3 Material und Methoden

Es wurden zwei Seen am Main im Gebiet von Volkach ausgesucht (Abb. 3).

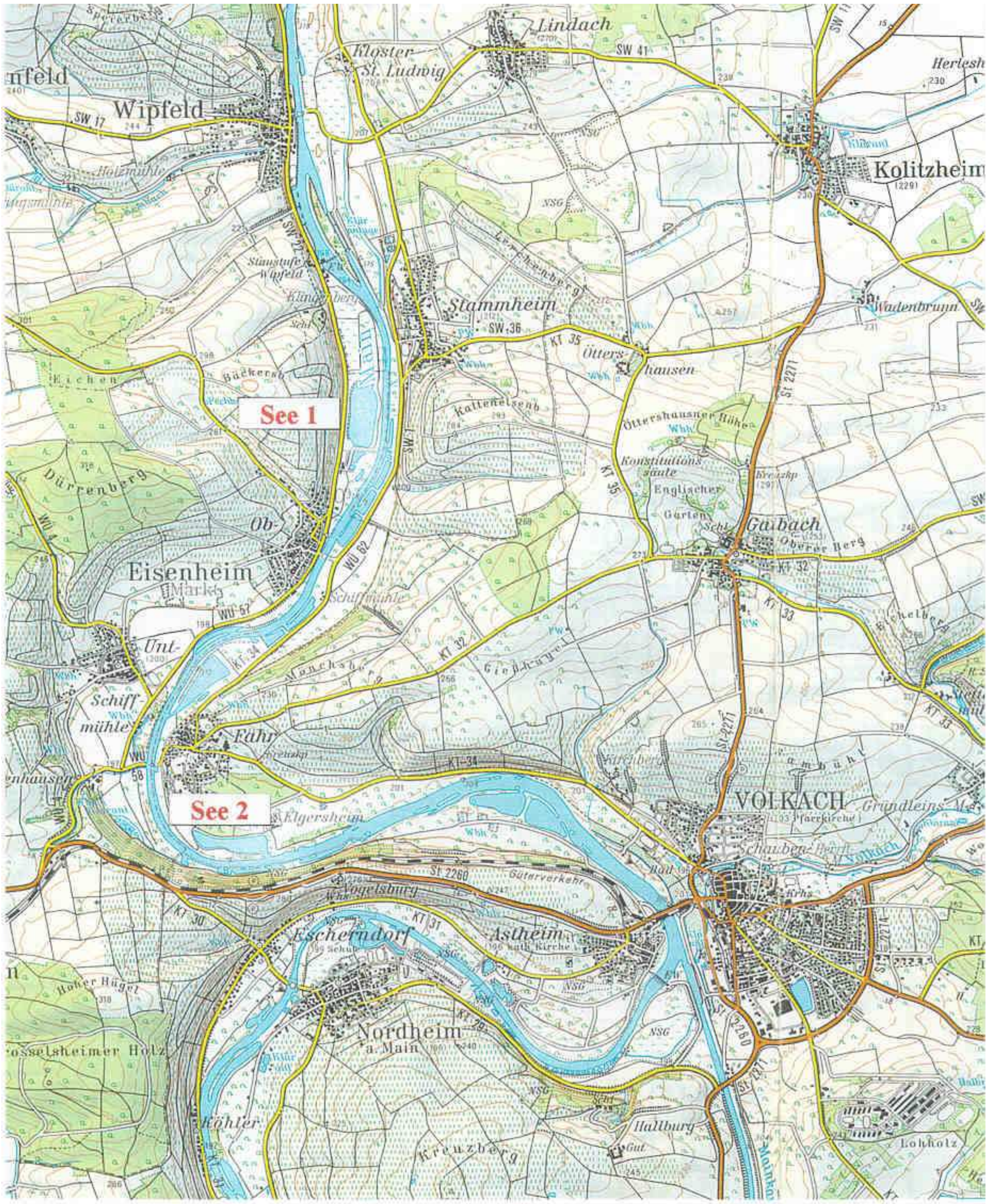

Abb. 3. Übersichtskarte der untersuchten Seen.

Einer der Seen ist lediglich durch ein Rohr mit einem Durchmesser von 45 cm mit dem Main verbunden, welches als Überlaufrohr dient und bei normalem Wasserstand über dem Wasserspiegel liegt. Der andere See steht durch einen breiten Seitenarm mit dem Fluß in Verbindung. Diese Verbindung zwischen See und Main ist 70 m breit und hat eine Tiefe von bis zu 2 m. Es wurden zwei uferferne Probestellen in jedem See etabliert. Jede Probestelle wurde in drei verschiedenen Tiefen beprobt, 10 cm unter der Oberfläche, an der Grenze der euphotischen Zone und über dem Grund, nur die Wassertemperatur und die Sauerstoffkonzentration wurden unabhängig davon alle 20 cm gemessen. Die Grenze der euphotischen Zone wurde durch das Lambert-Beersche Gesetz bestimmt. BIRGE (1915, 1916) verwendete das Lambert-Beersche Gesetz für die prozentuale Absorption des Lichtes mit der Wassertiefe. Die Gleichung lautet:

$$100(I_o-I_z)/I_o, \text{ oder } I_z=I_o * e^{-kz}$$

I_o= Radiation auf der Oberfläche
I_z= Radiation der Tiefe z
k= Vertikaler Attenuationskoeffizient

Die Abnahme der Lichtintensität im Wasser wird als vertikale Lichtattenuation bezeichnet. Der vertikale Attenuationskoeffizient (k) ist charakteristisch für jeden See und hängt von der Absorption des Wassers und der Partikel, sowie von der Färbung des Wassers, ab. k wurde mit der Gleichung $k= 1{,}7/T_s$ errechnet, wobei T_s die Secchitransparenz ist (POOLE & ATKINS 1929).

Die Wasserproben wurden mit einem Ruttner-Schöpfer mit einem Liter Volumen entnommen. Die Probennahme erfolgte in den Monaten März (25. bis 27.), Mai (3. bis 5.), Juni (6. bis 8.), Juli (4. bis 6.), August (1. bis 4.), September (8. bis 10.), Oktober (25. bis 27.) und November (28. bis 30.) des Jahres 1997, von einem Boot aus. Die Tagesgänge wurden im Monat August (1997), am 1. und 2. in See 1 und am 3. und 4. in See 2, durchgeführt.

3.1 Physikalische Variablen

Es wurden folgende physikalische Variablen gemessen: Lufttemperatur, Wassertransparenz, Wassertemperatur, relativer thermischer Widerstand und Leitfähigkeit. Zur Beschreibung des Sees wurden zusätzlich morphometrische Parameter erhoben.
Die Lufttemperatur wurde mit einem Gerät (Oxi-320 WTW) mit Temperatursensor im Schatten des Bootes gemessen. Die Transparenz wurde mit einer Secchischeibe von 14 cm Durchmesser bestimmt, wofür das Seil alle 10 cm markiert war. Die Wassertemperatur wurde mit einem Gerät (Oxi-320 WTW) an jeder Probestelle jeweils alle 20 cm gemessen. Der relative thermische Widerstand konnte durch die Wasserdichte (nach HUTCHINSON 1957) bestimmt werden. Die Leitfähigkeit wurde in drei verschiedenen Tiefen mit dem Leitfähigkeitsmeßgerät VDSF G der Firma VDSF Umwelttechnik, Offenbach/Main, gemessen.
Es wurden folgende morphometrische Parameter bestimmt: Lage über NN, maximale Tiefe, Durchschnittstiefe, relative Tiefe, größte Länge, größte Breite, Durchschnittsbreite, Länge der Uferlinie, Verlauf der Uferlinie, Oberfläche und Volumen. Die relative Tiefe ist der Quotient aus maximaler Tiefe und Durchmesser des Sees (HÅKANSON 1981). Der Verlauf der Uferlinie (F) ist ein Parameter der Uferlinienirregularität und stellt somit die Relation zwischen der tatsächlichen und der theoretischen Uferlinie dar. Diese theoretische Uferlinie wird als diejenige eines zirkulären Sees mit einer äquivalenten Oberfläche beschrieben und entspricht einem Uferlinienverlauf von F=1. Irreguläre Seen besitzen hohe F-Werte (HÅKANSON 1981).
In jedem See wurde eine Bathimetrie durchgeführt. Zur Bestimmung des Tiefenprofils wurde jeder See auf der längsten ermittelten Diagonalen sowie deren Parallelen im Abstand von 10 m befahren, dabei wurde mittels Echolot alle 10 m die Tiefe ermittelt (BFG 1996). Die Berechnung der Parameter wurde nach HÅKANSON (1981) und WETZEL & LIKENS (1991) vorgenommen, und die bathimetrische Karte mit Hilfe des Computerprogrammes Surfer (Version 6.01) erstellt. In Tab. 1 sind die Methoden, die Geräte und die Einheiten für die physikalischen Variablen zusammengestellt.

Tab. 1. Methoden für die physikalischen Variablen.

Variablen	Einheiten	Methoden	Bemerkungen
Lufttemperatur	°C	elektronisch	WTW-Meßkette
Wassertransparenz	m	Secchischeibe	Durchmesser 14 cm
Wassertemperatur	°C	elektronisch	WTW- Meßkette
Relativer Widerstand	dimensionslos	Dichte	HUTCH. (1957)
Leitfähigkeit	$\mu S\ cm^{-1}$	elektronisch	VDSF G Gerät
Höhe über NN	m	Kartographie	Blatt L61 26 Volkach
Maximale Tiefe	m	Bathimetrie	HÅKANSON (1981)
Durchschnittstiefe	m	Bathimetrie	HÅKANSON (1981)
Relative Tiefe	%	Bathimetrie	HÅKANSON (1981)
Oberfläche	ha	Planimetrie	HÅKANSON (1981)
Uferlinie (Länge)	m	Planimetrie	HÅKANSON (1981)
Uferlinie (Verlauf)	dimensionslos	Planimetrie	HÅKANSON (1981)
Größte Länge	m	Planimetrie	HÅKANSON (1981)
Größte Breite	m	Planimetrie	HÅKANSON (1981)
Durchschnittsbreite	m	Planimetrie	HÅKANSON (1981)
Volumen	m^3	Bathimetrie	HÅKANSON (1981)

3.2 Chemische Variablen

Es wurden folgende chemische Variablen gemessen: Sauerstoff, Sauerstoffsättigung, pH und Kohlendioxid (*in situ* gemessen), Alkalinität, Gesamthärte, Carbonathärte, gelöster Stickstoff, Nitrat, Nitrit, Ammonium, Orthophosphat, Eisen und Chlorid. Die Wasserproben wurden in Kunststoffgefäßen von 2 Liter Volumen in einem Thermobehälter zum Labor transportiert.

Die Sauerstoffkonzentration und die Sauerstoffsättigung konnten mit einem Oximeter WTW-OXI96 alle 20 cm direkt im Wasser gemessen werden. Der pH-Wert wurde mit einem Digital pH-Meter GPHR 1400 in drei Tiefen gemessen. Der Kohlendioxidgehalt wurde *in situ* durch die Phenolphtaleinmethode nach SCHWOERBEL (1994) bestimmt. Die Bestimmung der Alkalinität erfolgte mittels der Korrelation zwischen pH-Wert und

Kohlendioxidgehalt nach MOORE (1939, in COLE 1983). Die Gesamthärte und die Carbonathärte wurden durch die Titrationsmethode nach AQUAMERCK (8039 für Gesamthärte und 8048 für Carbonathärte) bestimmt. Die Stickstoffspezies, Orthophosphat, Eisen und Chlorid, wurden durch Spektralphotometrie (PU 8620 Series, UV/Visible Spectrophotometer Philips, Scientific & Analytical Equipment) mit dem Reagenziensatz von Merck-Spektroquant ermittelt. Dazu wurde eine Quarzküvette von 1 cm Breite benutzt. In Tab. 2 sind die Methoden, die Geräte und die Einheiten für die chemischen Variablen aufgelistet.

Tab. 2. Methoden für die chemischen Variablen.

Variablen	Einheiten	Methoden	Bemerkungen
Sauerstoff	mg/l	elektronisch	WTW- Meßkette
Sauerstoffsättigung	%	elektronisch	WTW- Meßkette
pH	Einheiten	potentiometrisch	RICHLY (1992)
Kohlendioxid	mg/l	Titration	SCHWOERBEL (1994)
Alkalinität	mEq/l	numerisch	MOORE (1939)
Gesamthärte	°dH	kolorimetrisch	Aquamerck 8039
Carbonathärte	°dH	kolorimetrisch	Aquamerck 8048
Gelöster Stickstoff	mg/l	numerisch	APHA, AWWA (1989)
Nitrat	mg/l	Photometrie	Spectroquant 14773
Nitrit	mg/l	Photometrie	Spectroquant 14776
Ammonium	mg/l	Photometrie	Spectroquant 14752
Ortophosphat	mg/l	Photometrie	Spectroquant 14848
Eisen	mg/l	Photometrie	Spectroquant 14761
Chlorid	mg/l	Photometrie	Spectroquant 14755

3.3 Biologische Variablen

Es wurden folgende biologische Variablen gemessen: Chlorophyll-a, Primärproduktion, Phytoplanktondichte und Zooplanktondichte.
Der Chlorophyll-a-Gehalt wurde in drei Tiefen gemessen, in jeder Tiefe wurden 500 ml Wasser entnommen. Die Proben wurden in einem Thermobehälter zum Labor transportiert. Im Labor wurden die Proben durch einen Zellulose Millipore Filter von 0,45 µm Porengröße filtriert. Es wurden abhängig von der Algendichte zwischen 50 und 150 ml Wasser filtriert, danach wurde jeder Filter in 10 ml einer Methanol-Aceton-Lösung (1:1) in dunkle Gefäße gegeben. Die Gefäße wurden 24 Stunden in Dunkelheit bei 5°C gelassen. Dann wurde der Extrakt für 10 Minuten bei 3000 RPM zentrifugiert. Die Proben wurden während der gesamten Untersuchungszeit vor Licht geschützt. Die Chlorophyll-a-Konzentration wurde durch Spektralphotometrie bei 665 nm und 750 nm in einer Quarzküvette von 1 cm Breite gemessen. Für die Korrektur der Pheopigmente wurde ein Tropfen HCl Lösung (4N) in jeden Extrakt eingefüllt und danach noch einmal die Absorption gemessen. Die Chlorophyll-a-Konzentration wurde nach folgender Gleichung für monochromatisches Licht (nach TALLING & DRIVER 1963) bestimmt:

$$\mu g/l \text{ Chlorophyll-a} = [11{,}9(A_{665v}-A_{665d})-(A_{750v}-A_{750d})*v] / V*Z$$

A_{665v}= Absorption 665 nm vor der Ansäuerung des Extraktes
A_{665d}= Absorption 665 nm nach der Ansäuerung des Extraktes
A_{750v}= Absorption 750 nm vor der Ansäuerung des Extraktes
A_{750d}= Absorption 750 nm nach der Ansäuerung des Extraktes
v= Volumen des Extraktes in Milliliter
V= Filtriertes Volumen in Liter
Z= Breite der Quarzküvette in Zentimetern

Die Primärproduktion wurde durch die Sauerstoffmethode nach GAARDER & GRAN´S (1927) bestimmt. An jeder Probestelle wurde eine Halterung (Abb. 4) von einer Boje aus an einem Seil exponiert. An jeder Probestelle wurden vier Winklerflaschen 10 cm unter der

Oberfläche inkubiert. Die Flaschen, zwei mit Alufolie verkleidete Dunkelflaschen und zwei Hellflaschen, hatten jeweils eine genau definierte Aufnahmemenge zwischen 117 ml und 120 ml. Die Initialsauerstoffkonzentration wurde in einer weiteren Flasche (Nullflasche) gemessen.

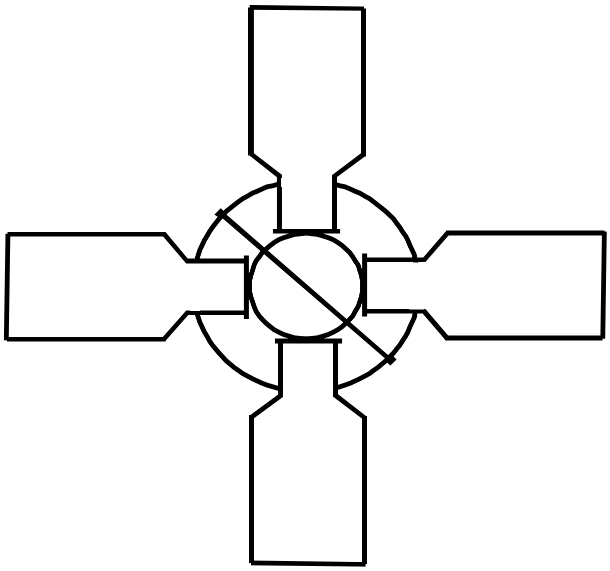

Abb. 4. Winklerflaschen-Halterung für die Messung der Primärproduktion.

Die Inkubation wurde zwischen 11 Uhr und 16 Uhr durchgeführt, die Inkubationzeit betrug bei hoher Primärproduktion zwei Stunden und bei niedriger Primärproduktion vier Stunden. Am Ende der Inkubation wurde in jeder Probe der Sauerstoffgehalt mit den Reagenzien nach WETZEL & LIKENS (1991) und SCHWOERBEL (1994) fixiert. Die Proben wurden zum Labor transportiert und anschließend nach der Winklermethode (WINKLER 1888, IN WETZEL & LIKENS 1991) titriert. Für die Bestimmung der Bruttoprimärproduktion (BPP), der Nettoprimärproduktion (NPP) und der Atmung (A) wurden die folgenden Gleichungen nach WETZEL & LIKENS (1991) verwendet:

$$BPP\ (mg\ Cm^{-3}\ h^{-1}) = [(F_3-F_2)*0.313 * 1000]/\ t*PQ$$

$$NPP\ (mg\ Cm^{-3}\ h^{-1}) = [(F_3-F_1)*0.313 * 1000]/\ t*PQ$$

$$A\ (mg\ Cm^{-3}\ h^{-1}) = [(F_1-F_2)*RQ*0.313 * 1000]/\ t*PQ$$

wobei:

F_1= Sauerstoffkonzentration zu Beginn der Inkubationsperiode (Nullflasche)
F_2= Sauerstoffkonzentration aus dem Mittelwert der zwei Dunkelflaschen
F_3= Sauerstoffkonzentration aus dem Mittelwert der zwei Hellflaschen
0,313= Molarrelation zwischen O_2/CO_2 nach COLE (1983)
PQ= Photosynthetischer Quotient 1,2 nach COLE (1983)
RQ= Atmungsquotient 1
t= Inkubationszeit in Stunden
PQ und RQ sind dimensionslos. Die Methode hat eine Präzision von 0,02 mg/l (WETZEL & LIKENS 1991).

Es wurden die Phytoplankton- und die Zooplanktongemeinschaften untersucht. Für die Phytoplanktonproben wurde ein Phytoplanktonnetz mit 10 µm Maschenweite bei 15 cm Durchmesser der Netzöffnung und 50 cm Netzlänge benutzt, das Zooplanktonnetz hatte eine Maschenweite von 100 µm, bei 22 cm Durchmesser der Netzöffnung und 45 cm Netzlänge. Es wurden für jede Gemeinschaft drei Formen der Probennahme durchgeführt: qualitative Probennahmen, quantitative Probennahmen und jeweils ein quantitativer Tagesgang.
Qualitative Probennahme: Jeden Monat wurde in jedem See eine qualitative Probe auf der gesamten Strecke zwischen Probestelle 1 und Probestelle 2 genommen. Dazu wurde das Netz bei niedriger Geschwindigkeit des Bootes seitlich vor dem Boot in einer Tiefe von 20 cm unter der Oberfläche durch das Wasser geschleppt. Dadurch wurde verhindert, daß das Plankton im Turbulenzbereich des Bootes gefangen wurde. Insgesamt wurden in beiden Seen 16 Phytoplanktonproben und 16 Zooplanktonproben genommen.

Quantitative Probennahme: Es wurden jeden Monat an allen Probestellen und in drei Tiefen jeweils fünf Liter Wasser mit der Ruttnerflasche entnommen und das Wasser durch die entsprechenden Netze filtriert. Insgesamt wurden in beiden Seen 96 Phytoplanktonproben und 96 Zooplanktonproben genommen.
Quantitative Tagesgänge: Im Monat August wurden einen Tag lang, alle vier Stunden an Probestelle 2 des jeweiligen Sees in drei verschiedenen Wassertiefen jeweils fünf Liter Wasser mit der Ruttnerflasche entnommen und das Wasser durch das entsprechende Netz filtriert. In diesem Tagesgang wurde zusätzlich alle zwei Stunden die Variation von Wassertemperatur, Sauerstoffkonzentration, Sauerstoffsättigung und pH-Wert in Abhängigkeit von der Tiefe untersucht. Insgesamt wurden hierfür in beiden Seen 32 Phytoplanktonproben und 32 Zooplanktonproben genommen.
Die Phytoplanktonproben wurden mit Lugol'scher Lösung nach SCHWOERBEL (1994) und die Zooplanktonproben mit 30%iger Formaldehydlösung nach SCHWOERBEL (1994) fixiert und konserviert. Die Proben wurden in einem Kühlraum bei 5°C gelagert.
Die Bestimmung der Organismen wurde in den meisten Fällen bis zum Artniveau durchgeführt. Einige Arten wurden mit Hilfe von Spezialisten bestimmt.
Für das Phytoplankton wurde folgende Bestimmungliteratur benutzt: KRIEGERT & GERLOFF (1965); FOTT (1969); BOURRELLY (1966, 1968, 1985); PRESCOTT et al. (1982); SMOL et al. (1986); STREBEL & KRAUTER (1988); PANKOW (1990); LUND & LUND (1996); MAUCH (1997); Das Phytoplankton des Süßwasser (Hrsg. HUBER-PESTALOZZI): Band XVI Teil 1 Blaualgen (1938), Band XVI Teil 2, 1. Hälfte Chrysophyceae (1976), Band XVI Teil 4 Euglenophyceae (1955), Band XVI Teil 5 Chlorophyceae (1961), Band XVI Teil 7, 1. Hälfte Chlorophyceae (1983); Süßwasserflora von Mitteleuropa (ETTL et al. Hrsg.) Bände: 1 Chrysophyceae und Haptopyceae (1985), 2/1 Bacillariophyceae (Naviculaceae) (1997), 2/2 Bacillariophyceae (Epithemiaceae, Bacillariaceae, Surirellaceae) (1997), 2/3 Bacillariophyceae (Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae) (1991), 2/4 Bacillariophyceae (Achnanthaceae) (1991), 6 Dinophyceae (Dinoflagellida) (1990), 9 Chlorophyta I (Phytomonadina) (1983), 10 Chlorophyta II (Tetrasporales, Chlorococcales, Gloeodendrales) (1988), 14 Chlorophyta VI (Oedogoniophyceae: Oedogoniales) (1985), 16 Chlorophyta VIII (Conjugatophyceae I: Zignemales) (1984).

Für das Zooplankton wurde folgende Bestimmungliteratur benutzt: VOIGT (1957); FLÖßNER (1972); DONNER (1973); TEROFAL (1984); MARGARITORA (1985); POURRIOT & FRANCEK (1986); HAUSMANN & PATTERSON (1987); STREBEL & KRAUTER (1988); BELLMANN (1988); FOISSNER et al.(1994); Süßwasserfauna von Mitteleuropa (SCHWOERBEL & ZWICK. Hrsg.), Crustacea-Copepoda (1993), Crustacea-Cladocera (1996); KRAUSE-DELLIN (1997); PATTERSON (1998).

Für die Bestimmung der Arten und deren Zeichnung wurde ein Lichtmikroskop (Leitz Wetzlar Dialux bis 1250-fache Vergrößerung) mit einem Mikrometerokular und einem Zeichentubus benutzt. Zur Bearbeitung der Diatomophyceen wurden die Proben mit Wasserstoffperoxid gereinigt und dann in Kanadabalsam permanent fixiert.

Die Zählung der Proben wurde mit einem umgekehrten Mikroskop (Leitz Wetzlar Diavert) durchgeführt. Für das Phytoplankton wurde eine Planktonkammer eines Volumens von 0,3 ml benutzt; für jede Probe wurde die Arten-Sättigungskurve gezeichnet. Für das Zooplankton wurde eine Planktonkammer von 1 ml Volumen benutzt; für jede Probe wurde die Gesamtheit der Organismen gezählt.

Die Individuenzahl pro Volumen wurde für das Phytoplankton nach ROSS (1979) wie folgt errechnet:

$$\text{Individuen/ml} = [n/sc)] * [1/h] * F$$

wobei:

n= Individuenzahl

s= Oberfläche des Mikroskopfeldes, für das umgekehrte Mikroskop = 0,22902 mm^2

c= Anzahl der Felder (nach Sättigung der Artenkurve)

h= Höhe der Kammer = 1 mm

F= Korrekturfaktor ($10^3\ mm^3\ ml^{-1}$)

Weil für jede Probe 5 Liter Wasser filtriert wurden, mußten die Werte für das Phytoplankton in Individuen/ml und für das Zooplankton in Individuen/100 ml transformiert werden. In Tab. 3 sind die Methoden, die Geräte und die Einheiten für die biologischen Variablen aufgeführt.

Tab. 3. Methoden für die biologischen Variablen.

Variablen	Einheiten	Methoden	Bemerkungen
Chlorophyll-a	µg/l	Photometrie	TALLING & DRIVER 1963
Primärproduktion	mg C m^{-3} h^{-1}	Winkler	GAARDER & GRAN´S 1927
Phytoplankton	Ind. /ml	Volumetrie	ROSS 1979
Zooplankton	Ind. /100ml	Volumetrie	Gesamtzahl

Die Planktonsukzession der Planktongruppen im Jahresverlauf wurde anhand die Gesamtzahl der Individuen ermittelt. Weiterhin wurde die Sukzession für die fünf häufigsten Planktonarten untersucht. Diese fünf Arten machten mindestens 70% des Phytoplanktons bzw. des Zooplanktons.

3.4 Mathematische Methoden

Beschreibende Statistik: Für alle Variablen wurden der Mittelwert als Lageparameter, die Standardabweichung und der Variationskoeffizient als Streuungsmaß errechnet. Die Prüfung der Voraussetzungen wurde durch Unabhängigkeit, Zufälligkeit, Normalverteilung und Varianzhomogenität getestet.
Varianzanalyse: Zur Korrelationsanalyse zwischen Variablen wurden der Pearson-Maßkorrelationskoeffizient r (Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient) und das Bestimmtheitsmaß r^2 berechnet (SOKAL & ROHLF 1981, STEEL & TORRIE 1985, KÖHLER et al. 1996).
Struktur der Planktongemeinschaften: Für das Phytoplankton und das Zooplankton wurden für jeden See und jeden Monat, die folgenden Indizes berechnet: Artenabundanz (Artenzahl in jedem Monat), spezifische Diversität (SHANNON & WEAVER 1948) im folgendem als Diversität bezeichnet, Evenness zur Diversität (PIELOU 1969) und spezifischer Dominanzgrad (SIMPSON 1949).

Clusteranalyse: Es wurde eine Clusteranalyse für die Planktongruppen und die abundanten Arten in jedem See durchgeführt. Als Bezugskriterium wurde die Zeit genommen. Die Dichte des Planktons wurde durch die Formel ln(X+1) umgewandelt. Die Distanzmatrix wurde mit der Euklidischen Distanz konstruiert. Danach wurden die Daten in Dendrogrammen organisiert. Eine single linkage <40 wurde als Kriterium für die Koexitenz, das zeitgleiche Auftreten von Arten im Ökosystem, gewertet.

Für die beschreibende Statistik, die Varianzanalyse, die Struktur der Planktongemeinschaften und die Clusteranalyse wurden die Computerprogramme Excel Version 7.0 für Windows 95 und Statistica Version 5.0 (1995) benutzt.