Einträge aus Gänsekot in den Wintermonaten als erhöhte Interne Nettobilanz sichtbar werden müssten. In den Wintermonaten kommt es jedoch in der Regel zu einer Nettofestlegung von Phosphor (Abb. 10, S. 25 und Abb. 11, S. 26).

5 Zusammenfassung

Aus den mittlerweile seit fast 20 Jahren (nicht ganz kontinuierlich) vorliegenden Tages- und Monatsmessungen der Hydrologie und der Wasserchemie am Dümmer sowie regionalen Messergebnissen zur atmosphärischen Deposition wurde eine Wasser- und Stoffbilanz erstellt. Mit der Bilanz sollen die Prozesse im See als Grundlage für eine effektive Steuerung der Sanierungs- und Restaurierungsmaßnahmen besser verstanden und quantifiziert werden.

Für die hydrologische Bilanz des Sees wurde die Verdunstung der freien Wasseroberfläche nach Penman und die Verdunstung der Litoralzone (meist Schilf) mit der Grasreferenzverdunstungsmethode aus meteorologischen Daten der nächst gelegenen meteorologischen Station Diepholz berechnet. Der Abfluss des wichtigsten Zuflusses, der Hunte, lag in Tageswerten vor. Mit Hilfe der Volumenänderung des Sees aufgrund des Wasserstandes und den vorgenannten Größen konnte damit der Abfluss aus dem See berechnet werden.

Stoffkonzentrationen wurden sehr uneinheitlich gemessen, für gewisse Zeiträume gab es tägliche Messungen von Ges-P, Ges-N, $\text{NO}_3\text{-N}$, TOC und elektrischer Leitfähigkeit (zur Berechnung der Salzsumme) im größten Zulauf, der Hunte. Bei den anderen Parametern (Ca, HCO_3 , SO_4 und Cl) liegen generell keine Tagesdaten sondern nur Monatsstichproben vor, so dass die Bilanzergebnisse dieser Parameter mit größeren Unsicherheiten behaftet sind. Fehlende Werte wurden durch einen kubischen Spline geschätzt. Unplausible Daten und Kurvenverläufe wurden nicht weiter verwendet, sondern meist durch eine lineare Interpolation ersetzt. Die Bilanz wurde zunächst als tägliche Bilanz erstellt, für die weitere Verarbeitung wurden jedoch Wochenmittelwerte verwendet.

Durch Vergleich der errechneten Abflüsse mit dem quantitativ wichtigsten Abfluss des Dümmer, der Lohne, zeigt die errechnete Wasserbilanz bei Betrachtung von Wochenmittelwerten eine hohe Plausibilität. Problematisch ist vor allem die Verwendung des Wasserstandes, der bereits bei 1 cm Wasserstandsschwankung einen großen Fehler erzeugt. Diese Fehler können durch Mittelwertbildung über längere Zeiträume verringert werden.

Bei Verwendung von Monatsstichproben für die Stoffkonzentrationen im Dümmer entsteht das gleiche Problem: bereits geringste räumliche Varianzen der Konzentrationen zwischen Messstelle und gesamtem See und geringste analytische Fehler beeinflussen die Bilanz beträchtlich. Da jedoch die Bilanz über 19 Jahre aufgestellt werden konnte, lassen sich Aussagen wenigstens hinsichtlich des mittleren Jahresganges und hinsichtlich der langjährigen Entwicklung treffen.

Eine hohe externe Belastung mit Phosphor findet im Winter statt. Ein großer Teil dieses Phosphors wird festgelegt (sedimentiert), im März beispielsweise 38 % des eingetragenen Phosphors. Seit der Bornbachumleitung zeigt der gesamte See über das Jahr einen Trend zu einer leichten P-Nettoreisetzung aus den Sedimenten. Nach dem mittleren Jahresgang kommt es im Juli zu einer geringen P-Freisetzung. Durch die Entschlammung werden dem See schätzungsweise 6,3-9,9 t P/a entnommen. Dominierend ist nach der errechneten P-Bilanz jedoch die mittlere langjährige Sedimentation von 10,6 t P/a.

Die Stickstoffbilanz wird durch Nitrat dominiert. Das Maximum der Denitrifikation liegt Ende März bis Anfang April mit ca. $0,2 \text{ g NO}_3\text{-N}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$. Die Denitrifikation ist wichtig für die Beurteilung der Phosphatfreisetzungprozesse, da Nitrat die Sedimente oxidiert und damit redoxbedingte P-Freisetzungen vermindert.

Die Fällung von Calciumionen und (Hydrogen-) Karbonat wurde mit 87 bzw. $207 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ berechnet. Die insgesamt im See Ablagerung von Salzen wurde mit $413 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ berechnet, wobei Nitrat und Sulfat die anderen Hauptkomponenten der Ablagerung darstellen. Sulfat als Träger Desulfurikation $39 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, die Desulfurikation findet nach dem Jahresgang von Mitte April bis Mitte September

statt. Dies ist auch der kritische Zeitraum, in dem eine durch die Desulfurikation geförderte Freisetzung von Phosphat aus den Sedimenten schädlich für die Wasserqualität im See ist.

Chlorid, das als eigentlich nicht umgesetzte Tracersubstanz eine Netto-Bilanz von 0 aufweisen sollte, wurde mit bilanziert. Dabei zeigte sich, dass rechnerisch $27 \text{ g Cl}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ sedimentieren, was angesichts des mittleren Chloridgehaltes der Wassersäule von $58 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ noch als tolerabler Wert angesehen werden könnte. Allerdings ließ sich zeigen, dass die hohe Sedimentation rechnerisch durch eine Überschätzung der Chloridfracht in der Hunte entstand, da verringerte Cl-Konzentrationen bei Hochwasserereignissen nicht genügend berücksichtigt werden konnten.

Es wurde auch versucht, den Einfluss von Gänseexkrementen auf die Phosphorbilanz des Dümmers abzuschätzen. Nach Literaturangaben über die Phosphorabgabe einer einzelnen Gans und Multiplikation mit der maximalen Anzahl von Gänsetagen am Dümmer wurde ein P-Eintrag aus Gänseexkrementen von maximal $18,2\text{-}36,4 \text{ kg P/Monat}$ bzw. $109\text{-}218 \text{ kg P/a}$ (6 Monate mit Gänsen auf dem Dümmer) berechnet. Dies ist angesichts der zu erwartenden mittleren P-Belastung des Dümmers von $13,3 \text{ t P/a}$ ein sehr geringer Anteil. Die Belastung aus Gänsekot erfolgt ausschließlich von Oktober bis März. In der P-Bilanz konnte festgestellt werden, dass in dieser Zeit die Festlegung von Phosphor im Sediment am höchsten ist, so dass ein großer Teil des aus Gänseexkrementen stammenden Phosphor bereits vor der Nutzung durch Algen im Sommer immobilisiert sein dürfte.

6 Abkürzungsverzeichnis

α - Transpirationsanteil
A - Fläche
A - Fließquerschnitt
a - Jahr
a.a.R.d.T. - allgemein anerkannte Regeln der Technik
Abb. - Abbildung
arithm. - arithmetisch
B - Breite
Bil - Bilanz
BSB - Biologischer Sauerstoffbedarf
c - centi (10^{-2})
C - Konzentration
C* - Hintergrundkonzentration
Ca - Calcium
Cl - Chlorid
CO₂ - Kohlendioxid
C_{pzu} - Zuflusskonzentration von Phosphor
CSB - Chemischer Sauerstoffbedarf
 Δp - Druckdifferenz
d - Tag
ET - Evapotranspiration
ET₀ - potentielle Evapotranspiration
et al. - et altera (und andere)
FFH - Flora-Fauna-Habitat
Fr - Froudezahl
FS - Frischsubstanz
FWS - *Free water surface wetlands*
g - Gramm
g = Erdbeschleunigung
Ges - Gesamt (z.B. Ges-P: Gesamt-Phosphor, Ges-N: Gesamt-Stickstoff)
GÜN - Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen
H₂O - Wasser
ha - Hektar
HCO₃ - Hydrogenkarbonat
h_F - Wassertiefe/Stauhöhe im Feuchtgebiet
HFW - Horizontal Flow Wetlands
HQ₁₀₀ - Hochwasserabfluss mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von 1/100 Jahren
I - Wasserspiegelgefälle
I - Infiltration
k - kilo- (10^3)
k - Geschwindigkeitskonstante der Phosphorretention im Schilfpolder;
K - Kelvin, gr
K_c - Evaporationskoeffizient
k_f - Durchlässigkeitsbeiwert
k_{St} - Strickler-Beiwert
k_{Stc} - Strickler-Beiwert mit Vegetation
k_v = volumetrische oder Raum-Geschwindigkeitskonstante
Kap. - Kapitel
l - durchströmte Länge eines porösen Körpers
L - Liter; Länge
LF - elektrische Leitfähigkeit des Wassers

μ - mikro; 10^{-6}
m - milli- (10^{-3}); Meter
m ü. NN - Meter über Normalnull
Mio - Millionen; 10^6
MQ - mittlerer Abfluss
n - Anzahl
n - Manning-Beiwert
 n_c - Manning-Beiwert mit Vegetation
N - Stickstoff (lat. *nitrogenium*)
Nd - Niederschlag
NN - Normalnull
 $\text{NO}_3\text{-N}$ - Nitrat-Stickstoff
NLWKN - Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
NUVD - Natur- und Umweltschutzvereinigung Dümmer e.V., Hude
P - Phosphor
PTIS oder P-Wert - „apparent number of tanks in series“ etwa: scheinbare Anzahl von Tanks in Serie
q - hydraulische Belastung
Q - Abfluss
 ρ - Dichte
R - hydraulischer Radius
 Ret_{rel} - relative Retention
s - Sekunde
S. - Seite
 SO_4 - Sulfat
 τ - theoretische Wasseraufenthaltszeit
t - Tonnen; Zeitpunkt
Tab. - Tabelle
 t_D - Aufenthaltszeit
TOC - *Total Organic Carbon*, Gesamt Organischer Kohlenstoff
TS - Trockensubstanz
u.a. - unter anderem
U - benetzte Umfang
U - Wasseraustauschrate
unpubl. - unpubliziert
v - Geschwindigkeit
Vd - Verdunstung
Vol - Volumen
vol.-gew. - volumengewichtet
VolÄnd - Volumenänderung
z - Wassertiefe

7 Quellenverzeichnis - Literatur, Rechtsgrundlagen und Internet

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. [online]
<http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>, 20.06.2012
- ATV-DVWK (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. ATV-DVWK Merkblatt 504, Ausgabe 09 2002. DWA, 144 S.
- NLWKN (2012): Rahmenentwurf zur Fortsetzung der Dümmersanierung. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Betriebsstelle Sulingen. Vorabversion. Manuskript
- Richter, D. (1977): Zur einheitlichen Berechnung der Wassertemperatur und der Verdunstung von freien Wasserflächen auf statistischer Grundlage. Abh. Meteorol. Dienst der DDR 16: 119 S.
- Ripl W (1983): Limnologisches Gutachten. Dümmersanierung. Im Auftrag des Hunte Wasserverbandes, Diepholz. Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie, Fachgebiet Limnologie. 154 pp.
- Ripl, W. (1986): Restaurierung der Schlei. Bericht über ein Forschungsvorhaben. Im Auftrag des Landesamtes für Wasserhaushalt und Küsten, Kiel. Technische Universität Berlin, Fachgebiet Limnologie. Schriftenreihe des Landesamtes für Wasserhaushalt und Küsten, D 5. 165 pp.
- Ripl, W., Feibicke, M., Heller, S. & Markwitz, M. (1994): Nährstoffeliminierung aus einem gering belasteten Fließgewässer mit Hilfe eines bewirtschafteten Schilfpolders. Im Auftrage des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie (NLÖ). Technische Universität Berlin, Fachgebiet Limnologie, Gesellschaft für Gewässerbewirtschaftung, Berlin. Manuskript 85 pp. + Anhang
- Röncke H, Doerffer R, Siewers H, Büttner O, Lindenschmidt K-E, Herzsprung R, Beyer M, Rupp H (2008): Phosphorus input by nordic geese to the eutrophic Lake Arendsee, Germany. Fundamental and Applied Limnology. Archiv für Hydrobiologie 172/2: 111-119
- Scheer C, Voermanek, H (2012c): Minderung der Nährstoffbelastung des Dümmer - Quantifizierung der Nährstoffeinträge und Ausweisung der Belastungsschwerpunkte. Gutachten. Oktober 2012. Auftraggeber: NLWKN Sulingen. ARGE geofluss - aquaplaner. Manuskript, 155 pp.
- Tappenbeck L & Raschewski U (1993): Einfluss von Wassergeflügel auf den Nähr- und Sauerstoffhaushalt im Arendsee (Land Sachsen-Anhalt). Archiv für Naturschutz und Landschaftspflege: 32: 295-301
- Wendling U, Deyhle C, Glugla G, Golf W, Hoyningen-Huene Jv, Kalweit H, Olbrisch H-D, Richter D, Wessolek G, Wittenberg H (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. DVWK-Merkblätter 238, 134 pp.
- Wolter K-D, Köhler G (2012b): Rahmenentwurf zur Fortsetzung der Dümmersanierung. Klärung von Einzelfragen. Endbericht 17.10.2012. Im Auftrag des NLWKN - Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Betriebsstelle Sulingen. Manuskript, 171 pp.

Wiesbaden, 29.11.2012

Unterschrift