

Primärproduktion in Hauptstrom und Bühnenfeldern der Elbe: ein Vergleich

Klaus Ockenfeld

Umweltforschungszentrum Magdeburg, Brückstr. 3a, 39114 Magdeburg

1 Einleitung

Der vorliegende Bericht befaßt sich mit Verteilungsmustern und der Produktionsleistung des Elbe-Phytoplanktons. Ziel der während einer Längsbereisung der Elbe sowie einiger stationär über einen längeren Zeitraum durchgeführter Untersuchungen war es, die planktische Primärproduktion (PP) und Respiration (PR) zwischen den Teilkompartimenten (Bühnenfelder und Hauptstrom) der Elbe zu vergleichen und hinsichtlich des Einflusses der Stillwasserzonen auf den Hauptstrom zu bewerten.

2 Material und Methoden

Die zur Angabe von Photosyntheseleistungen wichtigen Kriterien Lichtintensität und Chlorophylla-Gehalt wurden parallel zu den Produktionsmessungen bestimmt. Zur Lichtmessung im Gewässer (UW-Lichtklima) kamen zwei gleichzeitig ins Gewässer eingebrachte sphärische Quantensensoren (LI-COR, Modell SA) zum Einsatz. Zur Bestimmung der den Phytoplanktern während der Inubationsversuche zur Verfügung stehenden Photonenflußdichte wurden Globalstrahlungswerte des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Die Analyse der Chlorophylla-Gehalt (Chl a) erfolgte nach Filtration von 0,5 L Probewasser auf GF/F-Filter (Sartorius) mittels HPLC-Analysetechnik.

Die Aktivität des Phytoplanktons wurde je nach Fragestellung mit unterschiedlichen Methoden ermittelt. Für die Ermittlung wichtiger Kriterien der Photosynthese-Licht-Relationen wurde in allen Fällen das Modell von Webb et al. (1974) verwendet. Dieses Modell (Gleichung 1) enthält keinen Photoinhibitionsterm und wurde ausgewählt, um diversen Untersuchungen aus der Vergangenheit Rechnung zu tragen, die Fehlkalkulationen der integralen Produktion bei Berücksichtigung einer Photoinhibition in turbulent durchmischten Systemen beschreiben konnten. Nähere Erläuterungen hierzu finden sich bei Nixdorf & Behrendt (1991) und Ockenfeld (2001).

Für die spezifische Primärproduktion (P_{spez} [mgO $_2$ mgChl a^{-1} h $^{-1}$]) unter gegebenen Lichtbedingungen (I_{spez} [μE m $^{-2}$ s $^{-1}$]) gilt:

$$P_{spez} = P_{max} (1 - e^{(-I_{spez} / I_K)}) = (1 - e^{(-\alpha * I_{spez} / P_{max})}) \quad (1)$$

P_{max} maximale chlorophylla-spezifische Photosyntheserate (mgO $_2$ mgChl a^{-1} h $^{-1}$)

α Anfangsanstieg der Photosynthese-Licht-Relation (mgO $_2$ mgChl a^{-1} E $^{-1}$ m 2)

Sauerstoffmethode nach Winkler

Während der fließzeitkonformen Elbbereisung (26.06.- 07.07.2000) wurde die Primärproduktionsleistung von Hauptstrom- und Bühnenfeldwasser an den mittels Pegel-Fließzeit-Funktion vorberechneten Messpunkten unter Verwendung der Hell-Dunkel-Flaschen-Methode nach Winkler bestimmt. Das jeweils aus 0,5 m Tiefe entnommene Wasser wurde in 125 ml Winklerflaschen für 4 Stunden in 0m, 0,15m, 0,3m, 0,45m und 0,6 m statisch inkubiert. Je 2 Dunkelflaschen wurden pa-

rallel ins Wasser eingebracht. Kompensationstiefe und Kompensationslichtintensität ergaben sich aus der linearen Extrapolation der Anfangsanstiege der Photosynthese-Licht-Relationen (P-I-Kurven). Die flächenspezifische Primärproduktion wurde als Integral der P-I-Kurven ausgewertet.

PAM-Fluorometrie

Mittels eines PAM-Fluorometers (Firma Walz, Effeltrich) wurde die Chlorophylla-Konzentration und die Aktivität unterschiedlicher Algengruppen (Cyanobakterien, Chlorophyceen, Diatomeen) über die Dauer mehrerer Tage kontinuierlich aufgezeichnet. Die Untersuchungen fanden am Elbe-Km 472,4 statt und dienten dem Vergleich zwischen ufernahem Wasser (Buhnenkopf) und Hauptstromwasser. Diese Messungen wurden im Frühjahr (27.-31.05.2001), im Sommer (23.07.-25.07.2001) und im Herbst (24.-28.09.2001) durchgeführt.

3 Ergebnisse

In Abb. 1 bis 3 werden die Resultate bzgl. des Chla-Gehaltes, des UW-Lichtklimas sowie der integralen PP und PR der fließzeitkonformen Elbbereisung dargestellt. Es wurden die Messstellen

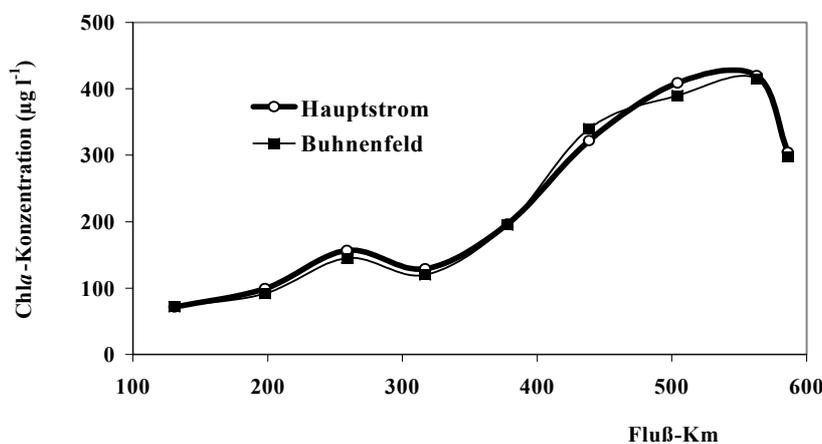


Abb. 1: Chlorophylla-Gehalte entlang der fließzeitkonform beprobten Elbe-Fließstrecke

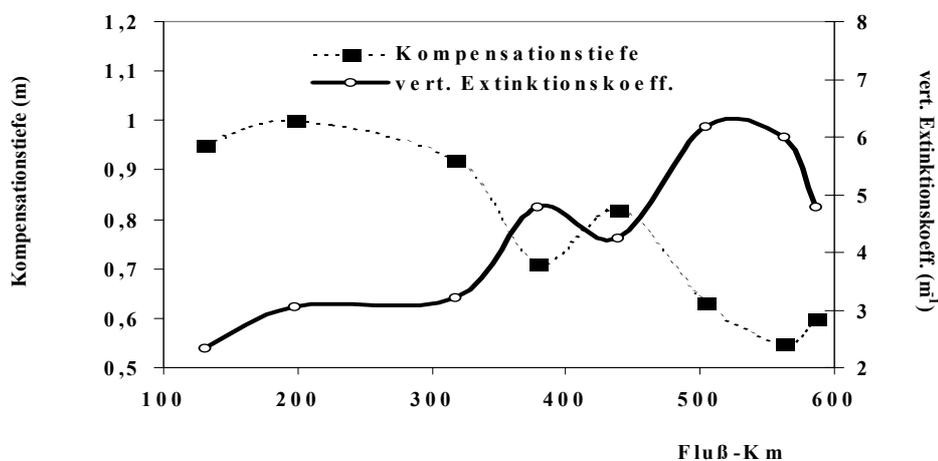


Abb. 2: Vertikale Attenuation an den jeweiligen Inkubationsstandorten entlang der Fließstrecke; die angegebenen Kompensationstiefen waren für die Wasserproben aus Hauptstrom und Buhnenfeld identisch.

Mühlberg (KM 131), Mündung Schwarze Elster (KM 198), Muldemündung (Km 258,8) [nur für Chlorophyll], Magdeburg (KM 317), Ferchland (Km 378), Havelberg (KM 438), Dömitz (KM 504), Barförde (KM 563) und Geesthacht (KM 586) beprobt.

Der Verlauf der Chlorophylla-Konzentration zeugt von nahezu kontinuierlich anwachsender Phytoplanktonbiomasse im Verlauf der deutschen Elb-Fließstrecke. Ausnahmen bilden insbesondere ein starker Abfall der Konzentration unterhalb der Muldemündung, sowie eine Reduktion des Chlorophyll-Gehaltes unterhalb Barförde. Systematische Differenzen zwischen den beiden Teilkompartimenten Hauptstrom und Bühnenfeld konnten nicht nachgewiesen werden, mit Maximalwerten um $400 \mu\text{g l}^{-1}$ Chla gilt die Elbe als hocheutrophes Gewässer.

Abb. 2 dokumentiert die Unterwasser-Lichtverhältnisse und in deren Abhängigkeit jene Gewassertiefe, in welcher gerade keine positive Netto-Primärproduktion mehr stattfinden konnte (Kompensationstiefe). Die vertikale Lichtschwächung im Wasserkörper nahm entsprechend des Chlorophylla-Anstieges entlang der Fließstrecke fast stetig zu, war zwischen Hauptstrom und Bühnenfeld jedoch ebenfalls nicht signifikant unterschiedlich. Die Werte für den vertikalen Extinktionskoeffizienten schwankten zwischen $2,3$ und $6,2 \text{ m}^{-1}$, die geringere Lichtschwächung war im oberen Elbabschnitt anzutreffen. Der ϵ -Maximalwert ($6,2 \text{ m}^{-1}$) trat bei Fluß-Km 504 (Dömitz) auf. Die Kompensationstiefe (Nettoproduktion = 0) zeigte ein entgegengesetztes Längsprofil, reduzierte sich folglich entlang der Fließstrecke. Bis Magdeburg war der deutsche Teil der Elbe im oberen ersten Meter der Wassersäule produktiv, flußabwärts nahm die Mächtigkeit der euphotischen Zone ab und sank bis unter $0,6 \text{ m}$ Wassersäule. Die nicht dargestellten Werte für Kompensations-Lichtintensität bzw. Lichtintensität bei ToB lagen um $10\text{-}45 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Integrale Primärproduktion und Respiration:

Auch hinsichtlich Primärproduktion und Respiration waren keine systematischen Differenzen zwischen Hauptstrom und Bühnenfeldwasser feststellbar (siehe Graphik 3). Es muss jedoch beachtet werden, dass die planktische Produktion als Leistung pro Fläche, die Respiration als Volumenbezug angegeben wurde; eine bilanzierende Gegenüberstellung von Produktion und Respiration kann nur unter Zuhilfenahme einer Tiefenverteilung im Gewässer vorgenommen werden. Auf diesen noch ausstehenden Teilaspekt soll in der Diskussion vertiefend eingegangen werden.

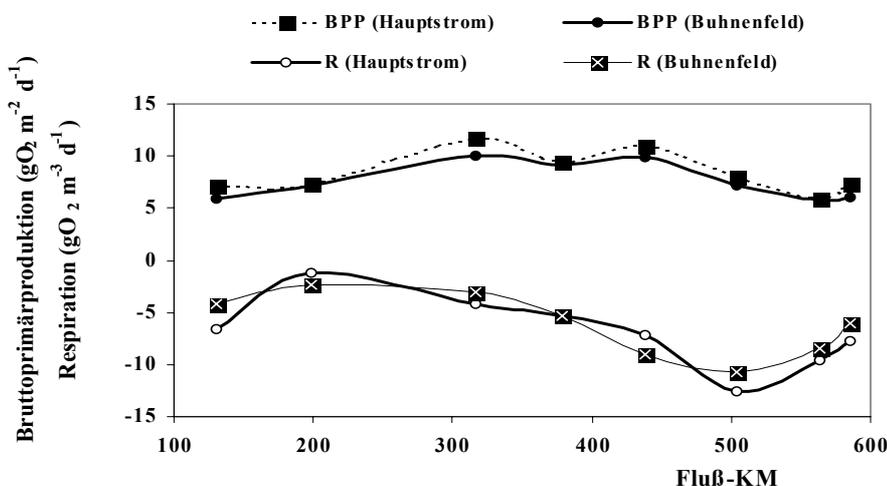


Abb. 3: Integrale BPP und Respiration entlang der Fließstrecke. Beachte: BPP als Produktion pro Fläche, R als Leistung pro Wasservolumen angegeben.

Abb.4 zeigt den Verlauf der mittels PAM-Fluorometrie bestimmten Konzentration an Diatomeen-Chlorophylla an einer ufernahen (Buhnenkopf) und einer flussmittigen Messstelle am Elbe-Km 472,4. Die Graphik verdeutlicht, dass die zeitliche Dynamik an beiden Messstellen korreliert, im ufernahen Bereich jedoch kontinuierlich geringere Mengen Diatomeen auffindbar waren als im Hauptstrom. Der Uferbereich beinhaltet vor der Messstelle eine lange Kette von Buhnenfeldern, die Vorgeschichte der beprobten Wassermassen sollte sich also erheblich unterscheiden. Zur beprobten Jahreszeit wirkte diese Buhnenfeldkette offenbar als Senke für das Phytoplankton. Die spezifische

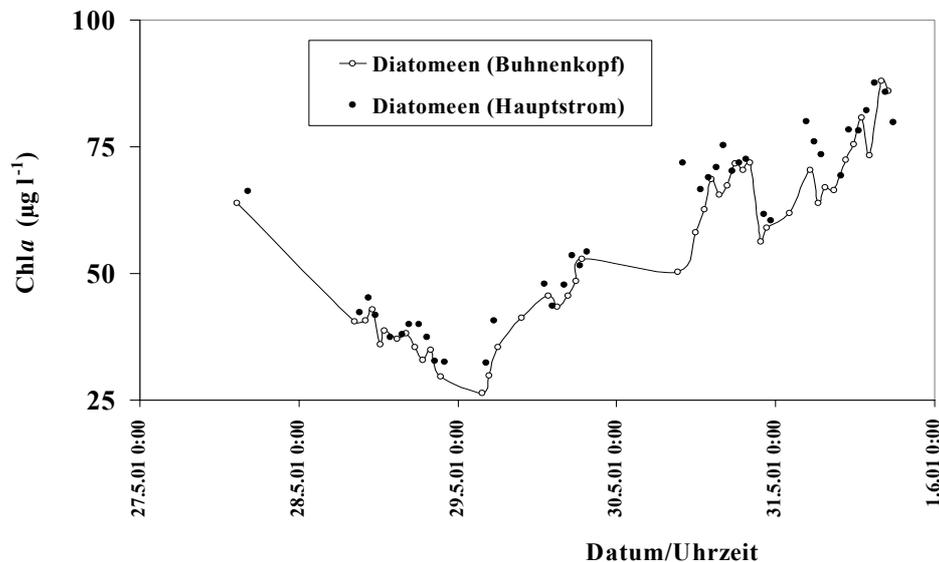


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der Konzentration von Diatomeen-Chlorophylla in ufernahem Wasser (Buhnenkopf) und Hauptstromwasser am Elbe-Km 472,4. Gemessen wurde mit einem PAM-Fluorometer (Fa. Walz, Effeltrich).

Aktivität des Chlorophylls (gemessen als Elektronentransportraten in Abhängigkeit der verfügbaren Lichtintensität) war hingegen nicht nachweisbar verschieden. Die Resultate wurden daher nicht gesondert dargestellt. Dies gilt ebenso für die Konzentrationen und Aktivitäten des Chlorophylls *a* der Chlorophyceen und Cyanobakterien. Deren Biomasse war sehr gering, Unterschiede zwischen Buhnenkopfwasser und Hauptstromwasser waren daher nicht signifikant.

Diskussion

Im Mittelpunkt der Diskussion steht die Frage nach einer Quellen- bzw. Senkenfunktion der Buhnenfelder für den Hauptstrom der Elbe. Hierbei müssen zwei unterschiedliche Ebenen betrachtet werden. Zunächst gilt es, Homogenitäten bzw. Heterogenitäten im aktuellen Verteilungsmuster zwischen Hauptstrom und Buhnenfeld festzustellen und zu bewerten. Erst im zweiten Schritt können mögliche funktionelle Unterschiede (und deren Steuergrößen) zwischen Stillwasserzonen und Hauptstrom diskutiert werden.

Verteilungsanalyse des standing stock

Die Ergebnisse der Elbe-Längsbereisung zeigten, dass sich die longitudinale Veränderung der beprobten Wasserinhaltsstoffe (Chl*a*) bzw. Umsatzraten (PP, BP) zwischen den Teilkompartimenten Buhnenfeld (Stillwasserzone) und Hauptstrom nicht systematisch unterschied. Auffällige Differenzen waren nur dann ersichtlich, wenn die beprobten Wasserkörper von externen Systemen (z.B.

grossen Zuflüsse) unterschiedlich stark beeinflusst wurden. Entweder waren die gemessenen Kriterien lateral also tatsächlich zumeist mehr oder minder homogen verteilt, oder die verwendeten Methoden (Chl a -Analyse mittels HPLC, PP- und PR-Messung mittels Winkler-Methode) müssen für die Frage nach Verteilungsmustern als unzureichend empfindlich angesehen werden. Da die Aufenthaltszeiten zwischen Freiwasser und Bühnenfeld auf nur wenige Stunden geschätzt werden (Baumert, pers. Mitt.; Kozerski, pers. Mitt.), bleibt für die Geschehnisse innerhalb der Bühnenfelder wenig Zeit. Wahrscheinlich trifft also eine Kombination beider Möglichkeiten zu; hohe Austauschraten sorgen für nahezu gleichförmig verteilte Konzentrationen innerhalb und ausserhalb der Bühnenfelder; Prozesse innerhalb der Bühnenfelder (Sedimentation, Resuspension, erhöhter Fraß) sind nur mittels zusätzlicher Methoden detektierbar. Dabei muss berücksichtigt werden, dass es sich bei den genannten Grössen (Chl a , PP, PR) um integrierende Messparameter handelt. Ähnlich hoher Chl a -Gehalt kann durchaus von unterschiedlicher Algenzusammensetzung geprägt werden, die spezifische Leistung (PP, PR) evtl. von völlig unterschiedlichen Organismen getragen sein. Die Bestimmung von Chl a -Gehalten, PP und PR kann evtl. für Hauptstrom und Bühnenfeld identische Werte liefern, obwohl Zellzahl, Biomasse und cellspezifische Umsatzraten unterschiedlich sind. Die Suche nach Differenzen muss also mit empfindlicheren Methoden erfolgen, wobei eine Differenzierung auf Gruppen- oder Artniveau (Taxonomie) erfolgen sollte. Ausserdem können die als Quelle oder Senke fungierenden Areale innerhalb eines Bühnenfeldes nur dann mit hinreichender Präzision angegeben werden, wenn eine detaillierte Verteilungsanalyse (hohe Auflösung der Konzentrationsverteilung innerhalb des Bühnenfeldes) erfolgt. Konkret bedeutet dies, dass zu vergleichende Bühnenfelder und Hauptstromabschnitte flächendeckend und zeitlich hochfrequent beprobt werden müssen, um die Zufälligkeit von Stichproben zu unterbinden. Die für eine solche Analyse erforderliche Probenzahl würde sich mit herkömmlichen Methoden (Analyse einzelner Wasserproben) nicht bewältigen lassen. Insbesondere die Aufklärung der Phytoplanktonstruktur wäre mit mikroskopischer Auswertearbeit nur stichprobenartig durchführbar. Hier macht sich also der Einsatz von zeitlich und/oder räumlich hochauflösenden Geräten erforderlich. Wie in Graphik 4 (Entwicklung des Diatomeen-Chlorophylls mittels PAM) ersichtlich, können fluorometrische Methoden durchaus bei der Analyse auch geringere Unterschiede helfen. Das verwendete PAM-Fluorometer ermöglicht einen raschen Probendurchsatz und die Analyse zahlreicher Parameter des Phytoplanktons (P-I-Kurven dreier Algengruppen [als Elektronentransportraten], Chl a -Gehalt dreier Algengruppen, Aktivität der Algengruppen), kann aber nur stationär verwendet werden. Für die schnelle raumauflösende Analyse (z.B. Chl a - oder Tracer-Verteilungsmuster innerhalb eines Bühnenfeldes) müssen hingegen *in situ*-Fluorometer verwendet werden, die vom fahrenden Boot aus hantierbar sind.

Senken- und Quellenfunktion der Bühnenfelder

Die nahezu homogene Verteilung der Wasserinhaltsstoffe und Umsatzprozesse an den untersuchten Flussabschnitten legt zunächst die Vermutung nahe, dass sich Hauptstrom und Bühnenfeld in ihrer Funktionsweise sehr ähnlich sind. Diese Interpretation wäre jedoch falsch, da sich beide Teilsysteme in hydraulischen Eigenschaften wesentlich unterscheiden. Dies betrifft neben der unterschiedlich langen Aufenthaltszeit des Wassers insbesondere auch die mittlere Wassertiefe. Ein gravierendes Beispiel für die Auswirkung solcher Differenzen soll an dieser Stelle geschildert und diskutiert werden. Böhme et al. (2001) stellten während o.g. Elbe-Längsbereisung fest, dass sich die Amplituden des Sauerstoff-Tagesganges in Bühnenfeldern und Hauptstrom sehr deutlich unterschieden. Die Tagesdynamik war in den Bühnenfeldern erheblich ausgeprägter. Die entsprechenden Prozesse (Primärproduktion und Respiration) sollten also ebenfalls sehr verschieden gewesen sein, was zunächst im Widerspruch zu den hier vorgestellten Resultaten steht. Diese hatten auch für die

Produktions- und Respiationsleistung beider Teilsysteme ähnliche hohe Werte erbracht. Eine Erklärung findet sich aber bei Berücksichtigung der entsprechenden Bezugsgrößen. Während die eigene gemessene Primärproduktion als Sauerstoffentwicklung pro Fläche angegeben wurde, konnte für die Respiration lediglich eine Volumenspezifität benannt werden. Eine Umrechnung in ebenfalls flächenspezifische Respiationsraten wäre nur unter Kenntnis der genauen Tiefenverteilung des Gewässers möglich gewesen. Hierzu müssen also noch morphologische Charakteristika ermittelt werden. Grundsätzlich gilt aber, dass die mittlere Tiefe der Bühnenfelder wesentlich geringer ist als jene des Hauptstromes, unter dem Quadratmeter Wasseroberfläche also auch viel weniger Sauerstoff gezehrt wird. Als logische Konsequenz ergibt sich hieraus, dass bei gleicher Primärproduktion pro Wasseroberfläche sehr viel mehr Respiration im Hauptstrom stattfindet. Dort befinden sich die Organismen auch am Tage überwiegend in Dunkelheit (vermehrte Respiration), da die produktive Schicht sehr gering ist (0,6-1,2m), die Tiefe des Hauptstromes hingegen deutlich höher liegt (3-5m). Phytoplankton des Hauptstromes wechseln durchmischungsbedingt also auch am Helltage kontinuierlich zwischen sauerstoffproduzierenden und sauerstoffzehrenden Phasen, während die Algen im Bühnenfeld überwiegend für eine positive Sauerstoff-Bilanz ausreichenden Lichtbedingungen ausgesetzt sind. Da auch die nächtlichen Respiationsraten pro Wasservolumen annähernd gleich verteilt sein sollten, ergibt sich ein Verhältnis zwischen dem Sauerstoffsaldo des Bühnenfeldes und jenem des Hauptstromes von größer 1. Die gegenüber dem Hauptstrom erhöhte Netto-Produktion im Bühnenfeld sollte sich eigentlich auch in Form erhöhter Algen-Biomasse bemerkbar machen. Offensichtlich führen jedoch hohe Austauschraten zwischen den Wasserkörpern zur raschen Vergleichsmässigung, womit Differenzen im standing stock kaum erfassbar sind.

Das vorgestellte Beispiel belegt einen deutlichen Unterschied in der Funktionsweise von Stillwasserzonen und Hauptstrom. Bezüglich der Photosynthese-Respiations-Bilanz kann festgehalten werden, dass Bühnenfelder vermutlich ganzjährig als Quelle für den Hauptstrom fungieren. Diese Rolle wird dabei natürlich von der Frequenz und Intensität gesteuert, mit der Bühnenfeldwasser und Hauptstromwasser ausgetauscht werden. Die dokumentierte Rolle als Quelle schließt nicht aus, dass zeitgleich Algen vermehrt im Bühnenfeld „verloren“ gehen (Fraß, Sedimentation), also Quellen- und Senkenfunktion der Stillwasserzonen koexistieren. Für präzisere Aussagen diesbezüglich sind weitere Arbeiten von Nöten.

Literatur

Böhme, M., Eidner, R. Ockenfeld, K. & Guhr, H. (2001): Ergebnisse der fließzeitkonformen Elbelängsschnittbereisung 26.06.-07.07.2000. – Berichte der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz. BFG –1309

Nixdorf, B. & Behrendt, H. (1991): Discrepancies between O₂ and ¹⁴C-method resulting from measurements of primary production under condition of vertical mixing in a shallow eutrophic lake. – Verh. Internat. Verein. Limnol. **24**: 1268-1271

Ockenfeld, K. (2001): Die Bedeutung verminderter Wasserführung für phytoplankton-gekoppelte Stoffumsetzungen und den Sauerstoffhaushalt der Krümmen Spree. – Dissertation. Brandenburgische Technische Universität Cottbus

Webb, W., L., Newton, M. & Starr, D. (1974): Carbon dioxide exchange of *Alnus rubra*: A mathematical model. - *Oecologia* **17**: 281-291