5 Diskussion

5.1 Physikalische Limnologie

5.1.1 Morphometrie

Nach der Klassifizierung von HUTCHINSON (1957) sind beide Seen in zwei Kategorien einzuordnen. Von ihrer Entstehungsgeschichte her sind sie als anthropogene Seen zu bezeichnen (Typ 10), da sie durch Ausgrabung entstanden sind. Von ihrer Lage her gehören sie zu den fluvialen Seen (Typ 6).

Die morphometrische Untersuchung in See 1 zeigte, daß es sich um einen flachen See mit einer kleinen Litoralzone handelt, d.h. daß die pelagische Zone den größten Teil des Sees einnimmt und damit das größte Biotop darstellt. Infolge der geringen Tiefe des Systems sind der Einfluß des Bodens und Austauschvorgänge mit dem Sediment beträchtlich. Die Sedimente bestehen überwiegend aus Sand und organischen Stoffen. Die im Vergleich zu der Tiefe relativ große Oberfläche des Sees bietet eine gute Austauschmöglichkeit mit der Atmosphäre und eine reiche Belichtung der oberen Schicht aufgrund fehlender Randbeschattung.

Der See steht mit dem Main über den Untergrund in Verbindung und der Wasserspiegel wird weitgehend durch den Wasserstand im Fluß reguliert. Bei Hochwasser fließt dem See Wasser durch eine Rohrleitung aus dem Main zu. Mit dem durch die Rohrleitung fließenden Mainwasser wird Sand in den See transportiert. Dieser Sand lagert sich in Ost-West-Richtung ab und bildet auf dem Grund des Sees eine Untiefe. Durch die Sandablagerungen nimmt mit der Zeit das Wasservolumen ab.

Der zweite See zeigt eine Untergliederung in eine östliche und eine westliche Zone. Die östliche Zone ist flach und weist eine direkte Verbindung zum Main auf, was zu einer massiven Ablagerung von Sandmaterial am Boden des Sees in diesem Bereich führt. Dieser Bereich unterliegt dem Einfluß der vom Schiffsverkehr und vom schwankenden Wasserniveau des Mains verursachten Wellen. Im Vergleich zu der östlichen Zone ist die westliche Zone recht tief, angedeutet durch ein großes Gefälle der Tiefenlinien und wird wenig vom Main beeinflußt. Auch dieser See ist klein und flach, aber im Tiefenprofil

stärker gegliedert als der Vergleichssee und erreicht eine bedeutend größere Tiefe. Das Litoral ist durch die steil abfallenden Ufer sehr schmal, d.h. daß das Pelagial den größten Teil des Biotops ausmacht. Das Wasservolumen des Sees hängt direkt vom Wasserstand des Flusses ab.
Wegen der direkten Verbindung mit dem Main hat See 2 einen größeren Wasseraustausch als See 1. Deswegen ist die Verweilzeit des Wassers in See 1 höher als in See 2 und der Einfluß der Wasserbewegung und der Sedimentation, besonders in der östlichen Zone von See 2, bedeutend größer als im Vergleichsgewässer. In der westlichen Zone dagegen lagern sich auf Grund der ruhigen Wasserbedingungen und der größeren Tiefe organische Sedimente ab.

5.1.2 Licht

Durch die stärkere Lichtintensität und die höhere Wassertemperatur wurden die Produktionsvorgänge im Verlauf des Sommers intensiviert und die Konzentration von Algen in den oberen Wasserschichten erhöht. In See 1 war im Frühjahr eine relativ hohe Transparenz des Wassers zu verzeichnen, während sich ab Mai die euphotische Zone in einer Tiefe von etwa ½ m einstellte, die sich bis November nicht veränderte. Vermutlich läßt sich die hohe Transparenz im März mit der Überflutung durch das Frühjahrshochwasser und die noch geringe Primärproduktion erklären. Während der Monate Februar und März war die Abflußmenge des Mains auf ca. das Vierfache der mittleren Abflußwerte (MQ) gestiegen. Das Seewasser wird in dieser Überschwemmungsphase, in der die ufernahen Auskiesungsseen völlig überflutet werden, weitgehend ausgetauscht und verändert dadurch seine Beschaffenheit. Mit Beginn der warmen Jahreszeit nimmt das Seewasser eine braune Farbe an, die durch suspendiertes Seston verursacht wird und die sich durch das heranwachsende Phytoplankton verstärkt. Im September, zur Zeit der höchsten Primärproduktion die durch die Blaualgenblüte verursacht wurde, veränderte sich die Farbe des Wassers und nahm eine blaugrüne Farbe an. An den Ufersäumen manifestierte sich die Algenblüte durch Ablagerung von Algenmassen. Trotz der über den gesamten Sommer limitierten Lichtbedingungen war die Primärproduktion in diesem See bedeutend höher als im Vergleichsgewässer. Im Herbst beim Absinken der Primärproduktion blieb die Wassertransparenz gering, was vermutlich darauf zurückzuführen ist, daß durch die täglichen Zirkulationsvorgänge und die geringe Tiefe ständig Partikel aus dem Sediment resuspendiert wurden.

In See 2 war die Transparenz im Frühjahr ebenfalls relativ hoch. Auch dieser See ist von den Frühjahrsüberschwemmungen betroffen und es kommt zu einem weitgehenden Wasseraustausch. Während des Jahresganges zeigte sich, daß die Transparenz sich im Juni mit dem Anstieg der Algenentwicklung verringerte und bis zum September gering blieb. Die geringe Transparenz ist in den Monaten Juni und Juli durch hohe Phytoplanktondichten zu erklären, während im August und September hohe Dichten von Zooplanktern zu verzeichnen waren. Insgesamt ist die euphotische Zone größer als in See 1, weil der ständige Austausch mit dem Main die oberen Wasserschichten stark beeinträchtigt und weniger stabile Bedingungen für das Phytoplankton bietet. Im Oktober dehnte sich die euphotische Zone aus, was durch das Absinken der Primärproduktion zu erklären ist.

5.1.3 Fluß-See Verbindung

Der Wasseraustausch zwischen den Seen und dem Main ist in unterschiedlichem Maße durch den Grundwasserspiegel, durch direkte Verbindungen und durch die periodisch auftretenden Hochwasser bestimmt. Beide Seen sind nur durch eine schmale Landzunge von ca. 50 m Breite vom Fluß getrennt. Im Falle eines Mainhochwassers wurden die Seen überschwemmt. Dies ist insbesondere zu Beginn (Februar und März) des Jahres 1997 der Fall gewesen (Abb. 2). Die Überschwemmungen führten in beiden Seen zu einem weitgehenden Wasseraustausch.

Während Zeiten normaler Wasserstände, insbesondere über den Sommer und Herbst, ermöglichte die Nähe zu dem Fluß einen permanenten Austausch über das Grundwasser, wodurch sich die Wasserspiegel der Seen und des Flusses ausglichen. Diese Verbindung über das Grundwasser ist an See 1 die einzige Verbindung, die während normaler Wasserstände eine Rolle spielte, während die Bedeutung der

Grundwasserverbindung in See 2 wegen der ständig bestehenden direkten Anbindung an den Fluß von geringer Bedeutung war. Die Rohrverbindung zwischen See 1 und dem Main lag bei normalem Wasserstand über dem Wasserspiegel des Sees und diente im wesentlichen dem Niveauausgleich bei fallendem Hochwasser.

5.1.4 Thermische Struktur

Die Wassertemperatur an See 1 hatte die folgenden Merkmale: Die Profile der monatlichen Beprobungen, die durchweg gegen Mittag vorgenommen wurden, zeigen als allgemeine Tendenz eine gleichmäßige Temperaturverteilung in allen Tiefen während der kalten Jahreszeit und eine deutliche Schichtung während der warmen Monate.

Eine Schichtung bildete sich während des Tages nicht aus, solange die Lufttemperatur und die Sonneneinstrahlung das Wasser nicht erwärmten. Von Mai bis September ließ sich eine Stratifikation erkennen. Aus der Ausbildung des Tagesganges des Temperaturverhaltens ist zu ersehen, daß sich die am Tage ausbildende Schichtung in der Nacht aufhebt. Mit dem Sinken der Außentemperatur kühlte sich während der Nacht das wärmere Oberflächenwasser ab und es kam im Verlauf dieser Abkühlung zu einem Temperaturausgleich über die gesamte Tiefe der Wassersäule. Entsprechend zeigten die am Tag gemessenen Temperaturprofile nur einen spezifischen Aspekt einer sich täglich wiederholenden Dynamik. Aus diesem Temperaturverhalten resultierte eine tägliche Zirkulation in dem See, der deshalb als polymiktisch charakterisiert war. Im Oktober und November war eine kontinuierliche Temperaturabnahme zu verzeichten, die im fortschreitenden Winter zur Ausbildung einer geschlossenen Eisdecke führte.

Die Tendenz des Temperaturverlaufes an See 2 ist in den Grundzügen mit denen an See 1 diskutierten zu vergleichen. In den Profilen für März sowie Oktober und November ist eine relativ gleichmäßige Verteilung der Temperatur zu erkennen, die allerdings unregelmäßiger verlaufen als diejenigen in See 1. Diese Temperaturunterschiede, die sich innerhalb einer relativ kleinen Temperaturdifferenz manifestieren, sind mit großer Wahrscheinlichkeit auf den Einfluß der Flußverbindung zurückzuführen. Ähnliche Unregelmäßigkeiten sind auch in den Sommermonaten zu beobachten. Auch hier scheint der Einfluß des Flußwassers eine

Rolle zu spielen. Auch läßt sich in den Wintermonaten eine fortschreitende Abkühlung des Wassers erkennen.
Der Tagesgang im August zeigte Stratifikation während des Tages und eine Durchmischung der Wassersäule während der Nacht, d.h. der See wies keine dauerhafte Stratifikation, sondern Polymixis des Wassers auf.

5.2 Chemische Limnologie

5.2.1 Gelöste Gase und Puffersystem

In See 1 zeigen die Sauerstoffprofile eine ähnliche Tendenz wie die Temperaturverteilung. Die Kurven zeigten in den Herbstmonaten und im März orthograde Profile, die eine gleichmäßige Verteilung des Sauerstoffs in der Wassersäule kennzeichnen. Während der Sommermonate ist eine Schichtung zu erkennen, mit einer starken Übersättigung im Oberflächenwasser und Sauerstoffdefizit in der Tiefe. Die Zonierung und starke Übersättigung nahe der Oberfläche weist auf eine starke Primärproduktion hin, die besonders im August und September evident ist. Gleichzeitig ist eine vom Sediment ausgehende starke Sauerstoffzehrung für das Abfallen der Sauerstoffwerte in den tieferen Wasserschichten verantwortlich.
Die Betrachtung der Sauerstoffkurven in den Messungen des Tagesganges zeigt, daß auch der O_2-Gehalt eine dem Temperaturverlauf entsprechende Tag-Nacht Rhytmik aufweist. In den Abend- und Nachtstunden nehmen die Werte ab, der Sauerstoff gelangt gleichzeitig in tiefere Wasserschichten und erreicht gegen Mitternacht den Seegrund. Die Abnahme der O_2-Werte erklärt sich durch die Verteilung des Sauerstoffes über die gesamte Wassersäule bei gleichzeitigem Verbrauch. In den Morgenstunden wird über dem Grund wieder ein Sauerstoffdefizit erkennbar, während gleichzeitig, bis zum Mittag, eine starke Übersättigung im Oberflächenwasser zu beobachten ist.
Bei Berücksichtigung der Temperaturprofile zeigte sich, daß die O_2-Verteilung im See mit den temperaturabhängigen Stratifikations- und Mischungvorgängen zusammenhängt. Ähnlich ist die Ausbildung einer orthograden Sauerstoffverteilung in den kalten Monaten dadurch zu erklären, daß sowohl die Produktionsvorgänge, als auch die

sauerstoffzehrenden Vorgänge langsam ablaufen und dadurch ein geringerer Gradient des O_2-Gehaltes ausgebildet wird. Gleichzeitig kommt es durch eine zunehmende Abkühlung von der Oberfläche her zu einem kontinuierlichen Absinken von Oberflächenwasser, welches die Verteilung des Sauerstoffs unterstützt.

Der Kohlendioxidgehalt ließ keine Änderung mit der Tiefe erkennen. Bei den in den Sommermonaten während des Tages vorgenommenen Messungen konnte kein CO_2 festgestellt werden. Bei pH-Werten im basischen Bereich liegt CO_2 nicht als gelöstes Gas vor, sondern fast ausschließlich als Hydrogencarbonationen. Verschiebt sich der pH-Wert weiter in den basischen Bereich, so verschiebt sich das Gleichgewicht zwischen Hydrogencarbonat- und Carbonationen zunehmend in Richtung auf Carbonationen. Im Herbst und bis zum Frühjahr sind dagegen relativ hohe CO_2-Konzentrationen zu messen, die wie folgt erklärt werden können: Infolge der sinkenden Primärproduktion wird das durch Abbau organischen Materials enstehende CO_2 nur in geringem Maße verbraucht. Der gleichzeitig sinkende pH-Wert verschiebt zusätzlich das CO_2-Carbonat-Gleichgewicht in Richtung Kohlendioxid, wodurch dieses im Wasser in meßbaren Konzentrationen vorliegt.

Die Änderungen des pH-Wertes im Jahresverlauf zeigen eine Beziehung zu den CO_2-Konzentrationen. In den Sommermonaten liegen sie durchweg im basischen Bereich, während sie in den Winter- und Frühjahrsmonaten bei neutralen Werten liegen. Im Tagesgang (August) zeigt sich, daß der pH-Wert, der durchweg über acht liegt, sich ab Mittag an den oberflächennahen Meßpunkten weiter in den alkalischen Bereich verschiebt. Diese Verschiebung steht im Zusammenhang mit der Photosynthesetätigkeit der Phytoplankter und die dadurch erhöhte Alkalinität.

In See 2 verhalten sich die Sauerstoffprofile tendenziell ähnlich wie in See 1. Die Kurven zeigen im März und im Oktober einen orthograden Verlauf und mit Beginn des Sommers ist eine clinograde Ausbildung der Profile mit Übersättigung in den oberen Wasserschichten zu erkennen. Im Gegensatz zu dem Vergleichssee manifestiert sich dieser Effekt am ausgeprägtesten im Juni und Juli, was mit den in diesen Monaten gemessenen hohen Werten für die Primärproduktion übereinstimmt. Ein weiterer Unterschied zu dem Kurvenverlauf im Vergleichssee sind die in vielen Profilen zu erkennenden Sprünge. Diese Unregelmäßigkeiten in den Profilen, die sich auch bei den Temperaturprofilen zeigen, sind

auf den Einfluß des Mains zurückzuführen. Besonders der starke Schiffsverkehr führt zu deutlichen Wasserstandsschwankungen im See.
Die Sauerstoffmessungen des Tagesganges zeigen durchweg leicht clinograde Profile, die im Oberflächenwasser um 100% Sättigung liegen. Das Sauerstoffdefizit , das sich am Grunde ab den Mittagsstunden manifestiert, wird in den Abendstunden durch einsetzende Austauschvorgänge wieder kompensiert. Die im Gegensatz zu den Verhältnissen in See 1 sehr viel schwächer ausgebildete Tag-Nacht Periodizität ist dadurch zu erklären, daß im See 2 im August die Primärproduktion extrem niedrig ist, was in deutlichem Gegensatz zu den Verhältnissen an See 1 steht. In dem Vergleichssee ist der August einer der Monate mit sehr hoher Primärproduktion.
Die CO_2-Konzentration wies im Gegensatz zu See 1 im Sommer einen deutlichen Anstieg mit der Tiefe auf. Hohe Werte waren nur an der Grenze zwischen Sediment und Wasser zu finden, wo der Abbau organischen Materials stattfindet. Die Unterschiede zu dem Vergleichssee sind in der geringeren Primärproduktion und der größeren Tiefe von See 2 zu finden. Hier findet die Abnahme des CO_2 bis zum Grund nur im Juli statt, dem Monat mit der höchsten Primärproduktion.
Die Entwicklung des pH-Wertes im Jahresverlauf zeigte keine essentielle Veränderung mit der Tiefe. Die Veränderungen des pH-Wertes bewegen sich in einem relativ geringen Bereich, was auf die insgesamt niedrigere Primärproduktion zurückzuführen ist. Die im Monat August gemessenen geringen Schwankungen der Werte im Tagesgang lassen erkennen, daß die Primärproduktion gering war.

5.2.2 Gelöste Ionen

See 1 wies eine Leitfähigkeit mit geringen Schwankungen auf. Im Gegensatz dazu zeigte die Härte, ausgedrückt in Gesamthärte und Carbonathärte, eine starke Erhöhung im September. Die Stabilität der Leitfähigkeit und der Anstieg der Wasserhärte während des Sommers ist durch die Primärproduktion in den oberen Wasserschichten zu erklären. Im Sommer zeigt sich eine hohe Sauerstoffproduktion und Nullwerte der CO_2-Konzentration im Oberflächenwasser. Dies bedeutet, daß durch das Kalk-Kohlensäure-System, insbesondere während des Tages, der oberen Wasserschicht CO_2 entzogen wird. Die CO_2-

Abnahme ergibt sich aus einer Verschiebung des Kalk-Kohlensäuregleichgewichtes mit dem Resultat eines Anstieges des pH-Wertes und der Gesamthärte (LAMPERT & SOMMER 1993).
Die Werte für den Eisengehalt zeigten niedrige Konzentrationen an und werden immer von dem Redoxpotential kontrolliert. Solange im Wasser Sauerstoff vorhanden ist, was im Oberflächenwasser durchweg gegeben ist, liegt das Eisen in seiner ungelösten Form (Fe^{3+}) vor. In den Tiefenbereichen, wo durch sauerstoffzehrende Vorgänge ein Defizit auftritt, sinkt das Redoxpotential ab. Dies war insbesondere im Sommer der Fall wenn das Eisen als Fe^{2+} in löslicher Form vorlag, wobei gleichzeitig freies Phosphor ins Wasser gelangte. Während der nächtlichen Zirkulation des Wassers gelangt Sauerstoff in das Hypolimnion und Fe^{2+} wird in Fe^{3+} umgewandelt. Folglich gelangt tagsüber Phosphor ins Wasser und steht dem Phytoplankton zur Verfügung.
Der Chloridgehalt zeigte im Laufe des Sommers eine leichte Erhöhung, was vermutlich ein Resultat der sich erniedrigenden Abflußwerte des Mains ist, wodurch die Konzentration der Ionen im Grundwasser anstieg.
See 2 wies eine Leitfähigkeit mit geringen Schwankungen auf, zeigte aber aufgrund seiner größeren Verbindung mit dem Main eine höhere Leitfähigkeit als See 1. Die Härte ließ wie an See 1 eine Erhöhung im Sommer mit einem Maximum im September erkennen. Diese Erhöhung ist als Resultat der Schwankungen der Abflußmenge des Mains zu sehen.
Der Eisengehalt wies niedrige Konzentrationen auf und verhielt sich wie für See 1 diskutiert wurde. Der Chloridgehalt zeigte eine leichte Änderung im September als Resultat eines niedrigen Mainwasserniveaus während des Sommers, wodurch die Konzentrationen der Ionen im Wasser anstiegen.

5.2.3 Nährstoffe

See 1. Die gelösten Formen zeigten folgendes Bild: Der Nitratwert lag insgesamt niedrig. Im Frühling und Sommer war der Verbrauch durch die Algen hoch, wodurch der Nitratgehalt in der Wassersäule in geringer Konzentration vorlag. Ein leichter Anstieg im August und September ist durch die Massenvermehrung der Blaualgen zu erklären, die N_2 aus der Atmosphäre fixieren, was besonders für die Arten *Aphanizomenon flos-aquae* und

Anabaena spyroides zutrifft (PAERL 1988). Der Nitritwert zeigte keine bedeutende Veränderung im Jahresverlauf und mit der Tiefe, was sich aus der nächtlicher Polymixis des Wassers und der damit verbundenen Verfügbarkeit von Sauerstoff erklärt. Der Ammonium-gehalt erreichte zwei Maxima: Zum einen fand ein Anstieg mit der Tiefe und zum anderen im Jahresverlauf statt. Die Höchstwerte von 0,5 bis 4 mg/l wurden von August bis Oktober erreicht, nach DVWK (1993) sind Ammoniumkonzentration um 0,1 mg/l als gering und bei 20 mg/l als sehr hoch anzusehen. Bei hoher Temperatur und hoher Primärproduktion sind auch die Nitratammonifikations-und Nitrifikations-Vorgänge intensiviert. Die Nitratammonifikation war besonders im Sommer bei anaerobem Hypolimnion an einem Anstieg des Ammoniumgehalts zu erkennen. In der oberen Wasserschicht waren aufgrund der Sauerstoffverfügbarkeit die Nitrifikationsvorgänge vorherrschend. Dies zeigte sich vor allem tagsüber während der Stratifikation des Wassers, wogegen nachts mit eintretender Zirkulation (siehe Kap. 4.3.3.5.2) Sauerstoff in die Tiefe gelangte und die Nitrifikationsvorgänge auch die Tiefe erreichten.

Bei den hohen sommerlichen pH Werten, die zeitweise über pH 9 lagen, wäre eine Umwandlung des Ammoniums zu Ammoniak zu erwarten. Durch die nächtliche Zirkulation des Wassers wird der pH leicht vermindert (von 9,5 tagsüber zu 8,7 um 00:15 Uhr) und Sauerstoff in die Tiefe transportiert. Dadurch wird verhindert, daß sich Ammoniak in größerem Umfang bildet und toxische Konzentrationen erreicht.

An See 1 ist gelöstes Phosphat über das gesamte Jahr verfügbar und erreicht im September die höchste Konzentration. Die Anwesenheit von Orthophosphat in der gesamten Wassersäule konnte durch die Interaktion des Eisens und die Zirkulation des Wasser erklärt werden (siehe Diskussion in Kapitel 5.2.2).

Die Tatsache, daß trotz des hohen Phosphatbedarfs von Blau-und Grünalgen (SOMMER 1989) immer gelöstes Phosphat im Wasser vorhanden war, läßt klar erkennen, daß der Stickstoff die Primärproduktion begrenzte(LAMPERT & SOMMER 1993). Die Dominanz der spezialisierten Blaualgenarten im August und September, die in der Lage sind, atmosphärischen Stickstoff aufzunehmen, ist ein Zeichen für die geringe Verfügbarkeit von Stickstoff im Wasser.

Obwohl in der vorliegenden Arbeit Silizium nicht gemessen wurde, scheint das Auftreten der Kieselalgen mit einer großen Individuendichte im Frühjahr und das spätere weitgehende Verschwinden darauf hinzudeuten, daß die Kieselalgen während ihrer Massenentwicklung alles verfügbare Silizium aufbrauchten und damit ihre weitere Entwicklung limitierten (LAMPERT & SOMMER 1993).

An See 2 zeigte der Gesamtstickstoffgehalt daß nur im September gab es einen Anstieg mit der Tiefe, der auf hohen Nitratwerten beruht. Die einzelnen Fraktionen stellten sich folgendermaßen dar: Die sich im Juni und Juli erniedrigenden Nitratwerte sind mit dem Verbrauch durch die Primärproduktion zu erklären. Die höheren Werte im August und September wiederum weisen auf die absinkende Primärproduktion in diesen Monaten hin. Es war immer Nitrat in hohen Konzentrationen im Wasser vorhanden , d.h. es fand keine Begrenzung der Primärproduktion durch die Nitrate statt (VOLLENWEIDER & KEREKES 1982).

Die Nitrite zeigten keine bedeutende Änderung im Jahresverlauf und mit der Tiefe, und die Konzentrationen waren insgesamt gering. Der Ammoniumgehalt stieg tendenziell mit der Tiefe an und erreichte Höchstwerte auf dem Grund, dennoch waren die Konzentrationen insgesamt niedrig. Da an See 2 fast immer Sauerstoff in der gesamten Wassersäule verfügbar war, herrschten aerobe Prozesse vor, wodurch eine ständige Nitrifikation des Ammoniums möglich war.

An See 2 waren Sticksoff und Phosphat im Wasser immer in ausreichender Konzentration vorhanden (LAMPERT & SOMMER 1993). Wegen des hohen Phosphatbedarfs der Chlorophyta und zentrischen Diatomeen (SOMMER 1989), die durch die Arten *Stichococcus cf. bacillaris* und *Stephanodiscus neoastraea* mit hohen Abundanzen vertreten waren, sank in den Monaten Juni-Juli der Orthophosphatgehalt im Oberflächenwasser ab, Phosphat blieb aber immer verfügbar. In diesem See war die Phytoplanktonentwicklung durch die Austauschvorgänge mit dem Mainwasser (Kap. 5.1.1) limitiert, weswegen die gelösten Formen von Stickstoff und Phosphat nie gänzlich aufgebraucht wurden.

Wie in See 1 ist die Diatomeenentwicklung vermutlich auch hier durch die Verfügbarkeit von Silizium limitiert, weshalb diese Algen nach einer Massenentwicklung im Juli fast gänzlich verschwinden.

5.3 Primärproduktion

An See 1 war Chlorophyll a als ein Kriterium für die Biomasse ohne Bedeutung, weil es in geringen Konzentrationen vorlag und wenig Beziehung zur Primärproduktion zeigte. Bei einem Maximum der Bruttoprimärproduktion im September (um 1000 mgC m^{-3} h^{-1}) gab es nur einen unbedeutenden Anstieg von Chlorophyll a. Die Ursache ist, daß Chlorophyll a nicht das Hauptpigment war, d.h. es gab bedeutende Fraktionen von anderen Photopigmenten, die dominieren könnten, wie z.B. Chlorophyll b und c. Nach MARKER et al. (1980) besitzen die Diatomeen und die Dinoflagellaten Chlorophyll c und die Grünalgen Chlorophyll b zusätzlich zu Chlorophyll a. Bei Chlorophyll a Messungen im Phytoplankton scheint nicht die reale Biomasse wiedergegeben zu werden, da auch Chlorophyll b und c eine wichtige Rolle spielen können. Die höchsten Chlorophyllwerte fanden sich im Mai und im August-September, was mit dem Anstieg der Chlorophyta und Chrysophyta im Mai und der Blaualgen in August und September korrespondierte.

Die Nettoprimärproduktion hatte hohe Werte im August und September, was mit dem Anstieg der Cyanophyta, Euglenophyta und Dinophyta im Zusammenhang steht. Diese drei Gruppen und insbesondere die Blaualgen, welche während dieser Zeit eine Massenvermehrung durchmachten, sind die dominanten Gruppen des Phytoplanktons im Sommer. Im Oktober waren die Cryptophyta und die Chlorophyta die ausschließlichen Primärproduzenten. Die Chrysophyta durchliefen im Mai einer Massenvermehrung.

Die Bruttoprimärproduktion in See 1 zeigte eine kleine Spitze im Juni und den größten Anstieg im August und September, was mit zwei Anstiegen der Atmung, einer im Juni und hohen Atmungwerten im August und September zusammenhängt.

Auch in See 2 spiegeln die Chlorophyll-a Werte nicht die reale Primärproduktion wieder. Es gab geringe Konzentrationen und keine direkte Übereinstimmung mit der Primärproduktion.

Die Nettoprimärproduktion wird im Mai, bei niedrigen Werten, durch einen Anstieg der Cyanophyta und Chrysophyta bestimmt. Auch im Juni sind die Werte niedrig, obwohl die Chrysophyta und Chlorophyta ihre höchsten Dichten hatten. Das erklärt sich durch die gleichzeitig hohe Populationsdichte der Protozoen. Im Juli werden die höchsten Werte erreicht, was als Effekt des Protozoenrückgangs erklärt werden kann. Die geringe

Übereinstimmung der Werte für die Bruttoprimärproduktion können, ebenso wie die Septemberwerte durch methodische Fehler verursacht sein (TALLING & DRIVER 1961).

Über die Primärproduktion kann gesagt werden, daß See 1 eutroph ist, mit einer hohen Nettoprimärproduktion im Sommer. Die Primärproduktion an See 1 ist von Lichtbedingungen, vom Stickstoff und, bezogen auf die Diatomeen, wahrscheinlich auch von Silizium limitiert. Nach MARGALEF (1983) hängt die Primärproduktion vom Licht ab und von vertikalen Mischungsvorgängen, die dafür sorgen, daß die Organismen mit Licht und Nährstoffen in Kontakt kommen.

In See 2 ist die Neigung zu Eutrophierung weniger ausgeprägt. In der Sukzession des Phytoplanktons ist in See 2 durch das Zooplankton kontrolliert. Im August wird durch eine starke Population von Cladoceren das Phytoplankton weitgehend aufgebraucht. Das Unterschiedliche Verhalten im Vergleich zu See 1 ist auf den ständigen Wasseraustausch mit dem Main zurückzuführen.

5.4 Diversität und Sukzession

Nach MARGALEF (1983) spiegeln die Veränderungen in der Zusammensetzung der Planktongemeinschaft auch deren Diversität wider. Da in beiden Seen die räumlichen Veränderungen der Planktongemeinschaften keine besondere Rolle spielten, wird im Wesentlichen auf die zeitlichen Veränderungen des Planktons eingegangen.

5.4.1 Indizes und deren Beziehung zur Phytoplanktonsukzession

Die Höchstwerte der Diversität und Äquitabilität waren im Juni-Juli mit einer Koexistenz der Chlorophytaarten zu beobachten. Das Absinken der Diversität ab August wird vorwiegend vom Dominanzgrad beeinflußt. Gleichzeitig kommt es zu einem Anstieg der Cyanophytenarten (*Anabaena spyroides* und *Aphanizomenon flos-aquae*), die mit Hilfe Heterocyten N_2 fixieren können. Diese Cyanophyten haben bei Stickstofflimitation und ausreichendem Phosphatgehalt (PAERL 1988) einen Vorteil gegenüber den anderen Algen.

An See 2 gab es Koexistenz der Arten, welche an den hohen Austausch zwischen See und Fluß angepasst sind. Die Äquitabilität sinkt im Juni ab aufgrund der Abundanz der Arten *S. neoastraea*, *A. granulata* (Chrysophyceae) und *S. cf. bacillaris* (Chlorophyceae) in diesem Monat, aber im gesamten Jahrverlauf hatte die Äquitabilität hohe Werte bei niedrigem Dominanzgrad.

5.4.2 Indizes und deren Beziehung zur Zooplanktonsukzession

An See 1 hatte die Diversität geringe Werte und geringe Schwankungen. Besondere Spitzen der Äquitabilität an See 1 werden im Mai durch die Häufigkeit von zwei Rotiferaarten, *B. angularis* und *K. quadrata*, erreicht. Das Absinken der Äquitabilität im Juni hat die Häufigkeit der kleinen Cladocere *B. longirostris*, sowie von Nauplien und Copepoditen als Ursache. Populationen von *Bosmina* zeigen mit dem Temperaturanstieg im Sommer gewöhnlich ein starkes Wachstum (e.g. FERGUSON et al. 1982, GULATI et al. 1982).

An See 2 war die Artenzahl niedrig und zeigte einen Anstieg im Mai und Juni auf Grund der Häufigkeit von Rotifera und Cladocera. Diese Tiere können sich durch Parthenogenese fortpflanzen und haben deshalb einen Entwicklungsvorteil vor den Copepoda, die sechs Nauplien und fünf Copepodit-Stadien durchlaufen, bevor sie ihre Sexualreife erreichen (ALLAN 1976, ALLAN & GOULDEN 1980, LYNCH 1980; in DEMOTT 1989). Die Diversität hatte niedrige Werte und geringe Schwankungen, gleichzeitig sank im Juni die Äquitabilität als Folge der Dominanz der Cladocera.

In beiden Seen war die Diversität maßgebend von der Dominanz beeinflußt, d.h. die Zooplanktongemeischaft hatte eine Struktur, in der wenige Arten Populationen mit großer Individuenzahl ausbildeten.

5.4.3 Planktondiversität und äußere Bedingungen

Externe Faktoren für beide Seen, welche die Planktonsukzession stark beeinflussen und die die Unterschiede zwischen See 1 und See 2 verursachen, sind in den Austauschvorgängen mit dem Main zu suchen.

Die Überschwemmungen des Mains bringen Nährstoffe und Organismen in den See ein und homogenisieren den Wasserkörper. Gleichzeitig werden organische Sedimente die sich im Verlaufe des Vorjahres abgelagert haben, resuspendiert und zum Teil wegtransportiert. Damit beeinflussen diese Ereignisse wesentlich den Beginn des Sukzessionsgeschehens im Frühjahr.

Andere Unterschiede zwischen den beiden Seen ergeben sich aus deren unterschiedlicher Morphologie und der unterschiedlichen Anbindung an den Fluß. Während See 1 eine gleichmäßige, geringe Wassertiefe hat, ist See 2 bedeutend tiefer und das Tiefenprofil unregelmäßig. SeinVolumen liegt bei etwa dem Dreifachen des Vergleichssees. Während des größten Teils des Jahres ist See 1 vom Main abgeschnitten, während See 2 in ständigem Wasseraustausch mit dem Fluß steht. Als Folge dieser Unterschiede stellt See 1 während der Vegetationsperiode ein weitgehend geschlossenes System dar, in dem die Sukzessionsvorgänge von internen Mechanismen gesteuert werden. See 2 stellt dagegen ein teilweise offenes System dar, in dem die Verhältnisse durch den Wasseraustausch mit dem Main ständig beeinflußt werden.

5.5 Zeitliche Änderung der Planktongemeinschaften

In See 1 steuerten interne Vorgänge die Sukzession in Richtung Alternanz der Arten. Die Ergebnisse von Dendrogrammen zeigten in die meinste Fälle, wenige Tendenz der systematischen Kategorien sich in den verschiedenen Monaten zu gruppieren. Es gab nur zwei Gruppierungen, die ein Koexistenz anzeigten: eine von Cryptophyten und Copepoden mit einer single linkage um 40, diese war besonders deutlich im Oktober, die als Resultat der Freßbarkeit der Cryptophyta durch Nauplien und Copepoditen interpretiert werden könnte. Die zweite Koexistenz zeigt sich in der Kombination von Nauplien und Copepoditen (single linkage um 30). Da diese Jugendformen der einzigen abundanten Copepodenart *C. strenuus* darstellen ist dies eine Folge der Trennung der beiden Larvengruppen. Das Auftreten beider Stadien im Juni zeigt, daß sich die Reproduktionsperiode der Art über einen längeren Zeitraum erstreckt.

In See 2 war die Sukzession wie im Vergleichssee durch hohe Alternanz der Populationen charakterisiert. Es gab nur zwei Fälle wo die Koexistenz evident war: eine zwischen

Copepoden und Cladocera (single linkage um 30) als Resultat der zufällige Koexistenz der Gruppen im August und der Zusammenfassung zweier Arten innerhalb der Cladocera. Die Darstellung in Abb. 143, in der *D. cucullata* und *B. coregoni* getrennt auggeführt sind, zeigt, daß auf Artniveau kein höherer Grad von Koexistenz besteht.
Die zweite Gruppierung, zwischen Cryptophyten und Cladocera (um 30), ist vermutlich zufällig hat wegen die niedrige Abundanz der Gruppen keine besondere Bedeutung.

5.6 Planktonsukzession

Die vorliegende Arbeit stellt einen Beitrag zum Studium der Planktonsukzession an beiden Seen dar, die im folgenden in Anlehnung an das PEG-Modell der saisonalen Sukzession der Planktonereignisse im Süßwasser, nach SOMMER et al. (1986), beschrieben werden soll. Dabei liegen die Limitationen der Arbeit in der relativ geringen Probenfrequenz, der Begrenzung auf nur jeweils zwei pelagischen Probestellen und der Tatsache, daß der Untersuchungszeitraum nur über ein Jahr reichte. Trotzdem scheint es angebracht, eine erste Beschreibung der Planktonsukzession für jeden See vorzustellen.

5.6.1 Planktonsukzession in See 1 (Main km-314,75)

März. Überschwemmung durch den Main. Höchstwert der Wassertransparenz um 0,7 Meter. Wasseraustausch und starke Durchmischung. Orthograde Profile von Wassertemperatur und Sauerstoff. Geringe Präsenz von Phyto- und Zooplankton.

Mai. Geringe Wassertransparenz um 0,2 Meter Tiefe. Stratifikation mit hohem relativen thermischen Widerstand bei Sonneneinstrahlung. Polymixis. Sauerstoff mit clinograden Kurven am Tag. Mäßige Werte der Nettoprimärproduktion, Chrysophyta und Rotifera sind abundant. Dominanz der Art *Nitzschia acicularis*. Häufigkeit von *Brachionus angularis* und *K. quadrata*.

Juni. Geringe Wassertransparenz. Stratifikation bei Sonneneinstrahlung, Polymixis. Sauerstoff mit clinograden Kurven und Übersättigung in der oberen Wasserschicht am Tag.

Das Silizium limitiert das Wachstum der Kieselalgen. Niedrige Nitratwerte. Anstieg der Cladocera und Copepoda bis hin zu hohen Abundanzen. Erster Anstieg der Bruttoprimärproduktion und Atmung. Anstieg der Phytoplanktondiversität durch Chlorophyta mit hoher Äquitabilität. Anstieg von Cladocera mit Häufigkeit von *Bosmina longirostris*. Gehäuftes Auftreten Nauplien und Copepoditen.

Juli. Geringe Wassertransparenz. Stratifikation bei Sonneneinstrahlung, Polymixis. Sauerstoff mit positiv heterograder Kurve und Übersättigung in der oberen Wasserschicht am Tag. Niedrige Nitratwerte. Anstieg der Phytoplanktondiversität auf Grund von Chlorophyta mit hoher Äquitabilität.

August. Geringe Wassertransparenz. Stratifikation bei Sonneneinstrahlung, nächtliche Durchmischung des Wassers, Polymixis. Sauerstoff mit clinograden Kurven, Übersättigung in der oberen Wasserschicht und anaerobe Tiefenbereiche am Tag. Niedrige Nitratwerte kontrollieren das Algenwachstum. Hohe Nettoprimärproduktion. Anstieg von Cyanophyta und Euglenophyta. Mit der Anwesenheit der Blaualgen beginnt die Phytoplanktondiversität abzunehmen.

September. Geringe Wassertransparenz. Stratifikation bei Sonneneinstrahlung, Polymixis. Sauerstoff mit positiv heterograder Kurve, Übersättigung in der oberen Wasserschicht und anaerobes Tiefenwasser am Tag. Anstieg der Gesamthärte und Carbonathärte. Anstieg des Phosphatgehaltes. Anstieg der Nettoprimärproduktion im Zusammenhang mit auftretender Cyanophytenblüte sowie einer Zunahme von Euglenophyta und Dinophyta. Maximale Werte der Bruttoprimärproduktion und Atmung. Der See ist eutrophiert. Mit der Anwesenheit der Blaualgen niedrige Phytoplanktondiversität. Leichter Anstieg der Copepoda.

Oktober. Geringe Wassertransparenz. Orthograde Profile der Wassertemperatur und Sauerstoff, keine Stratifikation. Absinken des Nitratgehalts, der Bruttoprimärproduktion und der Nettoprimärproduktion. Anstieg der Cryptophyta als Hauptprimärproduzenten und Rückgang der anderen Phytoplanktongruppen. Anstieg der Cladocera.

November. Geringe Wassertransparenz. Orthograde Profile der Wassertemperatur und des Sauerstoffes, Mischung des Wassers. Absenkung der Nitratgehaltes. Zunahme der Protozoa und Abnahme der Copepoda.

5.6.2 Planktonsukzession in See 2 (Main km-310)

März. Überschwemmung durch den Main. Wassertransparenz um einen Meter. Beginn der thermischen Stratifikation. Geringe Werte der Leitfähigkeit. Sauerstoff mit orthograden Profilen.

Mai. Wassertransparenz um einen Meter. Stratifikation bei Sonneneinstrahlung mit heterograden Temperaturkurven. Sauerstoff mit clinograden Kurven und Übersättigung in der oberen Wasserschicht am Tag. Anwesenheit von Chrysophyta und Cyanophyta ohne einen bedeutenden Anstieg der Nettoprimärproduktion wegen hoher Abundanz von Protozoen und Rotiferen.

Juni. Abnehmende Wassertransparenz um 0,6 Meter. Stratifikation bei Sonneneinstrahlung, Polymixis. Sauerstoff mit clinograden Kurven und Übersättigung in der oberen Wasserschicht bei Tag. Hoher Bedarf an Nitrat und Phosphat bei ständiger Verfügbarkeit. Erster Anstieg der Bruttoprimärproduktion und Atmung. Zunahme der Chlorophyta und Chrysophyta. Anstieg der Artenanzahl der Chlorophyta. Anstieg der Häufigkeit von Protozoa und Cladocera.

Juli. Geringe Wassertransparenz. Stratifikation bei Sonneneinstrahlung, Polymixis. Sauerstoff mit clinograden Kurven und Übersättigung in der oberen Wasserschicht und anaerobem Tiefenwasser bei Tag. Hoher Bedarf an Nitrat und Orthophosphat bei ständiger Verfügbarkeit, hohe Nettoprimärproduktion und Dominanz der Chlorophyceen. Die Primärproduktion ist durch ständigen Wasseraustausch limitiert. Das Silizium limitiert das Wachstum der Kieselalgen. Häufigste Algengruppen sind die Chrysophyten und die Chlorophyten. Anstieg der Nettoprimärproduktion.

August. Geringe Wassertransparenz. Stratifikation bei Sonneneinstrahlung, Polymixis. Geringe Werte der Leitfähigkeit. Sauerstoff mit negativ heterograden Kurven am Tag. Rückgang der Phytoplanktongemeischaft, Verminderung der Nettoprimärproduktion und Anstieg der Cladoceren.

September. Geringe Wassertransparenz. Stratifikation bei Sonneneinstrahlung, Polymixis. Sauerstoff mit negativer heterograder Kurve. Anstieg der Gesamthärte und Carbonathärte. Leichte Zunahme der Chrysophyta und mäßige Werte der Nettoprimärproduktion. Zweiter Anstieg der Bruttoprimärproduktion und Atmung. Anstieg der Protozoen. Die Cladocerenpopulationen sind vermindert, die Copepoda nehmen zu.

Oktober. Anstieg der Wassertransparenz. Keine Stratifikation. Sauerstoff mit orthograden Profilen. Weiteres Absinken der Phytoplanktongemeinschaft und Absinken der Protozoen.

November. Anstieg der Wassertransparenz. Keine Stratifikation. Sauerstoff mit orthograden Profilen. Anstieg der Rotiferen und Protozoen.