

# **Toxine der Cyanobakterien im Aasee**

*erstellt*

*im Dezember 2001*

im Auftrage der Stadt Münster, Umweltamt

durch

Prof. Dr. Bernhard Surholt  
Otto-Hue-Str. 15, 48249 Dülmen

in Zusammenarbeit mit  
Priv.-Doz. Dr. Werner Mathys  
Dipl.-Ing. Anni Bommer  
und den Mitarbeitern des  
Labors für Wasseranalytik des  
Institutes für Hygiene des Universitätsklinikums Münster

## Inhalt

	Seite
<b>Einleitung</b>	3
Problemstellung	3
Die Entwicklung von Cyanobakterien im Aasee in den letzten beiden Jahrzehnten	11
<b>Die Untersuchungen des Jahres 2001</b>	12
<b>Kap. I. Das Vorkommen von Cyanobakterien und deren Toxine im Aasee</b>	12
Ia Cyanobakterien im Aasee im Untersuchungszeitraum 2001	15
Ib Toxine der Cyanobakterien und deren Konzentrationen im Wasser des Aasees	19
Ib1 Cyanobakterien-Toxine im Aasee	19
Ib2 Konzentrationen an Cyanobakterien-Toxinen im Aasee	20
<i>Zusammenfassung</i> der Ergebnisse der Toxin-Analysen des Jahres 2001	27
Einschub: Konzentrationen in Proben des Jahres 2000	27
Ib3 Gesundheits-Gefährdung durch die Cyanobakterien-Toxine im Aasee	29
Ib4 Ermittlung/Abschätzung der Gesundheits-Risiken	30
<i>Zusammenfassung</i> : Einstufung der Risiken einer Gesundheitsgefährdung	34
<b>Kap. II Physiko-chemische Begleituntersuchungen des Aasees 2001</b>	38
IIa Physiko-chemische Kenngrößen des Aasees (Juli-Oktober 2001)	38
IIb „Umkippen“ des Aasees Ende August-Anfang September 2001	42
IIc Das massive Auftreten von Cyanobakterien im Aasee und die Rolle der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Gewässers	46
IId Die physiko-chemischen Eigenschaften, die die Bildung von Toxinen in den Cyanobakterien des Aasees fördern	47
<b>Literatur</b>	48
<b>Anhang:</b> Graphische Darstellungen der Befunde, Ergebnisse (Daten) der Gewässeranalysen und die Befunde der Planktonuntersuchungen	

## Einleitung

Cyanobakterien, früher Blaualgen genannt, sind nur wenige Mikrometer große, einzellige Organismen, die weltweit verbreitet hauptsächlich in Gewässern leben. Die meisten Arten sind natürliche Bestandteile von Gewässerökosystemen, d.h. sie finden sich suspendiert im Wasser als Bestandteil des Planktons, andere leben benthisch, d.h. sie wachsen auf bestimmten Unterlagen (z.B. auf Felsen) oder direkt auf den Sedimenten des Gewässerbodens. Einige Arten sind in der Lage, sich zeitweise in Form von Filamenten zusammenzulagern oder z.T. sehr große und mehr oder weniger kompakte Kolonien zu bilden. Viele Arten umgeben sich mit einer Gallerte. Da sie keinen Zellkern besitzen, gehören sie zusammen mit den Bakterien zu den Prokaryonten, nicht zu den Algen. (Algen besitzen richtige Zellkerne und sind damit Eukaryonten.) Da auch ihre anderen Zellstrukturen weitestgehend denen der Bakterien entsprechen, werden sie seit einigen Jahren nicht mehr Blaualgen sondern Cyanobakterien genannt. Von den Bakterien unterscheiden sie sich aber durch ihre Fähigkeit zur Photosynthese und ihre Ausstattung mit komplexen Pigmentsystemen.

Schon sehr lange ist bekannt, dass viele Cyanobakterien-Arten in ihren Zellen ganz spezielle Giftstoffe produzieren, die sogenannten Cyanotoxine. Offensichtlich verschafft der Besitz der Toxine diesen Organismen in ihrem Konkurrenzkampf im Gefüge der diversen Gewässerökosysteme Vorteile. Dieses Faktum hat bis vor wenigen Jahren offensichtlich keine negativen Auswirkungen auf Menschen und Tiere gehabt, die Oberflächengewässer nutzten, mindestens nicht in unseren Breiten. Im Plankton der meisten Gewässer waren Cyanobakterien zahlenmäßig nur untergeordnet zu finden. Von sogenannten Wasser-Blüten dieser Arten wurde in Mitteleuropa so gut wie nie berichtet.

Zahlreiche Berichte aus jüngster Zeit über Massenentwicklungen von Cyanobakterien in unseren Binnengewässern legen aber nahe, dass sich die Situation inzwischen sehr stark geändert hat. Offensichtlich hat die nun schon über 3-4 Jahrzehnte andauernde und entgegen allen anderslautenden Berichten auch heute nicht reduzierte künstliche Überdüngung der Gewässer die entscheidende Grundlage dafür geschaffen, dass es immer wieder zu Massenentwicklungen von Cyanobakterien kommt. Kommen dann auch noch weitere Faktoren hinzu, kann die Entwicklung soweit gehen, dass im Gewässer nicht nur alles andere Phytoplankton nahezu vollständig verdrängt wird, sondern dass im Hoch- und Spätsommer in manchen Gewässern die Bestandsdichte dieser Bakterien so hoch wird, dass in bestimmten Bereichen das Wasser Erbsensuppen-artige Konsistenz annimmt (vgl. Chorus, 1998).

## Problemstellung

Im Zusammenhang der hier anstehenden Fragestellung bedeutet dies: Während human-pathogene Bakterien und andere Erreger in der Regel über Abwässer, Eintrag tierischer Fäkalien oder Kadaver in die Gewässer gelangen und sich hier nicht oder nur sehr selten vermehren, leben und vermehren sich Cyanobakterien als natürliche Mitglieder der Gewässerökosysteme hier entsprechend der jeweiligen Gegebenheiten. Erst bei bestimmten extremen Veränderungen kann das jeweilige aquatische Ökosystems so aus dem Gleichgewicht geraten, dass Massenvermehrung dieser Organismen die Folge ist und damit oft auch vermehrte Produktion von Cyanotoxinen. Für diese Toxine gilt, während es sich bei Gewässervergiftungen durch andere Toxine meist um im freien Wasser gelöste Stoffe handelt, findet sich die Hauptmenge der Cyanotoxine in den Zellen der Cyanobakterien (ist also zellgebunden). Nur bei plötzlichem Absterben von Cyanobakterien-Blüten gelangen die Toxine in großen Mengen frei gelöst ins Wasser.



**Foto 1:** Auftreiben von Cyanobakterien zur Wasseroberfläche mit Schlieren-/Schleier-Bildung zwischen den ankernden Tretbooten im Hafen Overschmidt des Aasees in Münster am Morgen des 3. September 2001.

(Aufnahme: H. Keckevoet).

© Institut für Hygiene UKM Surholt, Mathys

Dass die Cyanotoxine vorwiegend zell-gebunden vorliegen, hat entscheidende Konsequenzen für deren Verteilung im Wasserkörper und die dabei auftretenden Toxin-Konzentrationen.

1. Eine Reihe von Cyanotoxine-produzierende Arten kommen immer nur als Einzelorganismen gleichmäßig verteilt im Wasserkörper vor (Beispiele *Planktothrix agardhii* und *P. rufescens*). Vor allem *P. agardhii* kann dabei sehr hohe Zelldichten erreichen und die Zellen können dabei Höchstkonzentrationen von Toxinen enthalten. Gemessen wurden in deutschen Gewässern dabei bis über 5 mg Microcystine pro g Trockengewicht bzw. bis ca. 350 µg Toxine pro Liter (Fastner et al., 1999).

2. Andere Cyanobakterien, zu denen die wichtigsten der im Aasee vorkommenden Arten aus den Gattungen *Microcystis*, *Aphanizomenon* und *Anabaena* gehören, können individuell ihren Auftrieb ändern. Sie besitzen in ihren Zellen Gasvakuolen, deren Größe sie aktiv variieren können. So steigen sie in der Wassersäule auf und ab und schichten sich dort ein, wo für sie die Nährstoffkonzentrationen und vor allem die Lichtintensität und Lichtqualität optimal sind, bei hohem Trübungsgrad des Wassers z.B. in der Schicht direkt unter der Wasseroberfläche.

Allerdings brauchen die Zellen für die Änderung der Größe ihrer Vakuolen eine gewisse Zeit. Ändern sich bestimmte Eigenschaften (Dichte, Temperatur etc.) des umgebenden Wassers zu schnell, hat dies dann zur Folge, dass diese Cyanobakterien in großen Mengen bis direkt an die Wasseroberfläche auftreiben und dort wie dichte grüne Schleier oder Schlieren hängen (vgl. Foto 1 u. 2). Sie können dabei sogar auf die Wasseroberfläche gelangen, sich dort zu mehreren Millimeter großen Gebilden zusammenballen (Foto 3) und als Aufrahmungen oder Schäume aufschichten. Schon durch eine leichte Brise werden diese dann in Buchten oder bestimmten Uferbereichen geschoben und bilden dort z.T. Zentimeter-dicke, geschlossene Lagen, die eine dickflüssige bis gallertartige Konsistenz annehmen können, mit z.T. ölschicht-artig glänzender Oberfläche (s. Foto 4).

Aktives Auftreiben der Zellen bzw. Kolonien und vor allem dann das Aufrahmen auf der Wasseroberfläche und das Verdriften und Zusammenschieben in bestimmte Uferbereiche führen natürlich zu einem ganz extremen Aufkonzentrieren der zell-gebundenen Toxine in diesen Gewässerbereichen. Konzentrierungsfaktoren von mehr als 1000 wurden dabei gemessen. In Gewässern mit ansonsten vielleicht noch tolerierbaren Toxinkonzentrationen können so innerhalb ganz kurzer Zeit (Stunden) Bereiche entstehen, wo das Oberflächenwasser und die aufschwimmenden Lagen hochgradig toxisch für Menschen und Tiere sein können. Gefunden wurden solche Situationen z.B. 1997 entlang der Havel in Berlin, wo Aufschäumungen beobachtet wurden, in denen Toxin-Konzentrationen bis in den Bereich von „einige Milligramm pro Liter“ gemessen wurden (Chorus, 2000). Kommen Menschen oder Tiere mit solchen Wässern in Kontakt, dürfte dies eine äußerst ernst zu nehmende Gesundheitsgefährdung darstellen.

Worin besteht die Gesundheitsgefährdung durch Cyanotoxine? Hinsichtlich ihrer akuten und chronischen Wirkungen liegen bereits eine ganze Reihe gesicherte Erkenntnisse vor, ebenfalls hinsichtlich ihrer chemischen Struktur. Zur Zeit werden sie deshalb in vier Stoffgruppen eingeteilt. Ihr Vorkommen in den unterschiedlichen Gattungen der Cyanobakterien kann Tabelle 1. entnommen werden.

1. Microcystine und (im Brackwasserbereich) Nodularine: Dies sind chemisch sehr stabile zyklische Peptide, die eine Aminosäure („ADDA“) enthalten, die nur aus diesen Verbindungen bekannt ist. Vom Microcystin sind über 60 Strukturvarianten mit





**Foto 2:** „Wolken“ von zur Oberfläche auftreibenden Cyanobakterien entlang eines im Hafen Overschmidt (Aasee in Münster) ankernden Bootes; aufgenommen am Mittag des 3. September 2001.

(Aufnahme: H. Keckevoet).

© Institut für Hygiene UKM Surholt, Mathys

Tabelle 1: Cyanobakterien-Toxine und ihre akute Toxizität



**Foto 3:** Auf der Wasseroberfläche des Münsterschen Aasees treibende, von Cyanobakterien gebildete Konglomerate; Bereich Torminbrücke, Ostseite, am Morgen des 31. August 2001; das größte Gebilde hat eine Länge von ca. 1,2 - 1,5 cm.

(Aufnahme: B. Surholt).

© Institut für Hygiene UKM Surholt, Mathys



unterschiedlich starker Toxizität bekannt, einige davon mit extrem hoher Giftigkeit (Beispiel Microcystin-LR). Wie Nodularin sind sie für Leberzellen akut giftig, weshalb beide als Hepatotoxine bezeichnet werden. Die Leberzellen besitzen in ihren Zellmembranen (wie im übrigen auch die Dünndarmzellen) ein besonderes Transportsystem, das gezielt und aktiv Gallensäuren aus dem Blut in die Leberzellen befördert. Dieses Transport-System verwechselt offensichtlich Microcystine mit Gallensäuren und so gelangen auch kleinste Mengen dieser Toxine aus dem Blut in die Leberzellen. In der Zelle angekommen, blockieren sie irreversibel deren Energie- und Baustoffwechsel. Die Zelle stirbt ab. Übersteigt die so verursachte Absterberate von Leberzellen die Rate der Neubildung von Zellen, so stirbt die gesamte Leber ab und nach kurzer Zeit dann der gesamte Organismus. Neben dieser akuten Toxizität haben Microcystine aber noch besorgniserregende chronische und kumulative Wirkungen, wenn sie über längere Zeit in niedrigeren, nicht-akut-toxischen Dosen in den Körper gelangen. So kam es in entsprechenden Tierversuchen zu starkem Anschwellen der Leber und deutlicher Schädigung des Organs. Des weiteren gelten sie inzwischen als „Tumor-Promoter“. Das bedeutet, sie wirken zwar nicht krebsauslösend, fördern jedoch sehr stark das Wachstum von bereits anderweitig initiierten Krebszellen.

2. Neurotoxine: Bislang sind aus diversen Cyanobakterien-Arten drei verschiedene Neurotoxine bekannt. Sie sind ebenfalls hochtoxisch und wirken akut, indem sie die Weiterleitung von Nervenimpulsen blockieren (so kann es z.B. bei genügend hoher Dosierung von Anatoxin-a zu Atemstillstand kommen). Hinweise auf chronische Toxizität liegen für diese Toxine bislang nicht vor, weshalb das Risiko einer Gesundheitsgefährdung von Menschen bei Kontakt mit Wasser hier als geringer als bei den Microcystinen eingestuft wird.
3. Cylindrospermopsis: Dies ist ein Zellgift, das die Eiweißsynthese blockiert und deshalb besonders stark auf Organe wirkt, deren Zellen sich permanent stark vermehren müssen (Beispiele: Leber, Niere). Eine Cyanobakterien-Art, die dieses Toxin bildet (nämlich *Cylindrospermopsis raciborskii*) galt bislang als subtropische Art. Neuere Untersuchungen zeigen aber, dass sie inzwischen bis nach Mitteleuropa und auch nach Norddeutschland vorgedrungen ist (Chorus et al., 2001).
4. Lipopolysaccharide (nicht in Tab. 1 enthalten): Diese Substanzen sind Bestandteile der Zellwände aller Cyano-bakterien-Arten. Sie gelten als Auslöser der häufig beobachteten Reizwirkungen von Cyanobakterien auf die Haut und vor allem auf Schleimhäute.

Anzumerken bleibt hier, dass insgesamt noch ein großes Wissensdefizit bezüglich der aufgeführten Toxine besteht und dass Cyanobakterien darüber hinaus weitere Stoffe mit starken toxischen Wirkungen besitzen, Stoffe, die nicht zu den bereits bekannten Cyanotoxinen gehören. Es kann auch zu kumulativen Wirkungen der verschiedenen Gifte kommen.

Insgesamt gesehen sind bislang von allen Cyanobakterien-Toxine nur einige Microcystine in ihrer Wirkung so gut untersucht, dass sie die Ableitung eines vorläufigen Grenzwertes zulassen, der eine Konzentration angibt, bis zu dem z. Zt. das Risiko einer Gesundheitsgefährdung für vernachlässigbar gering gehalten wird. Die WHO hat 1998 diesen mit  $1 \mu\text{g}$  Microcystin-LR pro Liter Trinkwasser publiziert. Dieser Grenzwert basiert auf einem zuvor ermittelten, für akzeptabel gehaltenen Wertes von  $0,04 \mu\text{g}$  pro kg Körpergewicht für die tägliche Aufnahme von Microcystin.



**Foto 4:** Geschlossene Schicht einer Cyanobakterien-Aufräumung auf der Wasseroberfläche des Aasees. Diese war vom Südwest-Wind im Bereich vor den Aasee-Treppen und Mauern zu einem mehrere Meter breiten Ufersaum zusammengeschoben worden; aufgenommen am späten Vormittag des 1. September 2001.

Aufnahme: B. Surholt).

© Institut für Hygiene UKM Surholt, Mathys

Zwar wurde in jüngster Zeit bereits deutlich vor den von Cyanobakterien und deren Toxinen ausgehenden Gefahren gewarnt (vgl. z. B. Bundesgesundheitsblatt 7, 261- 264, 1997 oder die später noch zu zitierende Publikation der WHO von 1999), man weiß über diese Gefahren, vor allem über ihr Ausmaß in konkreten Fällen, bislang aber noch verhältnismäßig wenig. Hierfür gibt es eine Reihe von Gründen:

1. Starkes Auftreten von Cyanobakterien fand bis vor einigen Jahren in Binnengewässern unserer Breiten nur selten und meist nur über relativ kurze Zeiträume statt. Cyanobakterien und ihre Toxine stehen also erst seit kurzer Zeit als Schwerpunkt entsprechender Forschung an.
2. Die Aufklärung der sehr komplexen chemischen Strukturen dieser Toxine liegt somit erst wenige Jahre zurück. Einige dieser Toxine, z.B. einige Neurotoxine, sind zudem chemisch relativ instabil.
3. Diese Toxine treten z.T. in einer enorm großen chemischen Strukturvielfalt auf. Insbesondere trifft dies für das besonders wichtige und häufig auftretende Microcystin zu. Dies ist im chemischen Grundkörper ein zyklisches Heptapeptid, das im Gegensatz zu den oben erwähnten Neurotoxinen biologisch-chemisch sehr stabil und ein extrem wirkungsvolles Hepatotoxin (Lebergift) ist. Von diesem Microcystin sind über 60 chemische Derivate (Varianten) bekannt.
4. Cyanobakterien-Toxine sind extrem giftig, weshalb sie in die Liste der biologisch-chemischen Kampfstoffe aufgenommen wurden. Dies hat zur Folge, dass ihre Verfügbarkeit auch für den analysierenden Chemiker enorm eingeschränkt ist. An chemisch reine Einzelsubstanzen dieser Toxine zu kommen, ist aber die entscheidende Voraussetzung für den Aufbau einer gesicherten Analytik. (So ist es uns trotz weltweiten Suchens nach Quellen für den Bezug von Microcystinen als Eichsubstanzen lediglich gelungen, fünf der über 60 verschiedenen Microcystine als Referenzsubstanzen für die Identifizierung und Standardisierung/Eichung unserer Analytik zu bekommen).
5. Die Analytik ist technisch und zeitlich sehr aufwendig. Wegen der enormen Giftigkeit sind bei Analysen dieser Stoffe zudem höchste Sicherheitsvorkehrungen zu treffen. Vor allem Rohextrakte aus den Bakterien, die Gemische von diversen Microcystinen enthalten, gelten als extrem giftig. Für die Analytik ist es aber notwendig, konzentrierte Rohextrakte herzustellen und diese danach sogar bis zur Pulverform zu gefriertrocknen.

### **Die Entwicklung von Cyanobakterien im Aasee in den letzten beiden Jahrzehnten**

Der Aasee in Münster ist seit vielen Jahren als hypertrophes Gewässer einzustufen. Dies belegen die Ergebnisse einer ganzen Reihe von limnologischen Untersuchungen, die über die letzten zwei Jahrzehnte hin durchgeführt wurden. Schon die Untersuchungen vor 10 bzw. 20 Jahren zeigten, dass der See das ganze Jahr über mit viel zu großen Mengen an Pflanzennährstoffen (Nitraten, Phosphaten, organischen Verbindungen) befrachtet wird und dass dies vorrangig über die einmündenden Fließgewässer erfolgt. Die Untersuchungen der Jahre 1992-1994 zeigten, dass die Hauptmengen (ca. 80 %) über die Aa kamen. Die nächst größere Menge lieferte der Meckelbach, wobei das Klärwerk Roxel als eine punktuelle Belastungsquelle auszumachen war. Vor allem in den Sommern 1993 und 1994 wurde bereits vermehrt, z.T. starkes Auftreten von Cyanobakterien im Plankton des Aasees gefunden.



Nachdem 1997 das Klärwerk Roxel außer Betrieb genommen und inzwischen der Bereich der Aa zwischen Haus Kump und dem neuen Aasee aufwendig renaturiert worden war, wurden im Jahre 2000 umfangreiche Untersuchungen an Aa und Aasee durchgeführt, um die aktuelle Situation des Aasees einige Jahre nach Abschluss dieser Maßnahmen zu ermitteln.

Wichtigster Befund war: Die Nährstoffsituation in Aa, im renaturierten Aa-Abschnitt und im Aasee selbst hatte sich nicht verbessert. Die Befunde zeigten eher eine weitere Verschlechterung an. Die über die Aa und den Meckelbach einströmenden Nährstoffmengen waren höher als in den Jahren 1992-1994. Die Befunde der gewässer-chemischen Analysen belegten, die trophische Situation des Sees selbst hatte sich noch gesteigert. Dass die biologische Produktivität im See noch höher geworden war, zeigte sich allein schon an den im Vergleich zu 1993 und 1994 noch geringer gewordenen Sichttiefen. Von August bis weit in den September wurden wiederholt extrem niedrige Werte von 20 cm und weniger gemessen.

Im Aasee kam es dabei im Sommer 2000 nicht nur durchgängig zu intensivem Wachstum planktischer Grünalgen mit Ausbildungen ausgeprägter Massenblüten dieser Algen, im Hoch- und Spätsommer kam es darüber hinaus zu einem alles dominierenden Auftreten von Cyanobakterien im Wasserkörper. Ende August/Anfang September vermehrten sie sich explosionsartig und es kam zum Aufrahmen dieser Bakterien. Bis weit in den Herbst hinein bildeten sich wiederholt Schlieren im Wasser und blaugrüne Schichten auf der Wasseroberfläche des Sees.

Ein weiterer Typ intensiven Wachstums von Cyanobakterien wurde im Jahre 2000 erstmals beobachtet: Von Herbst 2000 bis Februar 2001 wuchsen auf dem Boden des renaturierten Bereichs der Aa, zeitweise flächendeckend, mehrere Zentimeter hohe Rasen aus fädigen Cyanobakterien. Aus diesen lösten sich dann immer wieder mehrere Zentimeter große, schwammartige Konglomerate und trieben in großen Mengen im oder auf dem Wasser Richtung neuem Aasee. Dabei kam es u.a. im Hafen des Hansa-Clubs zu massiver Ansammlung dieser Gebilde mit übler Geruchsbelästigung (vgl. dazu den Bericht über unsere diesbezüglichen Untersuchungen mit dem Titel *„Erfassung, Bestimmung und Analyse des Phyto- und Zooplanktons des Aasees“*, vorgelegt Dezember 2000).

Die wichtigsten Ursachen für das starke Auftreten der Cyanobakterien im Aasee konnten die oben bereits erwähnten, parallel durchgeführten limnologischen (gewässer-chemischen und gewässer-physikalischen) Untersuchungen benennen (vgl. u.a. den Bericht *„Die Nährstoffsituation in der renaturierten Aa und im Aasee“* aus dem Jahre 2000/01).

Die Untersuchungsprogramme des Jahres 2000 schlossen aber eine qualitative und quantitative Analyse der Cyanobakterien-Toxine nicht ein, lediglich ein Probennehmen und das Aufarbeiten und Konservieren der Proben für später geplante Toxinanalysen.

## **Die Untersuchungen des Jahres 2001**

### **Kap. I: Das Vorkommen von Cyanobakterien und deren Toxine im Aasee**

Berichten über ein 1994 vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) initiiertes Forschungsprogramm ist zu entnehmen, dass das Auftreten von Cyanobakterien in deutschen Binnengewässern in der Regel mit der Bildung von Toxinen einhergeht (Fastner et al., 1999). Dies bedeutet (beweist) zunächst aber nicht, dass auch die Cyanobakterien des Aasees Toxine bilden. Schon gar nicht kann daraus geschlossen werden, in welchem Ausmaß Cyanobakterien im Aasee Toxine produzieren, in welchen Mengen bzw.

Konzentrationen diese im Aasee dann vorhanden sind und ob sie ein Gefährdungspotential für die Gesundheit von Menschen und Tieren darstellen, die den See nutzen. Nachdem im Jahre 2000 über längere Zeiträume Cyanobakterien in hoher Dichte im Aasee nachgewiesen worden waren, stand also in 2001 vorrangig an, der Frage nach dem Vorhandensein von Cyanobakterien-Toxinen nachzugehen und bei positiven Nachweis deren Konzentrationen zu messen.

Da der Literatur Angaben über die toxischen Eigenschaften einer Reihe von Cyanobakterien-Toxine zu entnehmen sind (s.o.) und für einige dieser Gifte auch Daten über deren Dosis-Wirkung-Beziehung vorliegen (z.B. für Microcystin-LR: LD<sub>50</sub> i.p. Maus 50 µg/kg Körpergewicht und Tag <sup>\*)</sup>), würde es nach einer mengenmäßigen Erfassung dieser Toxine im Aasee dann möglich sein, Aussagen über das Ausmaß des Risikos einer Gesundheitsgefährdung zu machen. Wichtige Bezugsgrößen liefern dazu auch die Vorgaben/Richtwerte der WHO von 1998, die *Empfehlungen zum Schutz von Badenden vor Cyanobakterien-Toxinen*, erschienen im Bundesgesundheitsblatt 7/97, die Aussagen und Daten des Buches „*Toxic Cyanobacteria in Water*“, herausgegeben von Ingrid Chorus und Jamie Bartram (E & FN Spon, London und New York, publiziert 1999 im Auftrage der Weltgesundheitsorganisation WHO) und die im Journal of Toxicology and Environmental Health im Druck befindliche Publikation von Chorus, Falconer, Salas und Bartram „*Health Risk caused by Freshwater Cyanobacteria in Recreational Waters*“.

(<sup>\*)</sup> Zur Erklärung: LD<sub>50</sub> ist die Dosis pro Kg Körpergewicht und Tag, bei der 50 % der Tiere nach Verabreichung dieser Toxinmenge nach kurzer Zeit sterben; i.p. bedeutet Injektion erfolgte intraperitoneal, also ins Bauchfell).

Die Beantwortung der Fragen „Kommen Cyanobakterien-Toxine während des Auftretens dieser Bakterien im Aasee vor?“ und, wenn ja, „In welchen Mengen treten sie in bestimmten Situationen auf?“ war folglich das vorrangige Ziel der Untersuchungen des Jahres 2001.

Um die jeweiligen Situationen des Auftretens von Cyanobakterien und deren Toxinen möglichst genau charakterisieren zu können, war es darüber hinaus natürlich notwendig, parallel ein genaues Bild der jeweiligen physiko-chemischen Eigenschaften des Wassers und der Zusammensetzung des Planktons zu erhalten, d.h. zu jedem Untersuchungszeitpunkt mussten die wichtigsten physikalischen und chemischen Kenngrößen des Aasee-Wassers ermittelt werden und Planktonproben des Gewässers mikroskopisch untersucht werden, insbesondere auf Cyanobakterien.

Um das wichtigste dieser begleitenden Untersuchungen hier schon einmal zu nennen. Der Aasee kam im Sommers 2001 in den Monaten August – September in eine bisher noch nicht beobachtete Extremsituation. Viel Sonneneinstrahlung und über Wochen anhaltende hohe Lufttemperaturen ließen die Wassertemperaturen lange Zeit auf 25 °C und höher ansteigen. Hinzu kam eine äußerst geringe Wasseraustauschrate, die bedingt war durch sehr wenige Niederschläge, extrem niedrigen Wasserzufluss über die Aa und einen technischen Defekt am Wehr, der über Tage eine deutliche Absenkung des Wasserspiegels bewirkte. Folge war, dass unseres Wissens nach es erstmals in dem jetzt schon über viele Jahre andauernden Beobachtungszeitraum zu einem „Umkippen“ des Aasees kam. Die Messwerte belegen dies für den Zeitraum Ende August/Anfang September. Die untere Hälfte des Wasserkörpers war für mehrere Tage vollständig frei von Sauerstoff und in der oberen herrschte einschließlich der Wasseroberfläche ein sehr starker Sauerstoffmangel. Die unteren Wasserschichten wurden dabei so stark reduzierend, dass es am Gewässerboden durchgängig zu Methangasbildung kam, daran zu erkennen, dass überall im See Gasblasen aufstiegen (s. Foto 5). Die chemischen Analysen zeigten zudem, dass in dieser Situation darüber hinaus beachtliche Mengen an Phosphaten aus den Eisen(III)-Phosphat-Beständen der Sedimente rückgelöst und ins Wasser freigesetzt wurden. Dieser Nährstoff stellt einen weiteren wichtigen Faktor für das





**Foto 5:** Sumpfgas- / Methangasbildung in Münsters Aasee; aufgenommen vor der Nordseite des alten Aasees im Bereich des Anlegers der Landois am Mittag des 31. August 2001.

(Aufnahme: H. Keckevoet).

© Institut für Hygiene UKM Surholt, Mathys

starke Vermehren der Cyanobakterien dar. Näheres zu diesen Untersuchungen siehe weiter unten.

### **Kap. Ia: Cyanobakterien im Aasee im Untersuchungszeitraum 2001**

Bereits Mitte Juli fanden sich erhebliche Mengen an Cyanobakterien im Aasee. Allerdings waren dies zunächst vorrangig Arten der Gattungen *Anabaena*, *Lyngbia* und *Aphanizomenon*, und zwar an allen drei untersuchten Standorten (s. beiliegende Karte: 1. Übergang renaturierte Aa in den neuen Aasee, 2. Bereich Torminbrücke und 3. äußerster Steg im Hafen Overschmidt). *Microcystis* konnte zunächst nur in Form vergleichsweise weniger, noch nicht sehr großer Kolonien gefunden werden (Anmerkung: Vorkommen von *Microcystis* in Form ihrer einzelnen, recht kleinen runden Zellen ist im Mikroskop nur schwer zu erfassen, obendrein werden sie im verwendeten Planktonnetz nur bedingt zurückgehalten).

Anfang August trat wiederum *Anabaena (spiroides)* auf und dazu erste größere Kolonien von *Microcystis*. Besonders wenige Cyanobakterien waren im Plankton am Übergang von der renaturierten Aa in den Aasee zu finden. Hier gab es zu diesem Zeitpunkt ein massenhaftes Vorkommen des Weiherrüsselkrebses (*Bosmina longirostris*), eine Krebschen, das für seine Toleranz und Unempfindlichkeit gegenüber Cyanobakterien und deren Toxine bekannt ist. Dieser Krebs filtriert sehr effektiv kleine, einzellige Organismen aus dem Wasser und konsumiert sie. Große Kolonien kann er dagegen nicht aufnehmen.

Nach einer kurzen Unterbrechung der Hitzeperiode mit etwas kühleren und leicht regnerischen Tagen hatte einige Tage vor dem 15. August erneut eine sehr warme und trockene Periode begonnen. Jetzt fanden sich überall im Aasee große Mengen von sehr großen Kolonien der Cyanobakterien-Art *Microcystis aeruginosa* (= *M. flos-aquae*). Auffallend massiv war deren „Aufblühen“ im Bereich der Torminbrücke. *Microcystis*-Kolonien in extrem hoher Dichte hatten sich darüber hinaus in den nicht so stark im Fließbereich befindlichen Bereichen des Hafens Overschmidt gebildet. Überall, vor allem aber im Hafengebiete des Segelclubs Münster (SCM) hatte sich in den oberen 10-20 cm Zentimetern des Wassers eine sehr dichte, nahezu als „Reinkultur“ zu bezeichnende, gleichmäßig erscheinende, typisch blau-grüne Suspension von *Microcystis*-Kolonien gebildet. Die Sichttiefe lag hier bei nur 15 cm.

Eine Woche später sah das äußere Bild vergleichbar dem vom 15. August aus. Neben den großen Mengen an *Microcystis* fanden sich nun aber überall weitere Cyanobakterien-Arten in z.T. beachtlicher Häufigkeit. Dies waren neben *Anabaena spiroides* und *Lyngbia contorta* vor allem *Aphanizomenon flos-aquae*, ein Cyanobakterium, das ebenfalls große Kolonien bildet und das extrem giftige Neurotoxine (Nervengifte) bildet bzw. bilden kann (Anatoxine und Saxitoxine). Mit dem bloßen Auge gut erkennbare Flockenbildung hatte in einigen Bereichen des Sees eingesetzt. Es ist anzumerken, dass zu diesem Zeitpunkt sich überall (außer im inneren Hafengebiete) neben den Cyanobakterien noch viele andere photosynthetisch aktive Planktonorganismen, vor allem Grünalgen der Gattung *Pediastrum*, fanden.

Eine weitere Woche später (29. August) sah das anders aus. Planktonische Algen und auch Zooplankter waren nicht oder allenfalls noch nach längerem Suchen höchstens als Einzelexemplare zu finden. Die ansonsten im Aasee immer extrem starken Populationen von einzelligen Grünalgen (*Pediastrum* ssp.) waren zusammengebrochen bzw. abgestorben. Als Ursachen kommen die langandauernden hohen Wassertemperaturen (25 °C und mehr) infrage, das nahezu völlige Fehlen des Nährstoffs Nitrat ab Mitte August, evtl. aber auch die hohen Konzentrationen an Cyanobakterien-Toxinen (s.u.), vielleicht auch eine Kombination

*Karte des Aasees mit Stellen der Probennahme*

aller dieser Ursachen. Dieses Absterben von Algen und Zooplanktern steht natürlich in ursächlichen Zusammenhang mit dem extremen Sauerstoffschwund und dem Entstehen reduzierender Bedingungen im unteren Wasserkörper.

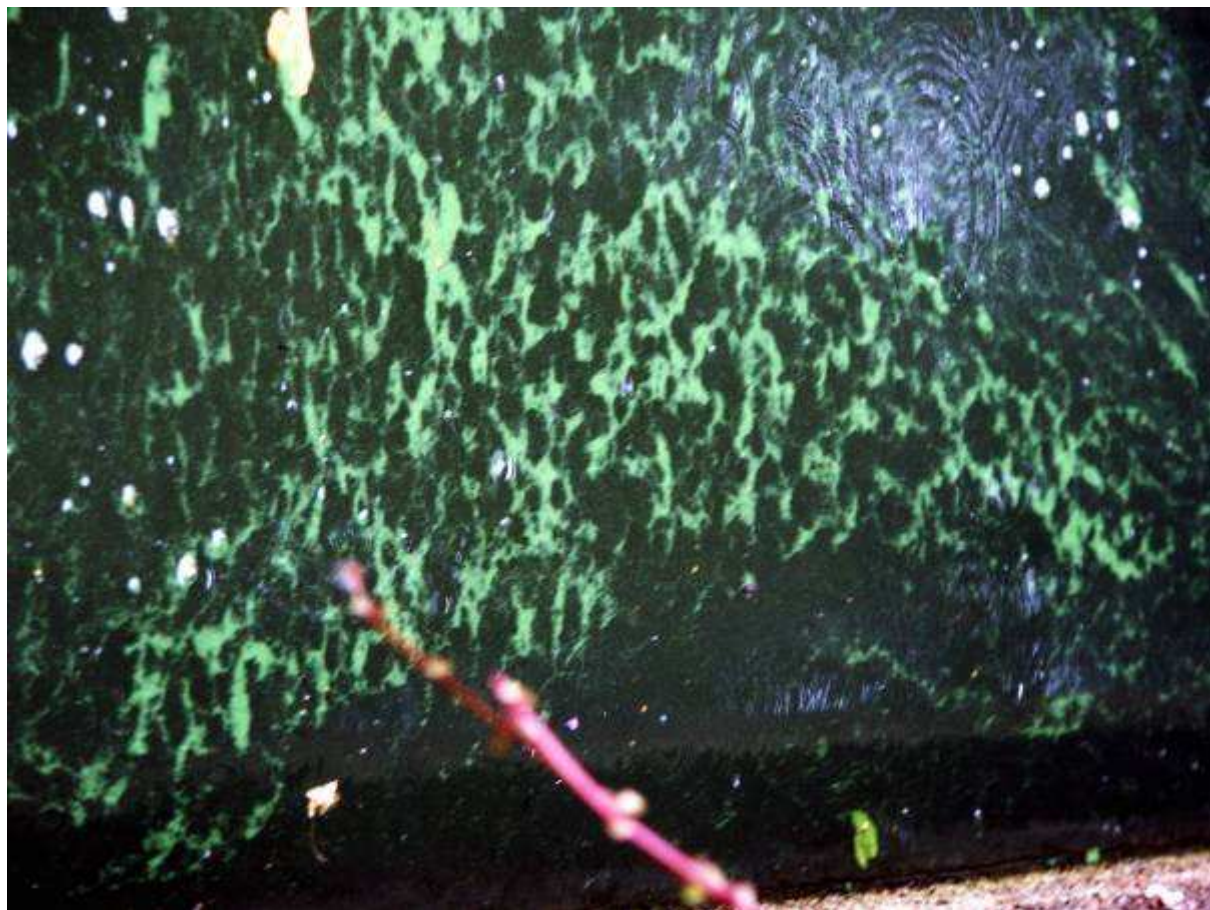
Massenblüten von Cyanobakterien fanden sich Ende August an allen drei untersuchten Standorten. Große Flocken aus Cyanobakterien, die eine ähnliche Arten-Zusammensetzung hatten, wie eine Woche zuvor, bildeten jetzt dichte Schichten bzw. Schlieren unmittelbar unterhalb der Wasseroberfläche und damit die Ursache für eine extrem niedrige Sichttiefe von deutlich weniger als 20 cm. An der Torminbrücke und im Hafbereich Overschmidt hatten sich die Flocken bereits z.T. zu wasserlinsen-ähnlichen, mehrere Millimeter großen, recht kompakten Aggregaten vereinigt, die auf der Wasseroberfläche schwammen (s. Foto 3).

Das Auftreiben, Aggregieren, bis hin zum Aufrahmen und Aufschäumen von Cyanobakterien setzte sich in den Folgetagen fort. Bei Einsetzen von Südwestwind an den letzten beiden Augusttagen wurden im alten Teil des Aasees diese Aggregate und Aufrahmungen und Schäume dann an das Nordost-Ufer getrieben (Foto 6). Vor allem vor den Mauern und Treppen auf Höhe der alten Mensa bildete sich ein mehrere Meter breiter Ufersaum, der aussah, als bestehe er aus einem Teppich einige Zentimeter dicker gallertiger „Entengrütze“ (z.T. mit Ölfilm-artiger Oberfläche, vgl. Foto 4). Eine mikroskopische Analyse zeigte seinen Aufbau aus Cyanobakterien-Konglomeraten (ca. 90% *Microcystis*- und der Rest vorwiegend *Aphanizomenon*-Kolonien).

Erst am 3. September setzte Regen ein. Im Ufersaum begann sich diese Teppiche langsam aufzulösen, aber noch am 12. September trieben größere Reste davon vor den Aasee-Treppen. Im Wasserkörper wurde mit dem Wetterwechsel und den einsetzenden Niederschlägen das Massenaufkommen von Cyanobakterien nicht schlagartig beendet und fortgespült. Die Aufrahmungen auf der Wasseroberfläche verschwanden zwar nach und nach, die massiven Blüten im Wasser (vor allem auch im Bereich Torminbrücke) blieben aber, wie die Befunde vom 12. September belegen. Auch spielte dabei die Art *Microcystis aeruginosa* (= *M. flos-aquae*) nach wie vor die Hauptrolle. Nach und nach erschienen allerdings auch wieder diverse photosynthetisch aktive Algenarten im Wasser, danach auch Zooplanktonarten. Die Sauerstoffsituation im See besserte sich entsprechend (s. Abb. 12).

Zwei Wochen später (26. September) fanden sich dann nur noch im gesamten Hafbereich Overschmidt starke Ansammlungen von Cyanobakterien. Auffällig war dabei, es handelte sich um sehr große, im Wasser schwebende Flocken, die deutliche Zwischenräume zwischen sich ließen (Folge: Die Sichttiefe war hier auf 50 cm angestiegen). Im Mikroskop zeigte sich der offensichtliche Grund dieser geänderten Flocken: Die Hauptmasse bestand jetzt zu gut Zweidrittel aus großen Kolonien von *Aphanizomenon flos-aquae*, den Rest bildeten Kolonien von *Microcystis aeruginosa* und fädige, zu Gallertflöckchen vereinigte *Anabaena flos-aquae*.

Beendet war das „Phänomen Cyanobakterien im Aasee“ auch am 17. Oktober noch nicht. Große, mit bloßem Auge sichtbare Flocken zeigten sich zwar nicht mehr, im mikroskopischen Bild des Planktons des alten und neuen Aasees fanden sich aber immer noch *Microcystis*-Kolonien. Viele von diesen Kolonien waren jetzt aber nach Gelbbraun verfärbt und ganz offensichtlich in Auflösung begriffen (Anmerkung: die Kolonie bildenden Arten überdauern als Einzelbakterien auf dem Grund des Gewässers).



**Foto 6:** Auf der Wasseroberfläche schwimmende, vom Südwest-Wind angetriebene Aufrahmungen / Aggregate aus Cyanobakterien, die Richtung Nordost-Ufer des Aasees driften; aufgenommen vor dem Nordufer des Alten Aasees am Morgen des 1. September 2001.

(Aufnahme: B. Surholt).

© Institut für Hygiene UKM Surholt, Mathys



## **Kap. Ib:      Toxine der Cyanobakterien und deren Konzentrationen im Wasser des Aasees im Untersuchungszeitraum des Jahres 2001**

Wie gerade beschrieben, dominierten die Cyanobakterien im Hochsommer und Herbst 2001 das Plankton des Aasees in ganz entscheidendem Maße. Diese Situation war damit für eine Toxinanalyse sehr günstig. Folgende Fragen mussten dabei geklärt werden:

1. Produzieren die Cyanobakterien des Aasees bei ihrem Auftreten Toxine?
2. Wann und in welchem Ausmaß findet die Toxin-Produktion im Aasee statt?
3. Besteht eine Gefährdung der Gesundheit von Mensch und Tier durch das Auftreten dieser Toxine? (Die Beantwortung dieser Frage erlaubt qualitative Aussagen.)
4. Sind neben den qualitativen Aussagen bei Vorhandensein von Cyanobakterien-Giften auch quantitative Angaben über das Risiko einer Vergiftung durch Aaseewasser zu machen?

Wegen der großen Vielfalt der verschiedenen Cyanobakterien-Toxine und den bei den Analysen zu erwartenden enormen Schwierigkeiten (u.a. war die Analyse-Methodik für das Labor in Münster zunächst erst einmal aufzubauen) war vereinbart, im Rahmen dieser Untersuchung sich auf die Frage des Auftretens der wohl bedeutendsten Toxingruppe, nämlich der Microcystine, zu konzentrieren. Bei Nachweis von Microcystinen sollten dann deren jeweilige Konzentrationen im Aasee gemessen werden.

### **Kap. Ib1:      Cyanobakterien-Toxine im Aasee**

Alle Microcystine besitzen ein ganz charakteristisches UV-(Fluoreszenz)-Spektrum, da die Microcystine in ihrem chemischen Grundgerüst sehr stark übereinstimmen. Zwar wird dieses Grundspektrum durch den Einbau unterschiedlicher Seitenketten (z.B. durch Tryptophan) bei einigen Strukturvarianten deutlich modifiziert, diese Modifikationen werden aber weitgehend von den Spektren der als Reinsubstanzen zur Verfügung stehenden fünf Microcystine repräsentiert. Ein exaktes Identifizieren und Quantifizieren war aber nur bei den Microcystin-Varianten möglich, von denen Reinsubstanzen vorhanden waren, die also als Standards im Trennverfahren und zur Eichung eingesetzt werden konnten. Uns standen zur Verfügung: Microcystin-RR; Microcystin-YR, Microcystin-LR, Microcystin-LW und Microcystin-LF. Diese gelten nach der zur Zeit geltenden Auffassung als die wichtigsten Microcystine, die in unseren Binnengewässern auftreten.

Um aber auch die Microcystine in den Proben, die nicht anhand der vorhandenen Microcystin-Standards exakt angesprochen werden konnten (sondern nur am Typ ihres Spektrums), mit annähernder Genauigkeit quantifizieren zu können, wurde in diesen Fällen hilfsweise der Standard von Microcystin-LR als Bezug für eine entsprechende Auswertung herangezogen (vgl. dazu: Harada, K.-I., Kono, F. und Lawton, L. „*Laboratory Analysis of Cyanotoxins*“ in der bereits zitierten WHO-Publikation von 1999) Nach gezieltem Extrahieren, Aufarbeiten und Auftrennen mittels eines HPLC-Verfahrens der Proben wurden aber zunächst die Microcystine, für die Standardsubstanzen vorhanden waren, ausgewertet.

### **Befund**

Alle Proben, die im Jahr 2001 dem Aasee entnommen wurden, enthielten Microcystine. Dabei wurden zunächst einmal drei der oben aufgeführten fünf Microcystine gefunden, für deren Bestimmung Referenzsubstanzen vorhanden waren. Es waren dies: Microcystin-RR; Microcystin-YR und Microcystin-LR. In keiner der Proben fand sich Microcystin-LW oder -LF.

In den meisten Proben waren aber weitere, nicht exakt ansprechbare Microcystin-Varianten vorhanden. Einige enthielten insgesamt bis zu acht unterschiedliche Microcystine

In den Proben, die in den festgelegten Abständen (Mitte Juli bis Mitte Oktober) an den drei Probestellen des Aasees entnommen wurden (Tab. 2), fanden sich die höchsten Zahlen an Microcystin-Varianten im Hafen Overschmidt (Probenort: vor dem äußersten Steg), nämlich sieben am 22.08., sechs am 29.08. und erneut sechs am 12.09.01. Etwas verwundern mag beim Betrachten der Ergebnisse zunächst die Tatsache, dass einige wenige Proben darunter sind, in denen im Mikroskop keine *Microcystis*-Kolonien entdeckt wurden (s.o.). Hier muss bedacht werden, dass u.a. einzellige *Microcystis* nur schwer zu erkennen sind und dass in diesen Proben sehr viel filtrierendes Zooplankton enthalten war (Beispiel: 1. August am Übergang Aa zum neuen Aasee). Cyanobakterien samt Toxinen dürften (könnten) hier vor allem in diesen Filtrieren gesteckt haben.

In Proben aus der besonders intensiven Cyanobakterien-Blüte im SCM-Hafen von Mitte August 2001 (Tab. 3) fanden sich nach Auftrennung mittels HPLC bis zu acht verschiedene Microcystine. In der Aufrahmung/Aufschäumung des breiten Ufersaums vor den Aasee-Treppen, wo am 1. September Proben genommen wurden, waren nach der Auftrennung bis zu sieben Microcystine (Tab. 4).

**Fazit:** Alle dem Aasee im Untersuchungszeitraum des Jahres 2001 entnommene Proben enthielten Cyanobakterien-Toxine, konkret: bis zu acht Microcystine.

**Befunde für 2000:** Auch in ausgewählten Cyanobakterien-Proben, die im Jahre 2000 dem Aasee entnommen und bei  $-70^{\circ}\text{C}$  zwischengelagert worden waren (genauere Charakterisierung siehe unten), wurden Microcystine nachgewiesen und zwar in all den Proben, die nachweislich auch das Cyanobakterium *Microcystis aeruginosa* enthielten (vgl. Tab. 5). In diesen Proben wurden Microcystin-RR plus Microcystin-YR oder Microcystin-RR plus Microcystin-LR oder eine Kombination dieser drei gefunden. Weitere Microcystin-Varianten wurden in diesen Proben nicht gefunden.

Keine Microcystine fanden sich bislang in den rasenartigen Aufwüchsen und schwammartigen Konglomeraten, die im Herbst 2000 und Winter 2000/2001 aus der renaturierten Aa und dem neuen Aasee als Proben entnommen worden waren. Diese Konglomerate bestanden allerdings ganz überwiegend aus fädigen Cyanobakterien aus der Gattung *Oscillatoria*.

## **Kap. Ib2: Konzentrationen an Cyanobakterien-Toxinen (Microcystinen) im Aasee**

### **a) Konzentrationen in den regelmäßig aus dem Aasee gezogenen Wasserproben im Jahr 2001**

#### ***I. Microcystin-RR, Microcystin-YR und Microcystin-LR***

Bei den im Untersuchungszeitraum 2001 im Aasees gefunden Microcystin-RR, Microcystin-YR und Microcystin-LR handelt es sich um die, die laut Literatur am häufigsten in unseren Binnengewässern zu finden sind. Mit Microcystin-LR und Microcystin-YR sind die zwei darunter, die als die giftigsten Microcystine gelten. In Tierversuchen wiesen sie die höchste Toxizität auf. Sie waren ca. zehnmals giftiger als Microcystin-RR.

Tabelle 2 (a)

### Gehalte des Planktons des Aasees an Microcystinen im Jahr 2001

An den in der Tabelle angegebenen Tagen wurden jeweils 40 Liter Wasser an den bezeichneten Probestellen entnommen und mittels Planktonnetz (Maschenweite 55 µm) auf ein Volumen im Bereich 15 - 60 ml eingengt. Der jeweilige Faktor der Konzentrierung wurde ermittelt. Aliquots der Proben wurden anschließend gefriergetrocknet und die Trockengewichte der jeweiligen Planktonmasse wurden bestimmt. Der Rückstand der Gefrierdrying wurde mittels Ultraschall aufgeschlossen und die darin enthaltenen Microcystine wurden in mehreren Schritten extrahiert. Aus den so erhaltenen Extrakten wurden die Microcystine sodann mittels HPLC bestimmt. Die Angaben in der folgenden Tabelle beziehen sich zunächst auf das jeweils ermittelte Trockengewicht (TG) der Planktonprobe.

Die Microcystine RR, YR und LR wurden anhand der für die Microcystine charakteristischen UV-(Fluoreszenz-)Spektren und ihrem Trennverhalten im HPLC-Lauf identifiziert und unter Zuhilfenahme vorhandener Referenzsubstanzen und deren Trennverhalten quantifiziert. Wegen des Fehlens geeigneter weiterer Microcystin-Standards wurden die unter "weitere Microcystine" aufgelisteten Microcystine nur anhand ihrer Spektren identifiziert und über den Standard von Microcystin-LR quantifiziert (von über 60 Microcystinen sind bislang als Standards nur die Microcystine RR, YR, LR, LW und LF erhältlich).

Datum	Probenstelle	Microcy.-RR	Microcy.-YR	Microcy.-LR	weit. Microcy	Sum. Microcy
		µg/g TG	µg/g TG	µg/g TG	Zahl:µg/g TG	µg/g TG
18.07.2001	Aa-Aasee	n.d.	n.d.	n.d.	(5): 30,8	30,8
	Torminbr.	n.d.	n.d.	n.d.	(1): 9,6	9,6
	Hafen O.Ste.	n.d.	n.d.	n.d.	(3): 5,6	5,5
01.08.2001	Aa-Aasee	n.d.	n.d.	n.d.	(1): 2,6	2,6
	Torminbr.	<b>9,6</b>	n.d.	<b>5,3</b>	(3): 20,3	35,2
	Hafen O.Ste.	<b>11,3</b>	n.d.	<b>7,4</b>	(3): 11,7	36,7
15.08.2001	Aa-Aasee	n.d.	n.d.	n.d.	(4): 155,7	155,7
	Torminbr.	<b>135,7</b>	<b>50,8</b>	<b>62,1</b>	(1): 4,8	253,4
	Hafen O.Ste.	<b>85,3</b>	n.d.	<b>38,6</b>	(3): 16,2	123,9
22.08.2001	Aa-Aasee	<b>86,9</b>	<b>8,8</b>	<b>47,4</b>	(1): 7,3	150,4
	Torminbr.	<b>67,9</b>	<b>49,4</b>	<b>43,6</b>	(1): 4,9	165,8
	Hafen O.Ste.	<b>29,9</b>	n.d.	<b>29,1</b>	(5): 54,2	113,2
29.08.2001	Aa-Aasee	n.d.	n.d.	<b>68,9</b>	(2): 96,2	165,1
	Torminbr.	<b>66,5</b>	n.d.	<b>27,3</b>	n.d.	93,8
	Hafen O.Ste.	<b>6,9</b>	n.d.	<b>2,9</b>	(4): 49,5	59,3
12.09.2001	Aa-Aasee	<b>13,2</b>	<b>8,5</b>	n.d.	(1): 17,4	39,1
	Torminbr.	<b>178,3</b>	n.d.	<b>107,8</b>	(2) 28,9	315
	Hafen O.Ste.	<b>68,7</b>	<b>1,5</b>	n.d.	(4): 50,6	120,8
26.09.2001	Aa-Aasee	n.d.	n.d.	n.d.	(3): 41,1	41,1
	Torminbr.	n.d.	n.d.	n.d.	(5): 39,2	39,2
	Hafen O.Ste.	<b>59,6</b>	n.d.	<b>29,7</b>	(1): 20,6	109,9
17.10.2001	Aa-Aasee	n.d.	n.d.	n.d.	(2): 0,9	0,9
	Torminbr.	<b>33</b>	<b>37,2</b>	n.d.	n.d.	70,2
	Hafen O.Ste.	n.d.	n.d.	n.d.	(1): 22,1	22,1

TG = Trockengewicht

n.d. = not detected = nicht gefunden

Tabelle 2 (b)

**Konzentrationen der an Plankton gebundenen Microcystine im Aasee des Jahres 2001**

Die in dieser Tabelle dargestellten Befunde basieren auf den gleichen Proben, Aufarbeitungen und analytischen Techniken wie die der vorangehenden Tabelle. Nach der Analyse der Microcystine mittels HPLC wurde unter Berücksichtigung der Größe des jeweils eingesetzten Aliquots der ursprünglichen Probe und unter Einbeziehen der mit dem Planktonnetz erfolgten Konzentrierung die im untersuchten Aaseewasser vorhandene Microcystin-Konzentration bestimmt. Zu über 98 % beinhalten die Ergebnisse infolge des starken Konzentrierens der Proben über das Planktonnetz die Mengen an Microcystinen, die im Plankton gebunden waren. Die Bestimmung der frei im Wasser gelösten Microcystine steht noch aus. Bezüglich Identifizierung und Quantifizierung der angegebenen Microcystine gilt, was diesbezüglich im Text zur vorangehenden Tabelle beschrieben ist.

Datum	Probenstelle	Microcy.-RR µg / l	Microcy.-YR µg / l	Microcy.-LR µg / l	weit. Microcy Zahl: µg / l	Sum.Microcy µg / l
18.07.2001	Aa-Aasee	n.d.	n.d.	n.d.	(5): 110,8	110,8
	Torminbr.	n.d.	n.d.	n.d.	(1): 36,1	36,1
	Hafen O.Ste.	n.d.	n.d.	n.d.	(3): 17,4	17,4
01.08.2001	Aa-Aasee	n.d.	n.d.	n.d.	(1): 24,3	24,3
	Torminbr.	8,1	n.d.	4,4	(3): 16,8	29,3
	Hafen O.Ste.	20,9	n.d.	13,7	(3): 21,6	56,2
15.08.2001	Aa-Aasee	n.d.	n.d.	n.d.	(4): 892,6	892,6
	Torminbr.	247,9	92,8	113,6	(1): 8,8	463,1
	Hafen O.Ste.	68,1	n.d.	30,8	(3): 12,9	123,9
22.08.2001	Aa-Aasee	45,1	4,6	24,5	(1): 3,8	77,9
	Torminbr.	47,6	34,7	30,6	(1): 3,5	116,4
	Hafen O.Ste.	40,7	n.d.	40,5	(5): 75,4	156,6
29.08.2001	Aa-Aasee	n.d.	n.d.	151,3	(2): 211,3	362,6
	Torminbr.	118,1	n.d.	48,5	n.d.	166,6
	Hafen O.Ste.	15,2	n.d.	6,4	(4): 108,6	130,2
12.09.2001	Aa-Aasee	22,9	14,8	n.d.	(1): 30,2	39,1
	Torminbr.	328,9	n.d.	198,8	(2): 51,6	579,3
	Hafen O.Ste.	54,9	1,2	n.d.	(4): 40,4	96,5
26.09.2001	Aa-Aasee	n.d.	n.d.	n.d.	(3): 62,9	62,9
	Torminbr.	n.d.	n.d.	n.d.	(5): 38,3	38,3
	Hafen O.Ste.	60,1	n.d.	29,9	(1): 20,8	109,9
17.10.2001	Aa-Aasee	n.d.	n.d.	n.d.	(2): 1,5	1,5
	Torminbr.	11,4	12,8	n.d.	n.d.	24,2
	Hafen O.Ste.	n.d.	n.d.	n.d.	(1): 85,5	85,5

*n.d. = not detected = nicht gefunden*

Tabelle 3

**Microcystingehalte der intensiven Cyanobakterien-Blüte im SCM-Hafen und in den daran angrenzenden Bereichen des Hafens Overschmidt (Mitte August 2001)**

Über Tage fand sich in diesen Bereichen des Aasees unmittelbar unter der Wasseroberfläche eine einige Zentimeter dicke Schicht, in der sich massiv Cyanobakterien konzentriert hatten. Fast ausschließlich handelte es sich dabei um große Kolonien von *Microcystis flos-aquae*. Die mit Meßgefäßen geschöpften Proben wurden mittels eines Planktonnetzes aufkonzentriert, der Konzentrierungsfaktor wurde protokolliert. Nach Gefriertrocknen wurden die Trockengewichte der Proben bestimmt, die Microcystine extrahiert und mittels HPLC quantifiziert. Die Angaben in dieser Tabelle beziehen sich auf die ermittelten Trockengewichte (TG).

Datum	Probenstelle	Microcy.-RR µg/g TG	Microcy.-YR µg/g TG	Microcy.-LR µg/g TG	weit. Microcy Zahl:µg/g TG	Sum.Microcy µg/g TG
15.08.2001	Hafen SCM	415,2	253,6	449,7	(3): 606,6	1725,1
	Hafen SCM	291,2	109,8	365,7	(3): 539,8	1306,5
<i>fast</i>	Hafen SCM	310,4	230,2	333,8	(2): 233,5	1107,9
<i>reine</i>	Hafen SCM	339,9	310,3	388,5	(1): 218,6	1257,3
<i>massive</i>	Hafen SCM	428,9	310,5	443,8	(1): 255,9	1439,1
<i>Microcystis-</i>	Hafen SCM	276,1	185,9	380,8	(2): 280,9	1123,7
<i>Blüte</i>	Hafen SCM	461,1	200,1	447,2	(2): 136,4	1244,8
	Hafen SCM	418,8	177,2	403,3	(5): 292,1	1291,4
	<b>Mittelwert:</b>	<b>367,7</b>	<b>222,2</b>	<b>401,6</b>	(2,37):320,5	1311,9
15.08.2001	Hafen Ov.Ns.	107,2	62,6	104,3	(3): 57,6	331,7

**Konzentrationen an Microcystinen in der Cyanobakterienblüte des Oberflächenwassers im SCM-Hafen und Hafen Overschmidt (Mitte August 2001)**

Es handelt sich hier um die oben aufgeführten Proben. Der bei der Probennahme ermittelte Faktor der Aufkonzentrierung mittels Planktonnetz erlaubt eine Bestimmung der jeweiligen Microcystin-Konzentrationen im Oberflächenwasser der Hafengebiete. Die angegebenen Werte beinhalten allerdings nur die Microcystine (hier zu über 99%), die in den mit dem Planktonnetz aufkonzentrierten Organismen enthalten waren. Die Bestimmung der frei im Wasser gelösten Microcystine steht noch aus.

Datum	Probenstelle	Microcy.-RR µg / l	Microcy.-YR µg / l	Microcy.-LR µg / l	weit. Microcy Zahl: µg / l	Sum.Microcy µg / l
15.08.2001	Hafen SCM	601,9	367,7	326,1	(3): 879,6	2175,3
	Hafen SCM	378,6	142,7	475,4	(3): 701,7	1698,4
<i>fast</i>	Hafen SCM	481,1	356,8	517,4	(2): 361,9	1717,2
<i>reine</i>	Hafen SCM	501,3	457,7	573,1	(1): 322,4	1854,5
<i>massive</i>	Hafen SCM	584,3	422,9	604,6	(1): 348,6	1960,4
<i>Microcystis-</i>	Hafen SCM	398,9	268,6	550,3	(2): 405,9	1623,7
<i>Blüte</i>	Hafen SCM	683,5	296,6	662,9	(2): 202,2	1845,2
	Hafen SCM	619,8	262,2	596,8	(5): 432,3	1911,1
	<b>Mittelwerte:</b>	<b>531,2</b>	<b>321,9</b>	<b>538,3</b>	(2,37):456,8	1848,2
15.08.2001	Hafen Ov.Ns.	184,4	107,7	179,4	(3): 99,1	570,6

(weit. Microcy = weitere Microcystine, die an ihrem UV-Spektrum zu erkennen waren für die aber keine Referenzsubstanzen erhältlich waren. Sum.Microcy = Summe aller Microcystine der Probe. Ov.Ns. = Overschmidt Nordseite)



Tabelle 4

### Microcystingehalte von vier Proben der Aufschäumung vor den Aasee-Treppen

Die Proben der Aufschäumung wurden direkt von der Wasseroberfläche durch Abschöpfen gewonnen. Ein Aufkonzentrieren unterblieb. Mit der HPLC -Technik analysiert wurde dann der gesamte Schaum, nachdem jeweils 5 ml davon gefriergetrocknet, die Trockenmasse bestimmt und extrahiert worden war. Wiedergegeben sind in dieser Tabelle die jeweiligen Microcystin-Gehalte bezogen auf die Trockenmasse (TG) der Probe.

Datum	Probenstelle	Microcy.-RR µg/g TG	Microcy.-YR µg/g TG	Microcy.-LR µg/g TG	weit. Microcy Zahl: µg/g TG	Sum. Microcy µg/g TG
01.09.2001	Aasee-Trepp.	893,2	507,9	758,1	(3): 645,1	2804,3
01.09.2001	Aasee-Trepp.	212,7	220,1	192,1	(4): 413,6	1038,5
01.09.2001	Aasee-Trepp.	591,3		355,9		939,4
01.09.2001	Aasee-Trepp.	269,8		348,1	(1*): 36,7	654,6
	<b>Mittelwerte:</b>	<b>491,8</b>	<b>182</b>	<b>413,6</b>	(2): 273,9	1359,2

(1\*): Microcystin mit sauberem Spektrum von Microcystin-LW, aber kleinerem RT-Wert

### Microcystin-Konzentrationen in vier Proben der Aufschäumung vor den Aasee-Treppen

Die Proben der Aufschäumung wurden direkt von der Wasseroberfläche durch Abschöpfen gewonnen. Ein Aufkonzentrieren unterblieb. Mit der HPLC -Technik analysiert wurde dann der gesamte Schaum, ein Trennen von Organismen und Wasser unterblieb, so dass die Ergebnisse den gesamten Gehalt des Schaums an Microcystinen (im Wasser gelöste und zellulär gebundene) wiedergeben.

Datum	Probenstelle	Microcy.-RR µg / l	Microcy.-YR µg / l	Microcy.-LR µg / l	weit. Microcy Zahl: µg / l	Sum. Microcy µg / l
01.09.2001	Aasee-Trepp.	9199	5231	7808	(3): 6645	28883
01.09.2001	Aasee-Trepp.	2191	2267	1979	(4): 4070	10507
01.09.2001	Aasee-Trepp.	5441		3282		8723
01.09.2001	Aasee-Trepp.	2164		3212	(1*): 304	5680
	<b>Mittelwerte:</b>	<b>4749</b>	<b>1875</b>	<b>4070</b>	(2): 2755	13448

(1\*): Microcystin mit sauberem Spektrum von Microcystin-LW, aber kleinerem RT-Wert

**Microcystin-RR:** Dieses Microcystin war nur am ersten Probenahmetag (18. Juli) nicht in den Proben des Aasees auffindbar. Danach konnte es bis einschließlich dem 17. Oktober in mindestens einer Probe aus einem Bereich des Aasees gemessen werden. Wie Tabelle 2 und Abbildung 1 zu entnehmen ist, waren dabei die Konzentrationen häufig recht hoch. Der höchste Wert dieses Toxins lag am 12. September bei 328,9 µg/l und am 15. August 2001 bei 247,9 µg/l (beide im Bereich Torminbrücke).

**Microcystin-LR:** Dieses giftigste Microcystin wurde außer am ersten (18.07.) und letzten Probenahmetag (17.10.) immer im Aasee gefunden (s. Tab. 2 und Abb. 2). Auch von diesem Microcystin war die Konzentration am 12. September 2001 im Bereich der Torminbrücke am höchsten. Fast 200 µg pro Liter wurden hier an diesem Tag gemessen. An der gleichen Stelle waren es am 15. August 113,6 µg/l. Blicke anzumerken, dass am 29. August der zweithöchste Wert für Microcystin-LR am Übergang der renaturierten Aa zum neuen Aasee mit 151,3 µg/l bestimmt wurde.

**Microcystin-YR:** Dieses Microcystin (Tab. 2) konnte nur an vier Probenahme-Tagen im Aasee gemessen werden. Die höchste Konzentration von 92,8 µg/l wurde für den 15. August, wiederum im Bereich Torminbrücke, bestimmt (s. Abb. 3).

## II. Weitere Microcystin-Varianten

Diese wurden anhand ihrer UV-Spektren identifiziert und unter Zuhilfenahme des Microcystin-LR-Standards quantifiziert wurden (s. Tabelle 2, Zahlen in Klammern in der vorletzten Spalte):

Wie der genannten Tabelle 2 zu entnehmen ist, fanden sich während des gesamten Untersuchungszeitraumes nur in zwei Proben keine weiteren zusätzlichen Microcystin-Varianten. Dafür schließen sie die Lücken in den wenigen Proben, in denen die drei Microcystine-RR, -YR und -LR nicht gefunden wurden. Die jeweiligen Konzentrationen dieser Microcystine sind in ihrer Gesamtheit ebenfalls in der vorletzten Spalte von Tabelle 2 aufgeführt.

In Abbildung 4 sind dann die jeweiligen Gesamtkonzentrationen aller gefundenen Microcystine über den Untersuchungszeitraum hin dargestellt. Auch hier fallen der 15. August mit 892,6 µg Microcystine/l und der 12. September 01 mit 579,3 µg/l als Höchstwerte besonders auf. Dass der höchste Wert mit 892,6 µg/l (15.08.01) im ansonsten meist weniger auffälligen Bereich des Übergangs der renaturierten Aa in den Aasee lag, dürfte darin begründet sein, dass an diesem Tag das Wasser hier voll von filtrierenden Zooplanktern ( vor allem *Bosmina longirostris* = Weiherrüsselkrebs) war. Diese hatten offensichtlich u.a. sehr massiv auch Cyanobakterien, und damit Microcystine, in sich aufgenommen und dabei diese Toxine stark angereichert.

### **b) Microcystin-Konzentrationen im Hafen Overschmidt und im SCM-Hafenbecken während der intensive Blüte von *Microcystis aeruginosa* Mitte August 2001**

Nach der routinemäßigen Beprobung des Aasees am 15. August 2001 zeigte sich bei einem anschließenden Rundgang um den Hafen Overschmidt, dass das Wasser hier extrem trübe war und sich diese Trübung durch eine intensive, für Cyanobakterien typische blau-grüne Färbung auszeichnete. Bei einer genaueren Untersuchung, einschließlich einer mikroskopischen, stellte sich heraus, dass die obere Wasserschicht extrem und nahezu homogen angereichert war mit sehr großen Kolonien von *Microcystis aeruginosa*. Andere Planktonorganismen waren kaum

zu finden. Aus den oberen ca. 20 cm wurden daraufhin eine Reihe von Proben genommen und mit Hilfe eines 55 µm-Planktonnetzes leicht aufkonzentriert. Der Faktor der Konzentrierung wurde dabei bestimmt, so dass später die Toxinkonzentrationen auf das Original-Aasee-Wasser zurückgerechnet werden konnten. In acht dieser Proben wurden inzwischen die Konzentrationen an Microcystinen gemessen, dazu in einer weiteren, die an der Nordseite des Hafens genommen worden war.

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse dieser Analysen zusammengestellt. Danach enthielten alle Proben sehr hohe Konzentrationen der drei direkt zu identifizierenden Microcystine M.-RR, M.-YR und M.-LR. Den im Durchschnitt der acht im SCM-Hafen gemessenen Proben höchsten Wert erreichte Microcystin-LR mit 538,3 µg/l. Auf gleichem Niveau mit durchschnittlich 531,2 µg/l lag Microcystin-RR. Das wie M.-LR ebenfalls äußerst toxische Microcystin-YR trat in einer mittleren Konzentration von 321,9 µg/l auf. Diese drei Microcystine zusammengenommen erreichten damit eine mittlere Gesamtkonzentration von 1391,4 µg/l, d.h. zusammen überschritten sie deutlich den Wert von 1 mg/l.

Zu diesen drei Mycrocystinen kamen noch bis zu fünf weitere Microcystin-Varianten hinzu (Zahlen in Klammern der vorletzten Spalte der Tabelle 3). In ihrer Konzentration erreichen diese zusammengenommen einen Durchschnittswert von 456,8 µg/l. Die mittlere durchschnittliche Konzentration aller Microcystine lag also in der oberen Wasserschicht des SCM-Hafens Mitte August bei 1848,2 µg/l, und damit bei fast 2 mg/l. Der Höchstwert lag in dieser Reihe bei 2,175 mg/l.

Deutlich niedriger, aber immer noch als sehr hoch zu bezeichnen, waren die Microcystin-Konzentrationen der Probe von der Nordseite des Hafens. In der Summe wurde über ein halber Milligramm pro Liter gefunden (570,6 µg/l). Davon machten in der Reihenfolge ihrer Konzentration Microcystin-RR, Microcystin-LR und MicrocystinYR zusammengenommen 471,5 µg/l, also fast 83 %, aus (s. Tabelle 3 ).

### **c) Microcystin-Konzentrationen in den Aufrahmungen des Ufersaums, die sich Ende August – Anfang September 2001 vor den Treppen und Mauern auf der Nordostseite des Aasees gebildet hatten**

Am Morgen des 1. September wurden eine Reihe von Proben direkt durch Abschöpfen der Aufrahmung aus den Ufersäumen vor den Aasee-Treppen und vor der Mauer auf der Seite zur alten Mensa hin genommen. Ein Aufkonzentrieren der darin enthaltenen Planktonorganismen erfolgte dabei nicht. Die Ergebnisse der Analysen dieser Proben beziehen sich damit direkt auf den gesamten Gehalt der Aufrahmung an Microcystinen, d.h. den zellulär in den Organismen gebundenen und den frei im Wasser gelösten. Vier dieser Proben wurden inzwischen aufgearbeitet und der Analyse auf Microcystine unterworfen.

Wie aus Tabelle 4 hervorgeht, fanden sich in allen vier Proben Microcystin-RR und Microcystin-LR. Die Konzentrationen von Microcystin-RR lagen zwischen 2164 und 9199 µg/l und von Microcystin-LR zwischen 1979 und 7808 µg/l. Nur in zwei der vier Proben fand sich Microcystin-YR, mit 2267 bzw. 5231 µg/l aber dann ebenfalls in sehr hohen Konzentrationen. Dies bedeutet, ein Liter der Aufrahmung (s. Foto 4) enthielt im Schnitt fast 5 mg Microcystin-RR, 4 mg Microcystin-LR und 2 mg Microcystin-YR. Hinzu kamen noch bis zu vier weitere Microcystine mit zusammen im Durchschnitt 2,755 mg/l. Insgesamt enthielten die untersuchten Proben dieser Cyanobakterien-Aufrahmung in der Summe damit

durchschnittlich über 13 mg Microcystine pro Liter. In einer Probe fanden sich dabei sogar über 28 mg/l.

### **Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Toxin-Analysen zeigt folgendes Bild für den Aasee des Jahres 2001:**

1. In allen Proben des Aases aus dem Zeitraumes 18. Juli bis 17. Oktober 2001 wurden Cyanobakterien-Toxine (konkret Microcystine) in beachtlichen Konzentrationen im Aasee nachgewiesen. Mit nur einer Ausnahme waren die Gehalte immer höher als 17 µg/l.
2. Bei der zwischen Mitte August und Mitte September erfolgten starken Vermehrung von Cyanobakterien der Art *Microcystis aeruginosa* im Wasserkörper des Aasees traten sehr hohe Microcystin-Konzentrationen auf. Konzentrationen von über einem halben Milligramm pro Liter wurden gemessen, mit einem Höchstwert von 0,893 mg/l.
3. Von Mitte August bis Anfang September kam es darüber hinaus in bestimmten Bereichen des Aasees zu noch intensiveren Cyanobakterien-Blüten mit zunächst homogener Schichtbildung von ca. 15 cm unmittelbar unter der Wasseroberfläche, vor allem im Hafenbecken Overschmidt und dort wiederum im SCM-Hafen. Diese Blüten wurden zunächst fast ausschließlich von *Microcystis aeruginosa* gebildet. Später lagerten sich deren große Kolonien flockenartig zusammen und strebten an die Wasseroberfläche (vgl. Foto: 1 u. 2: „Wolkenbildung“ zwischen den ankernden Booten). In der zunächst homogenen Schicht unmittelbar unterhalb der Wasseroberfläche wurden Mitte August Gesamtkonzentrationen an Microcystinen von durchschnittlich fast 2 mg/l gemessen.
4. Ende August bildeten sich überall auf der Oberfläche des Aasees wasserlinsenartige Aggregate (Foto 3) und Aufrahmungen, die wiederum ganz überwiegend aus *Microcystis aeruginosa* bestanden. Diese Aufrahmungen wurden in den letzten Augusttagen vom einsetzenden Südwestwind z.T. Richtung Aasee-Treppen getrieben (Foto 6) und dort vor den Treppen und den Mauern zu einem breiten, dichten Ufersaum zusammengeschoben (Foto 4). In diesem Ufersaum wurden am 1. Sept. 2001 Microcystin-Konzentrationen mit Spitzenwerten von bis zu 28 mg/l gemessen (Durchschnitt 13,45 mg/l).

### **Einschub: Microcystin-Konzentrationen in ausgewählten Proben aus dem Jahr 2000**

Wie bereits erwähnt, wurden bei den Untersuchungen Jahres 2000 regelmäßig zusätzlich Proben genommen, um sie später auf Cyanobakterien-Toxine zu untersuchen. Erste Proben aus diesem Jahr wurden jetzt auf ihre Microcystin-Gehalte analysiert. Ausgewählt wurden zunächst solche, die im Original (d.h. ohne Aufkonzentrieren des Planktons) durch direktes (Ab-)Schöpfen gewonnen worden waren und die besonders starke und charakteristische Ausprägungen von Cyanobakterien-Wachstum darstellten.

Im einzelnen waren dies starke Cyanobakterien-Blüten im Wasserkörper mit Aufrahmungstendenz. Ausgewählt wurde dabei Proben aus dem Bereich Torminbrücke vom 1. September 2000. Hier bot sich optisch im Jahr 2000 ein ähnliches Bild wie zur gleichen Zeit des Jahres 2001. Ferner wurden Proben analysiert, die aus breiten aufrahmenden Randsäumen stammten, die sich am 13. Oktober 2000 und 3. November 2000 im Hafen Overschmidt gebildet hatten und die aus diversen Cyanobakterien-Arten bestanden, vor allem aber aus *Microcystis aeruginosa*.

Tabelle 5

**Microcystingehalte von im Jahre 2000 aus dem Aasee gewonnenen (Wasser-)Proben**

Bei den hier aufgeführten Proben handelt es sich um solche, die durch direkte Entnahme gewonnen wurden (also einfaches Schöpfen bzw. Abschöpfen). Die Ergebnisse repräsentieren damit direkt die Microcystin-Konzentrationen in den jeweiligen Proben. Da auch die Trockengewichte der in den Proben enthaltenen Organismen bestimmt wurden, werden die Ergebnisse auch bezogen auf diese Trockengewichte (TG) angegeben.

Datum	Probenstelle	Microcy.-RR µg/g TG - bzw. µg/l	Microcy.-YR µg/g TG - bzw. µg/l	Microcy.-LR µg/g TG - bzw. µg/l	weit. Microcy Zahl:µg/g TG	Sum.Microcy µg/g TG - bzw. µg/l
01.09.2000	<b>Torminbr.</b>	21,6	5,5	n.d.	n.d.	<b>27,1</b>
		71,4	18,3	n.d.	n.d.	<b>89,7</b>
	Cyanobakt.-					
01.09.2000	<b>Blüte</b>	22,5	6,3	n.d.	n.d.	<b>28,8</b>
		62,9	16,8	n.d.	n.d.	<b>79,7</b>
13.10.2000	<b>Hafen Over.</b>	12,7	n.d.	8,1	n.d.	<b>20,8</b>
	"Anspülicht"	70,9	n.d.	45,6	n.d.	<b>116,5</b>
03.11.2000	<b>Hafen Over.</b>	7,1	3,4	1,6	n.d.	<b>12,1</b>
	<b>Aufräumung</b>	84,1	40,8	18,9	n.d.	<b>143,8</b>

**Anmerkungen zu diesen Befunden:**

Ende August - Anfang September 2000 fand im Aasee (vor allem auch im Bereich der Torminbrücke) eine sehr intensive Cyanobakterien-Blüte mit deutlicher Aufräumung statt wie zur gleichen Zeit des Jahres 2001. Allerdings dominierte dabei im Jahr 2000 die Art *Aphanizomenon flos-aquae*, eine Blaualge, die ebenfalls sehr große Kolonien bildet. *Microcystis flos-aquae*, die im Jahre 2001 ganz dominierend auftrat, war die zweitgrößte Gruppe in der Blüte.

Die Aufräumung mit Bildung eines Randsaumes im Hafen Overschmidt vom 13. Okt. 2000 bestand aus einer Reihe von Cyanobakterien-Arten, vor allem auch fädige. *Microcystis flos-aquae* war zu etwa 20 - 30 % in der Aufräumung vertreten.

Die ca. 2 cm dicke Aufräumung im Hafen vom 3. Nov. 2000 wurde geprägt von fädigen Blaualgen. Diese waren aber stark durchsetzt von vielen großen, intensiv blaugrünen Kolonien von *Microcystis flos-aquae* (*M. aeruginosa*).

**Weitere Befunde an Proben aus dem Jahr 2000 (bzw. aus Februar 2001)**

In den am 13.10.2000 auf der renaturierten Aa und am 19.10.2000 am Übergang der renaturierten Aa zum neuen Aasee schwimmenden Cyanobakterien-Konglomeraten, den Cyanobakterien-Bodenlagern der renaturierten Aa vom 19.10. Und 16.11.2000 und den Bodenlagern und aufschwimmenden Konglomeraten am Übergang zum neuen Aasee vom 22.02.2001 konnten in ersten Analysen keine Microcystine nachgewiesen werden.

Wie damalige Analysen der Zusammensetzung dieser Blaualgen-Verbände zeigen, bestanden sowohl die Bodenlager (Bodenrasen) als auch die schwimmenden Konglomerate ganz überwiegend aus fädigen *Oscillatoria*-Arten (wie *O. tenuis* und *O. princeps*). *Microcystis flos-aquae* trat darin nur vereinzelt auf. Diese Kolonien waren zudem gelb-braun gefärbt, also nicht mehr in einem guten Wachstumszustand.



Ein anderes Phänomen des Jahres 2000, das auf intensives Wachstum von Cyanobakterien beruhte, war folgendes: Von Anfang Oktober 2000 bis Februar 2001 wurden im Bereich der renaturierten Aa und im oberen Teil des neuen Aasees z.T. massive Ansammlungen von relativ großen, fast schwarz erscheinenden, schwammartigen Konglomeraten beobachtet. Diese verbreiteten zum Teil einen sehr unangenehmen Geruch (nach Gülle). Je nach Witterung bedeckten sie weite Teile des Gewässerbodens, flottierten im Wasser oder trieben auf der Oberfläche. Zeitweise kam es zu massiven Ansammlungen im Hafen des Hansa-Clubs. Von diesen Konglomeraten waren Proben genommen worden, die jetzt auf Microcystine analysiert wurden.

### **Ergebnisse dieser Analysen:**

Die Proben der Aufrahmungen (Randsäume) im Hafen Overschmidt (13.10.2000 und 03.11.2000) enthielten deutliche Mengen an Microcystinen, bis zu 143,8 µg/l wurden gemessen. Auch die Proben mit der intensiven Cyanobakterien-Blüte im Bereich der Torminbrücke von Ende August/Anfang September 2000 enthielten beachtliche Konzentrationen an Microcystinen. Mit bis zu 90 µg/l erreichten sie allerdings nur die Hälfte der Werte, die zur gleichen Zeit des Jahres 2001 hier gemessen wurden. Im einzelnen ergaben sich folgende Befunde:

1. In den Proben der Cyanobakterienblüte im Bereich Torminbrücke vom 1.Sept. 2000 wurden nur die beiden Microcystine M.-RR und M.-YR gefunden, zusammengenommen in Konzentrationen von 79,7 und 89,7 µg pro Liter (vgl. Tabelle 5).
2. Der Ufersaum aus Cyanobakterien, der am 13.10.200 das Wasser des Hafens Overschmidt umgab, enthielt nur Microcystin-RR und Microcystin-LR, in einer Gesamtkonzentration von 116,5 µg pro Liter.
3. Der ölig aussehende Randsaum des gleichen Hafens vom 3.11.2000 enthielt alle drei, also Microcystin-RR, Microcystin-YR und Microcystin-LR. Zusammengenommen lagen sie in einer Konzentration von 143,8 µg pro Liter vor.

In der Reihe der Proben aus den Cyanobakterien-Rasen und den Konglomeraten, gebildet aus fädigen Cyanobakterien, die zwischen dem 13. Oktober 2000 und dem 22. Februar 2001 der renaturierter Aa und dem neuem Aasee entnommen worden waren, konnten dagegen keine Microcystine nachgewiesen werden.

### **Kap. Ib3: Gesundheits-Gefährdung durch die Cyanobakterien-Toxine im Aasee**

Unter diesem Punkt sind zunächst qualitative Aussagen über die Gesundheitsgefährdung von Mensch und Tier zu machen. Quantitative Aussagen fallen unter den nächsten Punkt „Gesundheits-Risiko“.

Obwohl die Problematik „Eutrophierung von Gewässern“ ganz allgemein schon seit einigen Jahrzehnten Anlass zu wachsender Sorge gibt, sind Cyanobakterien erst in allerletzter Zeit als ein zunehmend größer werdendes Problem erkannt worden und ihre Toxine als zu beachtendes Gefährdungspotential für die Gesundheit von Mensch und Tier in den Blickpunkt gerückt. Der Grund für das späte Erkennen dieser Gefahr ist in erster Linie nicht eine Folge eines bislang mangelnden Interesses der Wissenschaft an diesen Organismen und ihren gefährlichen Produkten, sondern es ist wohl so, dass es erst in den letzten Jahren (bzw. im letzten Jahrzehnt) infolge der stetig steigenden Nährstoff-Belastung der Gewässer in unseren

Breiten immer häufiger, immer langandauernder und immer massiver zu Vermehrung dieser Bakterien in den Gewässern gekommen ist.

Erst nachdem vor wenigen Jahren konkret akute Erkrankungen von Menschen und Tieren bis hin zu Todesfällen direkt auf bestimmte Toxine der Cyanobakterien zurückgeführt werden konnten und dies auch wissenschaftlich gesichert bewiesen werden konnte, setzte eine intensivere Forschung auf diesem Gebiet ein. Diese Zeit ist aber viel zu kurz, als dass zum jetzigen Zeitpunkt das wirkliche Ausmaß der Gesundheitsgefährdung durch Cyanobakterien und ihre Toxine klar erkennbar und sicher quantifizierbar sein kann. Zu vielfältig ist die Zahl der Gifte, die diverse Cyanobakterien produzieren, zu unterschiedlich ihre chemische Struktur und zu mannigfaltig sind die Mechanismen, über die diese Stoffe ihre gefährlichen Wirkungen ausüben (u.a. als Lebergifte, Nervengifte, Auslöser von Gastroenteritis, d.h. von Magen-Darm-Entzündungen, Auslöser von Entzündungen und Allergien der Haut, Tumor-Promoter).

Was zweifelsfrei feststeht, ist, dass alle bisher in Gewässern gefundenen Cyanobakterien-Toxine enorm giftig für die meisten Tiere, vor allem aber auch für den Menschen sind. Viele sind bereits in äußerst geringen Mengen extrem wirkungsvoll. Entsprechend hoch ist das Gefährdungspotential für die menschliche Gesundheit, das in ihnen steckt. Damit verwundert es nicht, dass sie auf der Liste „biologisch-chemischer Waffen“ gesetzt wurden.

Die jetzt im Aasee nachgewiesenen Cyanobakterien-Toxine, vor allem Microcystin-LR und Microcystin-YR, stellen wegen ihrer enorm hohen Giftigkeit folglich ohne Zweifel eine sehr ernst zu nehmenden Gefährdung für die Gesundheit von Mensch und Tier dar.

#### **Kap. Ib4: Ermittlung / Abschätzung der Gesundheits-Risiken, die von den Toxinen der Cyanobakterien im Aasee ausgehen**

Was diesen Punkt betrifft, gibt es ohne Zweifel noch einen enormen Forschungsbedarf. Ein gewisser Grundstock an Daten für eine solche Beurteilung ist aber dennoch vorhanden und in dem bereits zitierten, 1999 im Auftrag der WHO publizierten Buch „*Toxic Cyanobacteria in Water*“ von 27 weltweit auf diesem Gebiet tätigen Fachwissenschaftlern niedergelegt. Zudem erscheint zur Zeit eine neue Publikation mit dem Titel „*Health Risks caused by Freshwater Cyanobacteria in Recreational Waters*“ verfasst von Chorus, Falconer, Salas und Bartram, die uns als Manuskript vorliegt. Wichtig sind in diesem Zusammenhang natürlich auch die „*Empfehlungen zum Schutz von Badenden vor Cyanobakterien-Toxinen*“ veröffentlicht im Bundesgesundheitsblatt 7, 1997.

Als muss zunächst darauf hingewiesen werden, dass sich gegenwärtig für den Aasee alle diesbezüglichen Aussagen nur auf die Toxin-Gruppe der Microcystine stützen können. Es muss aber bedacht werden, dass im Aasee zusätzlich eine ganze Reihe von Cyanobakterien vorkommen, die u.U. zusätzlich noch ganz andere und anders wirkende, aber nicht minder giftige Toxine bilden können. Eine dieser Arten ist z.B. die ebenfalls große Kolonien und auch Flocken bildende Art *Aphanizomenon flos-aquae*. Dieses Bakterium kann u.a. die gefährlichen Nervengifte Anatoxin-a (LD<sub>50</sub> i.p. Maus 10 µg/kg Körpergewicht und Tag) und Saxitoxine bilden. Im Aasee trat und tritt *Aphanizomenon* immer wieder auf, auch in Massen-

blüten, oder war daran als Hauptart mit beteiligt (z.B. Ende August/ Anfang September 2000 oder in den großen Cyanobakterien-Flocken im Hafen, gefunden am 26. Sept. 2001).

### **Microcystine, ihre Wirkung, der Grad ihrer Giftigkeit und die Exposition**

Chemisch gesehen ist Microcystin ein zyklisch gebautes Heptapeptid. Dies ist der definierte Grundkörper, an dem eine Reihe unterschiedlicher Seitengruppen gebunden sein können. So kommt es zu der großen Zahl an chemischen Microcystin-Varianten von über 60. Die Microcystine sind chemisch/biochemisch gesehen äußerst stabile Substanzen. So lassen sie sich u.a. nicht durch Kochen zerstören (wie dies z.B. bei dem sehr gefürchteten Botulin der Fall ist). Von den Bakterien ins Wasser freigesetzt, überdauern diese Toxine oft über lange Zeit (Monate) und sind u.a. durch übliche Trinkwasseraufbereitungsverfahren (wie Filtrieren durch Sand/Kies, Bodenpassagen etc.) nicht aus dem Wasser zu entfernen.

Relativ gut erforscht ist die akute toxische Wirkung der Microcystine auf die Leberzellen (deshalb ihre Einordnung als Hepatotoxine). Gelangen Microcystine ins Blut, werden sie selektiv von bestimmten Strukturen (Rezeptoren) auf den Zellmembranen der Leberzellen gebunden und über Transportsysteme in die Zellen geschleust. Hochspezifisch verläuft der Transport über die Zellmembran bei Microcystin-LR. Geringste Konzentrationen, die so in die Zellen gelangen, blockieren irreversibel bestimmte Stoffwechselwege und bewirken die Zerstörung von Zellstrukturen. Die befallenen Zellen sterben ab. In diesem gesamten Vorgang liegt die hohe akute Toxizität der Microcystine begründet. Die Leber hat allerdings ein enormes Zellregenerations-Vermögen, warum dieses Absterben von Leberzellen nach außen zunächst nicht sichtbar wird. Erst wenn die Toxinkonzentration eine bestimmte Grenze erreicht, überschreitet schlagartig die Absterberate die Regenerationsrate der Leberzellen. Die Leber stirbt ab, was dann sehr schnell zum Tod des gesamten Organismus führt. Neben den Leberzellen sind u.a. Zellen der Niere besonders anfällig gegenüber Microcystinen, ebenso Dünndarmzellen und die Epithelzellen der Nasenschleimhäute.

Wie gelangen Microcystine in den Körper bzw. Blutkreislauf?

Kommt Microcystin-haltiges Wasser oder solches, das Microcystin-haltige Cyanobakterien enthält, in den Magen-Darm-Trakt, werden zwar die Bakterien, nicht aber die Toxine im Verdauungsprozess zerstört. Die Microcystine gelangen danach über die Darmschleimhaut in den Blutkreislauf und von dort in die Leber.

Während die normale Haut relativ undurchlässig für Microcystine ist, trifft dies für Schleimhäute nicht zu. Nachgewiesen wurde, dass Microcystin u.a. besonders gut und wirkungsvoll über die Schleimhäute der Nase ins Blut gelangt und dann mit einem ähnlich hohen Wirkungsgrad wie bei Injektion ins Bauchfell (intraperitoneal) wirkt. Zudem werden die Schleimhautzellen der Nase dabei stark geschädigt und sehr durchlässig für Anatoxin-a, das hoch-wirksame Neurotoxin, das u.a. von *Aphanizomenon* gebildet werden kann (Fitzgeorge et al., 1994). Die sehr niedrige LD<sub>50</sub> i.p. für Anatoxin-a mit 10 µg/kg Körpergewicht und Tag wurde bereits genannt; bzgl. Auftreten von *Aphanizomenon* im Aasee s.o..

### **Dosis-Wirkung-Beziehungen von Cyanobakterien-Toxinen**

**Akute Toxizität:** Wie bereits erwähnt, ist von allen bekannten Microcystinen das Microcystin-LR das akut giftigste dieser Toxine. Dies belegen eine Reihe von Tierversuchen. So wurden für dieses Microcystin bei Mäusen (intraperitoneal injiziert = i.p.) ein LD<sub>50</sub>-Werte

von 25 bis 150 µg pro Kg Körpergewicht und Tag bestimmt, mit einem allgemein akzeptierten Durchschnittswert von 50-60 µg/kg. Deutlich höher liegt dieser Wert bei oraler Applikation (LD<sub>50</sub> oral 2,5 – 5 mg/kg Körpergewicht und Tag). Ähnlich toxisch wie das Microcystin-LR ist das Microcystin-YR, während die Toxizität des Microcystins-RR etwa nur ein Zehntel der des Microcystin-LR beträgt.

Zu beachten sind aber in diesem Zusammenhang Befunde, die belegen, dass Rohextrakte aus Cyanobakterien der Art *Microcystis aeruginosa* (mit darin enthaltenen Gemischen von Microcystinen und anderen Stoffen) nach Verabreichung bis zu 170-fache höhere Giftigkeit als reines Microcystin-LR entfalten.

**Subakute Wirkungen** (bei wiederholter Applikation von subletalen Dosen):

Hierüber liegen bislang nur wenige gesicherte Untersuchungsergebnisse vor. Die wenigen zeigen aber, dass auch über längere Zeit aufgenommene sehr niedrige Dosen von Microcystin die Leber schädigen, vor allem die älterer Individuen. Auch gibt es Hinweise auf Störungen der Gehirnentwicklung während der Embryonalzeit.

Intensiv diskutiert wurde die Rolle von Microcystinen bei der Ausbildung und dem Wachstum von Tumoren. Während bislang keine Anhaltspunkte für eine Tumor-auslösende Wirkung gefunden wurden, wird neuerdings eindringlich vor der Gefahr der Wachstumsförderung von Tumoren durch Microcystine gewarnt (Microcystine als *tumor promoter*). Dass Microcystin-LR eine solche Fähigkeit hat, wurde u.a. an Mäusen (Wachstum von Tumoren der Haut), an Ratten (Wachstum von Lebertumoren) und an in Zellkultur befindlichen Leberzellen gezeigt. Insgesamt gesehen gibt es aber bezüglich der subakuten und chronischen Wirkung von Microcystinen noch viel Forschungsbedarf.

Auch die Fragen nach Unterschieden in der Wirkung bei unterschiedlichen Expositionstypen und unterschiedlicher Expositionsdauer lassen hier noch viele Fragen offen.

### **Ermittlung des Risikos von Gesundheitsgefährdungen durch Microcystine in Freizeitgewässern**

Generell gesehen ist zur Zeit eine Quantifizierung der Gesundheitsgefährdung durch diese Toxine noch äußerst schwierig. Zu dünn ist in den meisten Fällen die dafür notwendige Datenbasis. Eine Ausnahme bilden, mit Einschränkungen, die Microcystine. Vor allem beim Microcystin-LR sind einige wichtige Daten über die chronischen Wirkungen vorhanden. Auf dieser Basis wurde in der bereits zitierten WHO-Publikation von 1999 „*Toxic Cyanobacteria in Water*“ (vgl. dort S. 133) ein vorläufiger TDI-Wert (TDI = *tolerable daily intake*) erstellt. Danach gilt die Aufnahme von bis zu 0,04 µg Microcystin-LR pro Kg Körpergewicht und Tag als tolerabel. Bezogen auf einen erwachsenen Menschen mit 60 Kg Körpergewicht und einer gemittelten Wasseraufnahme von 2 Liter pro Tag wurde daraus für die Belastung von Trinkwasser mit Microcystin-LR ein vorläufiger Grenzwert von 1,0 µg pro Liter ermittelt. Dieser wurde veröffentlicht in den „*Guidelines for Drinking Water Quality*.“ Second Edition, Addendum to Volume 2, *Health Criteria and Other Supporting Information*. World Health Organization (WHO), Genf, 1998.

Was bedeuten die zitierten Befunde wissenschaftlicher Untersuchungen und die daraus abgeleiteten Eckwerte, Richtwerte, Dosis-Angaben, usw. für die Bewertung der Situation des Aasees im Sommer 2001 und die dort gemessenen Microcystin-Konzentrationen ?

Der Aasee ist natürlich kein Gewässer, das unmittelbar der Gewinnung von Trinkwasser dient. Der Aasee ist ein Gewässer, das zunächst als Wasserregulations- und Hochwasserschutzsystem angelegt wurde. Heute dient er aber vor allem auch als Freizeit- und Erholungsstätte für viele Menschen. Sport- und Freizeitaktivitäten auf und am Wasser stehen dabei im Vordergrund. Auch der Angelsport wird am See relativ intensiv ausgeübt (womit sich die Frage verbindet, ob die gefangenen Fische dann auch verzehrt werden).

Sportliche Aktivitäten auf dem Wasser finden natürlich besonders intensiv im Sommer statt. Gerade zu dieser Zeit entfalten aber die hier im Brennpunkt stehenden Cyanobakterien (wie *Microcystis* und *Aphanizomenon*) ihre massiven Wachstumsschübe. So erreichte die Bildung der hochtoxischen Microcystine im Aasee in 2001 im Hoch- und Spätsommer (August/September) ihren absoluten Höhepunkt.

Es gibt drei Wege, auf denen Cyanobakterien-Toxine bei sportlichen Aktivitäten im, am und auf dem Gewässer in den Körper des Menschen gelangen können (vor allem beim Baden):

1. Durch direkten Kontakt sensitiver und aufnahmefähiger Körperbereiche mit dem Wasser (vor allem sind dies Augen, Ohren, Mund, Nase, Rachen);
2. durch Inhalieren von Wasser, konkret von Aerosolen;
3. durch unbeabsichtigtes Verschlucken von Wasser (in der Regel der bedeutendste Weg einer Inkorporation).

Ein weiterer Weg könnte über den Verzehr von aus dem Wasser gefangenen Tieren (z.B. Fische) gehen, die in größeren Mengen Cyanobakterien-Toxine aufgenommen und diese in sich gespeichert haben, vor allem in ihren Innereien (z.B. in der Leber).

Damit stellen nicht nur von Cyanobakterien bevölkerte Trinkwasserreservoirs eine direkte Gefährdung menschlicher und tierischer Gesundheit dar, sondern auch solche Gewässer wie der Aasee, auf denen Freizeit- und Sportaktivitäten stattfinden (im übrigen finden sich auch in der wissenschaftlichen Literatur einige als gesichert erscheinende Angaben über entsprechende Vergiftungen im Zusammenhang mit Wassersport).

## Die Risikostufen einer Gesundheitsgefährdung

Sieben Fachleute aus drei Kontinenten (Falconer, I. et al) haben in Kapitel 5 der bereits mehrfach zitierten WHO-Publikation von 1999 unter der Überschrift „*Safe Levels and Safe Practices*“ sich eingehend mit der Problematik Cyanobakterien in Erholungs- und Freizeitgewässern befasst und machen Vorgaben für die Quantifizierung / Einordnung des Gefährdungsrisikos (vgl. Seite 161-170; bildlich dargestellt in Abb. 5.1 auf Seite 168, s. beiliegende Kopie). Diese Einstufungen sollen als Grundlage für eine Bewertung der Situation des Aasees im Spätsommer 2001 dienen. Im folgenden seien diese Stufen kurz dargestellt.

### 1. Die Stufe (Level) relativ geringen Risikos einer Gesundheitsgefährdung durch Microcystine

Die Dichte an Cyanobakterien liegt bei 20 000 Zellen pro ml (entsprechend einem Chlorophyll-a-Gehalt von 10 µg/l). Hier ist von einer mittleren Microcystin-Konzentration von **2-4µg pro Liter** als Richtwert und einem Höchstwert von **10 µg/l** auszugehen. Diese Stufe korrespondiert in ihrer Größenordnung mit dem vorläufigen Richtwert 1 µg/l der WHO-Trinkwasser-Richtlinie von 1998. Eine Gesundheitsgefährdung durch solche Microcystin-Konzentrationen wird demnach für unwahrscheinlich gehalten.



(Anzumerken ist aber: Allergische Effekte und Effekte der Irritation/Entzündung der Haut, ausgelöst durch zusätzliche Stoffe, die die Cyanobakterien produzieren, sind in diese Aussage nicht einbezogen. Solche Effekte wurden in zu beachtendem Ausmaß auch schon bei diesen weniger dichten Ansammlungen von Cyanobakterien beobachtet).

## **2. Die Stufe des moderaten Risikos einer Gesundheitsgefährdung durch Microcystine**

Bei einer Dichte von 100 000 Cyanobakterienzellen pro ml (entsprechend 50 µg Chlorophyll-a/l), die mehr oder weniger gleichmäßig im Wasserkörper verteilt sind, liegt der Richtwert der Konzentration an Microcystinen bei ca. **20 µg/l** (vor allem wenn *Microcystis aeruginosa* als Hauptart der Cyanobakterien-Blüte auftritt). Kommt *Planktothrix agardhii* darin als dominierende Art vor, können Microcystine einen Höchstwert von **50 µg/l** erreichen. Das Risiko einer Vergiftung durch Microcystine wird unter diesen Bedingungen als moderat eingestuft. Allerdings wird darauf hingewiesen, dass das Risiko bei dieser Microcystin-Konzentrationen für solche Menschen, die eine bereits geschädigte Leber haben (z.B. infolge Hepatitis B) schon als deutlich höher einzustufen ist.

## **3. Die Stufe des hohen Risikos einer Gesundheitsgefährdung durch Microcystine**

Nach Auftreiben der Cyanobakterien in die oberen Zentimeter des Wasserkörpers erreichen sie Dichten von bis zu 10 000 000 Zellen/ml (entsprechend 5 000 µg Chlorophyll-a/l). Dann ist von Microcystin-Konzentrationen von bis zu **2 000 µg/l** auszugehen. Diese Stufe hohen Risikos umfasst danach einen sehr großen Konzentrationsbereich des Toxins (50 – 2000 µg/l), was bei einer detaillierten Bewertung von konkreten Messwerten berücksichtigt werden sollte.

## **4. Die Stufe des sehr hohen Risikos einer Gesundheitsgefährdung**

Bei Aufrahmungen, Bildungen von Schäumen oder Teppichen von Cyanobakterien auf der Wasseroberfläche und deren Zusammenschieben in bestimmten Uferbereichen, Buchten etc. kommt es zu Zelldichten von bis zu 100 000 000 pro ml (entsprechend 50 000 µg Chlorophyll-a/l). Für diese Bereiche ist mit bis zu **20 000 µg Microcystine pro Liter** (also 20 mg/l) zu rechnen.

## **Zusammenfassung der Einstufung der Risiken einer Gesundheitsgefährdung durch das Wasser des Aasees**

Werden die Ergebnisse der Messung der Microcystin-Konzentrationen im Aasee des Jahres 2001 entsprechend der oben dargestellten Gefährdungs-Stufen eingeordnet, so ergibt sich folgendes Bild:

1. Nur eine Probe (nämlich die vom 17.10.01 am Übergang Aa-Aasee; vgl. Tab. 2) ist der Stufe „relativ niedriges Gesundheits-Risiko“ zuzuordnen. Alle anderen Proben enthielten deutlich mehr als 10 µg/l an Microcystinen und liegen damit auf den Stufen „höheren Risikos einer Gesundheitsgefährdung“.
2. In der Stufe „moderates Risiko“ gilt 20 µg/l Microcystine als Richtwert und 50 µg Microcystin/l als Höchstwert. Danach befinden sich sieben Aasee-Proben in dieser Gruppe. Bis auf eine (nämlich die vom 12.09.01 vom Übergang Aa zum Aasee mit 39,1 µg/l) wurden diese Proben in den ersten bzw. letzten Wochen des Untersuchungszeitraumes 18. Juli.-17. Okt. 2001 gezogen.

3. 16 der 24 in regelmäßigen Abständen aus dem Aasee entnommenen Wasserproben wiesen höhere Microcystin-Konzentrationen als 50 µg/l auf. Der höchste Wert wurde mit 893 µg/l für den 15. August 2001, der zweithöchste mit 579 µg/l für den 12. Sept. 2001 gemessen. Diese 16 sind entsprechend der oben beschriebenen Vorgaben der Stufe „hohen Gesundheits-Risikos“ zuzuordnen.
4. Die Mitte August 2001 im SCM-Hafen und im Hafen Overschmidt (bei intensiver Blüte von *Microcystis aeruginosa*) gemessenen Microcystin-Konzentrationen von durchschnittlich 1850 µg/l (s. Tab. 3 ) ordnen diesen Bereich des Aasees ebenfalls der Stufe „hohen gesundheitlichen Risikos“ zu, dies aber am oberen Rand zur Stufe des sehr hohen Risikos. Bereits der Durchschnittswert kommt also dem angegebenen Höchstwert von 2000 µg/l schon sehr nahe. Einzelne Werte erreichen ihn nahezu und bei einer Probe wird dieser Höchstwert mit 2175 µg/l sogar überschritten. Hier liegen die Werte letztlich schon im Übergangsbereich zur Stufe „sehr hohes Risiko“.
5. Die Proben, die am 1. Sept. 2001 aus den Aufrahmungen der Ufersäume vor den Aasee-Treppen und seitlich von der Mauer zur alten Mensa gezogenen wurden, sind alle auf der Risiko-Stufe „sehr hoher Gesundheitsgefährdung“ einzuordnen. Ihre durchschnittliche Microcystin-Konzentration liegt bei 13448 µg/l (s. Tab. 4). Der niedrigste Wert liegt bei 5680 µg/l, die Probe mit dem höchsten Wert sogar bei fast 29 mg/l. Dieser übertrifft damit den bislang aus der Literatur bekannten Höchstwert von fast 24 mg/l (gemessen in Berlin in der Moorlake der Havel am 31.08.1997; vgl. Chorus, I., 2000).
6. Die bislang untersuchten Proben des Jahres 2000, die Microcystine enthielten, liegen mit ihren Microcystin-Konzentrationen zwischen 80 und 145 µg/l (vgl. Tab. 5 ), also über dem Wert 50 µg/l und sind damit in der Stufe „hohen Risikos“ einzuordnen.

Zusammengefasst kann also gesagt werden: Ausgehend davon, dass die von Mitte August bis Mitte September 2001 gezogenen Proben den Zustand des gesamten Aasee-Wassers bezüglich Microcystin-Konzentration repräsentieren, war die Toxizität des Aasees über einen ganzen Monat der Stufe des „hohen Risikos einer Gesundheitsgefährdung“ zuzuordnen. Das Wasser des SCM-Hafen und der angrenzenden Bereiche des Hafens Overschmidt mit der von Mitte August bis Anfang September andauernden Cyanobakterien-Blüten lag im Grenzbereich von „hohem zu sehr hohem Risiko“. Die Aufrahmungen des Ufersaums vor den Aasee-Treppen (Ende August/Anfang September) bargen ein „sehr hohes Risiko der Gesundheitsgefährdung“ in sich.

Diese Einschätzung wird durch die Vorgaben der bereits zitierten Veröffentlichung im Bundesgesundheitsblatt 7 (S.261-264) von 1997 voll gestützt. Hier wird empfohlen, bei einem Chlorophyll-a-Gehalt des Wassers von größer 40 µg/l, was einem Microcystin-Gehalt von knapp 20 µg/l entspricht (also entsprechend dem Überschreiten der Stufe eines „moderaten Risikos“), Warnhinweise zu veröffentlichen und das Gewässer intensiv zu überwachen.

Ab 150 µg/l Chlorophyll-a soll dann die 2. Warnstufe ausgelöst werden und der Microcystin-Gehalt gemessen werden. Überschreitet dieser Gehalt 100 µg/l (= 0,1 mg/l), soll das Gewässer bzw. der Gewässerbereich für Wassersport, insbesondere natürlich für das Baden, wegen zu hohem Risiko einer Gesundheitsgefährdung gesperrt werden.

Der Aasee hatte bei Untersuchungsbeginn Mitte Juli 2001 bereits die Marke von 20 µg Microcystin pro Liter erreicht bzw. schon deutlich überschritten. Mitte August bis Mitte September lagen die Microcystin-Gehalte mit Ausnahme von zwei Proben deutlich über 100 µg/l, einige Werte übertrafen diese Marke sogar um das Vier- bis Neunfache. Mitte Oktober 2001 wurde die Marke von 20 µg/l mit Ausnahme der Probestelle am Übergang renaturierte Aa zum neuen Aasee immer noch überschritten (vgl. Tab. 2b).

## Lake profile

Figure 5.1 aus WHO-Publikation 1999, S. 168

## **Kap. II: Physiko-chemischen Begleituntersuchungen des Aasees 2001**

Um Aussagen über den jeweiligen Zustand des Aasees machen zu können, wurden jeweils parallel zu den Probenahmen für die Toxin-Bestimmungen an den drei Stellen des Sees (1. Übergang Aa zum neuen Aasee, 2. Bereich Torminbrücke/Ostseite und 3. Hafen Overschmidt vor dem äußersten Steg) Proben für eine chemische Analyse gezogen. Zusätzlich wurden vor Ort Lufttemperatur, Wassertemperatur, Sichttiefe, pH-Wert, Leitfähigkeit, Redoxpotential, sowie Sauerstoff-Gehalt und Sauerstoff-Sättigung gemessen.

### **Kap. IIa Physiko-chemische Kenngrößen des Aasees (Juli-Oktober 2001)**

#### **Luft- und Wassertemperatur**

Der erste Teil des Untersuchungszeitraumes (Mitte Juli-Ende August 2001) war geprägt von warmem bis sehr warmem, meist sehr sonnigen Hochsommerwetter. Insgesamt gesehen war diese Zeit sehr niederschlagsarm. Unterbrochen wurde diese Phase nur für einige Tage in der ersten Augushälfte, die etwas kühler und leicht regnerisch waren. Ab Mitte August bis etwa zum 25./26. August überschritten die Tageshöchsttemperaturen wiederholt die 30°C-Marke. Nach dem 26. August klang die Hitzewelle langsam ab, nennenswerte Niederschläge gab es aber erst ab dem 3. September.

Die Abbildungen 5 bzw. 6 zeigen die Lufttemperaturen und die Wassertemperaturen, die bei den jeweiligen Probenahmen vor Ort gemessen wurden. Dabei ist zu beachten, dass die Mess- und Probenahmgänge immer zwischen 9 Uhr morgens und 12 Uhr mittags stattfanden und dass diese immer am Beginn des neuen Aasees (Stelle 1) begannen und im Hafen Overschmidt endeten. Deshalb zeigen die Abbildungen die jeweils aktuellen Temperaturen vor Ort, nicht die Tageshöchsttemperaturen der Luft bzw. des Wassers.

Es zeigt sich, dass vor allem im alten Aasee fast über den gesamten August hin die Wassertemperaturen bereits in der Vormittagszeit an die Marke von 25 °C heranreichten. Erst in den letzten Augusttagen begannen sie langsam wieder abzusinken, unterschritten Anfang September die 20 °C-Marke und stabilisierten sich von Mitte September bis zum Ende des Untersuchungszeit am 17. Oktober auf einem Niveau von etwa 15 °C.

Für Binnengewässer unserer Region sind Wassertemperaturen von 25 °C und mehr schon als sehr hoch zu bezeichnen. Deren Überschreiten kann nach unseren Beobachtungen in eutrophen Gewässern sehr schnell zu massivem Absterben von Planktonorganismen führen. Dies seinerseits stellt in einem sehr stark eutrophierten (hypertrophen) Gewässer in der Regel dann den Auslöser des Vorgangs des „Umkippens“ eines Gewässers dar.

#### **Sichttiefe**

Von Mitte Juli bis Mitte August lagen die Sichttiefen mit einer Ausnahme (18.07.2001, Hafen Overschmidt) im Aasee zwischen 35 und 40 cm. Danach sanken sie überall drastisch ab. Zwischen 29. August und 3. September wurden an allen drei Standorten Sichttiefen von nur noch 14 bis 20 cm gemessen. Danach stiegen sie bis zum Ende der Untersuchung wieder an, und zwar in einen Bereich zwischen 35 und 55 cm (vgl. Abb. 7). Damit lag die Sichttiefe in gleicher, extrem niedriger Größenordnung wie im Vorjahres, wobei sie in ihren Extremwerten Ende August/Anfang September noch einige Zentimeter geringer war als zur gleichen Zeit des Jahres 2000.



## **Leitfähigkeit**

Die Werte für die Leitfähigkeiten des Aasee-Wassers im Untersuchungszeitraum Juli-Oktober 2001 mit ca. 500 und 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  unterscheiden sich nicht signifikant von denen der Vergleichsmonate des Vorjahres (Abb. 8).

## **pH-Werte**

Während es bis Mitte August 2001 wieder zu einem starken Anstieg des pH-Wertes im Aasee kam, am 15. August wurde an der Torminbrücke um 11 Uhr bereits ein Wert von 9,22 gemessen, kam es in der letzten Augustwoche zu einem abrupten, starken Absinken der pH-Werte bis in den Bereich von  $\text{pH} = 8$  (31.Aug. – 12.Sept. 2001). Im gleichen Zeitraum des Vorjahres (2000) wurden dagegen gerade um den 31. August die höchsten pH-Werte mit über  $\text{pH} = 9$  gemessen.

Nach dem starken Absinken kam es 2001 dann aber bis Ende September wieder zu einem deutlichen Ansteigen des pH-Wertes. So wurde am 26. September 01 im Hafen Overschmidt wieder ein pH-Wert von fast 9,2 erreicht. Ähnlich hohe Werte waren interessanterweise im Aasee auch am 24.09.2000 gemessen worden. Ähnlich wie Mitte Oktober 2000 waren auch am 17. Okt. 2001 die pH-Werte mit Werten um  $\text{pH} = 8,6$  noch sehr hoch (s. Abb. 9).

## **Redoxpotentiale**

Die Höhe dieser Potentiale lag mit Werten im Bereich 350 bis 450 mV von Mitte Juli bis Mitte August 2001 zunächst einmal auf gleichem Niveau wie zu Beginn der Messungen Mitte August 2000. Während sie auf dieser Höhe im Jahr 2000 aber bis weit in den Oktober hinein verblieben, fielen sie nach Mitte August 2001 in der oberen Wasserschicht auf ein Niveau knapp über 250 mV ab, wo sie auch Mitte Oktober noch lagen (s. Abb. 10). Im Jahr zuvor fielen diese Potentiale im Aasee erst in der letzten Oktoberwoche auf dieses relativ niedrige Niveau.

Der Abfall bereits in der zweiten Augushälfte 2001, wie auch der Abfall des pH-Wertes zur gleichen Zeit, hat direkt etwas mit dem dort einsetzenden Prozess des „Umkippens“ des Sees zu tun. Hierauf soll in einem gesonderten Punkt weiter unten noch ausführlicher eingegangen werden, wie auch auf die in diesem Zusammenhang stehenden Werte der Redoxpotentiale, die Ende August/Anfang September in den tieferen Wasserschichten des Aasees gemessen wurden.

## **Sauerstoff-Gehalt und Sauerstoff-Sättigung**

Während im Jahr zuvor der Aasee im Vergleichszeitraum (also bis Ende Oktober 2000) immer einen hohen bis sehr hohen Sauerstoffgehalt aufwies, d.h. Gehalte, die einer hohen bis sehr hohen Sauerstoffsättigung entsprachen (sprich Übersättigung bis 200 % und mehr, was im übrigen auch schon bei all den früheren Untersuchungen gefunden worden war und immer auch für den gesamten Wasserkörper bis hinunter zum Gewässerboden galt), fand sich im Jahre 2001 erstmalig eine Zeit mitten in der Vegetationsphase, in der im Aasee-Wasser sogar an der Wasseroberfläche deutlicher bis sehr deutlicher Sauerstoffmangel gemessen wurde (s. Abb. 11).

Nachdem zunächst von Mitte Juli bis zum 22. August 2001 der Aasee mit Sauerstoff gesättigt bzw. deutlich übersättigt war, war dies ab den letzten Augusttagen bis einschließlich dem Messtag 12. September nicht mehr der Fall. Die Sauerstoff-Gehalte fielen an der Wasseroberfläche Ende August/Anfang September bis zu Werten ab, die weniger als 50 %-Sättigung entsprachen. Erst beim Messen am 26. September war an der Wasseroberfläche wieder überall Sauerstoffsättigung erreicht, wobei im Hafen Overschmidt dann allerdings schon wieder eine deutliche Übersättigung vorlag, woran sich auch Mitte Oktober nichts geändert hatte (s. Abb. 12).

Wie beim Redoxpotential kam es beim Sauerstoffgehalt bzw. bei der Sauerstoffsättigung Ende August/Anfang September in den tieferen Wasserschichten noch zu einem weiteren drastische Absinken, über ein paar Tage sogar auf Nullwerte (siehe gesonderter Punkt weiter unten).

### **DOC: Gehalte an gelösten organischen Kohlenstoff-Verbindungen**

Wie bereits früher gefunden, war die Konzentration an gelösten organischen Kohlenstoffverbindungen auch 2001 im Aasee zunächst im Sommer relativ hoch. Zum Herbst hin nahm sie dann wie im Jahre 2000 ab. Während Mitte Juli 2001 die Werte zunächst über 10 mg C/l lagen, gingen sie, zunächst mit Ausnahme im Hafen Overschmidt, ab der zweiten Augushälfte zurück. Ende September lag sie an allen drei Messstellen unter 6 mg Kohlenstoff pro Liter. (s. Abb. 13). Es sei darauf hingewiesen, dass der DOC-Grenzwert nach der Allg. Güteanforderung (AGA-NRW von 1991) bei 7 mg C/l liegt. Während der ersten Hälfte des Untersuchungszeitraumes 2001 lagen damit alle im Aasee gemessenen Werte über diesem Grenzwert.

### **Ammonium- und Nitritgehalte**

Die Größenordnungen, in denen sich die Ammonium- bzw. Nitrit-Konzentrationen des Aasee-Wassers im Untersuchungszeitraum des Jahres 2001 bewegten, entsprechen denen des Jahres 2000 (Ammonium bis 0,35 mg N/l und Nitrit bis ca. 0,1 mg N/l). Von der Höhe der gemessenen Konzentrationen trifft dies vor allem in der ersten und letzten Messphase des Jahres 2001 zu (s. Abb. 14 und 15). Interessant ist bei den Werten aus dem Jahr 2001 aber die Beobachtung, dass es von Mitte August bis Ende August/Anfang September bei beiden Stickstoffverbindungen zu einer deutlichen Abnahme im See kam. Mindestens tendenziell ist dies allerdings beim Nitrit auch aus den Daten des Jahres 2000 zu erkennen.

Dass, wie schon in den Jahren zuvor, die Nitrit- und Ammonium-Gehalte des Aasees wieder die durch die EG-Richtlinie 78/659 EWG für Fischgewässer vorgegebenen Grenz- bzw. Richtwerte überschreiten, sei an dieser Stelle nur noch einmal angemerkt.

Im Zusammenhang mit dem massenhaften Auftreten von Cyanobakterien im Aasee im Zeitraum der Untersuchungen sei darauf hingewiesen, dass beide Stickstoffverbindungen gerade in dem Zeitraum ihre niedrigsten Konzentrationen aufwiesen, in dem die Dichte der Cyanobakterien im Aasee besonders hoch war. Einige Cyanobakterien sollen die Fähigkeit besitzen, auch diese Verbindungen als Stickstoffquellen zu nutzen.

## Nitrat-Gehalte

Bereits in den Untersuchungen der Jahre 1993 und 1994 zeigte sich jeweils im Zeitraum Mitte Juli bis Mitte September ein starker Abfall der Nitratkonzentrationen im Aasee auf relativ niedrige Werte. Gleiches wurde auch im Jahr 2000 beobachtet. Die Befruchtung mit Nitrat durch die Aa war gleichzeitig aber recht hoch, was den Schluss nahe legte, dass das Nitrat nach Einstrom in den See sehr schnell in Biomasse gebunden wurde.

Während Mitte Juli 2001 an allen drei Messstellen noch Nitrat gemessen wurde, war im gesamten Monat August im See Nitrat nicht bzw. allenfalls in Spuren nachweisbar. Erst in der Zeit Mitte September bis Mitte Oktober stieg der Nitratgehalt überall im See wieder auf hohe Werte an (s. Abb. 16). Ab Anfang August war der Nitratgehalt auch am Übergang der renaturierten Aa in den neuen Aasee bereits auf Null. Über die Aa ankommendes Nitrat (gemessen auf der Höhe von Haus Kump) wurde folglich schon im renaturierten Aa-Bereich vollständig gebunden. Für 2001 muss in diesem Zusammenhang aber angemerkt werden, dass die Abflussmengen der Aa in diesem Zeitraum außergewöhnlich niedrig waren (z.T. betragen sie nur 20-25 % der niedrigsten im Vorjahr gemessenen Mengen).

## ortho-Phosphat-Gehalte

Phosphat gilt im Zusammenhang mit dem Wachstum von Cyanobakterien als besonders wichtiger Nährstoff. Wie in den frühen Untersuchungen gezeigt wurde, kommt dieser Nährstoff vor allem auch im Sommer in großen Mengen über die Zuflüsse in den Aasee. Die Untersuchung der Aasee-Sedimente des letzten Jahres haben aber auch gezeigt, dass sehr große Mengen an Phosphaten chemisch gebunden auf dem Boden des Sees liegen.

Wie Abb. 17 zeigt, waren die Phosphat-Gehalte im See Mitte Juli 2001 vergleichsweise niedrig, vor allem im alten Aasee, was wiederum auf eine Bindung durch die Planktonorganismen schließen lässt. Bereits Anfang August waren aber die Phosphat-Gehalte in allen Bereichen sehr stark erhöht und sie stiegen dann bis Ende August/Anfang September auf Höchstwerte von über 0,35 mg/l P an. Erst in der zweiten Hälfte des Monats September fielen sie wieder deutlich ab.

Das starke Ansteigen der Phosphat-Gehalte im See im Monat August ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf intensive Rücklösungsprozesse von Phosphaten aus den Sedimenten zurückzuführen. Besonders stark müssen diese in den letzten Tagen des August und ersten Tagen des Septembers gewesen sein. Gerade unter extremem Sauerstoffmangel in den unteren Wasserschichten löst sich aus den Sedimenten zuvor ausgefallenes Eisen(III)-Phosphat. Es geht in Eisen(II)-Phosphat über, das gut löslich ist. Dass dies offensichtlich der Fall war, zeigt der fast parallele Anstieg der Eisengehalte des Aasee-Wassers (vgl. Abb. 18).

Bliebe festzuhalten: Während im Zeitraum Anfang August bis Mitte September die Gehalte des Aasees an Nitraten 2001 fast bei Null lagen, waren die Konzentrationen des anderen wichtigen Nährstoffes Phosphat besonders hoch.

## **Kap. IIb: „Umkippen“ des Aasees Ende August-Anfang September 2001**

Nach unserem Kenntnisstand ist August-September 2001 zum ersten Mal eine Situation im Aasee dokumentiert worden, die eindeutig zeigt, dass es über mehrere Tage hin zu einem „Umkippen“ des Sees kam. Bei allen uns bekannten Beobachtungen und Messungen der letzten beiden Jahrzehnte, wurde nie eine Situation vorgefunden, in der es irgendwo im Wasserkörper zu einem deutlichen Sauerstoff-Mangel kam, geschweige denn zu einem völligen Fehlen von Sauerstoff. In der Regel war das Wasser in allen Tiefen während der gesamten Vegetationsphase deutlich bis sehr deutlich mit Sauerstoff übersättigt, eine direkte Folge der im See immer in extrem großen Dichten vorhandenen, photosynthetisch sehr aktiven Planktonorganismen und der geringen Tiefe, die fast eine ständige Durchmischung zulässt. Nicht nur die O<sub>2</sub>-Übersättigung des Wassers, sondern auch das über die gesamte Vegetationszeit starke Ansteigen des pH-Wertes (bis in den Bereich pH = 9.5) des Aasee-Wassers sind Folgen dieser extrem hohen Primärproduktion im See. Nur bei niedrigen Wassertemperaturen und wenig Sonneneinstrahlung wird diese abgebremst. Nährstoffe werden, wie die von 1992-1994 durchgängig durchgeführten Untersuchungen belegten, immer reichlich von außen nachgeliefert. Nährstoffmangel begrenzte diesen Vorgang das gesamte Jahr über also nicht, ganz im Gegensatz zu der Situation in anderen Seen unserer Breiten.

Während am 22. August 2001 überall starke O<sub>2</sub>-Übersättigung (bis über 200 %) gemessen wurde, fiel beim nächsten planmäßigen Messgang am 29. August 2001 plötzlich auf, dass an allen drei Messstellen das Oberflächenwasser deutlichen Sauerstoff-Mangel aufwies. Im Bereich Torminbrücke war es sogar nur zu 60% gesättigt. Auch der pH-Wert war deutlich abgefallen (vgl. Abb. 12 u. 9). Nachdem diese unerwarteten Befunde durch zusätzliche Untersuchungen im Labor bestätigt worden waren und mikroskopische Untersuchungen gezeigt hatten, dass die Massen von Tage zuvor im Plankton noch vorgefundenen Grünalgen und auch andere Phyto- und Zooplankter fast völlig abgestorben waren, wurden ab dem Abend des 30. August täglich Messserien mit Aufnahme von Tiefenprofilen im Rhythmus „abends – morgens“ durchgeführt (Sauerstoff-Sättigung, Redoxpotential, pH-Wert). Diese Messungen im engen Zeitabstand wurden am 3. September beendet, nachdem es in der Nacht zuvor zu Regnen begonnen hatte.

Für den Bereich Torminbrücke sind die Ergebnisse in den Abbildungen 19 bis 22 dargestellt. Sie entsprechen mit nur ganz leichten Abweichen denen, die im Hafen Overschmidt vorgefunden wurden.

Danach zeigt sich: Während am Abend des 30. August an der Oberfläche noch Sauerstoff-sättigung vorhanden war, tagsüber war es recht sonnig, lag der Wert bei 1 Meter Wassertiefe bereits unter 50 % Sättigung. Am darauf folgenden Morgen wies auch das Oberflächenwasser bis 50 cm Tiefe nur noch diesen niedrigen Wert auf. Knapp unter 1 Meter Wassertiefe war der Sauerstoff soweit aufgezehrt, dass die Messelektroden keinen Sauerstoff mehr anzeigten. Während sich zum Abend dieses Tages das System wieder etwas erholt hatte (oben gut 60 % unten gut 20 % O<sub>2</sub>-Sättigung), war bei den folgenden drei Messungen, also auch am Abend des 1. September, ab 1 Meter Wassertiefe kein Sauerstoff mehr nachweisbar, oben lagen die Werte zwischen ca. 40 und gut 60 % Sättigung. Wie Abb. 19 u. 21 zeigt, erholte sich das System nach Abkühlen und Einsetzen von Regen ab dem 3. September langsam wieder. Erkennbarer Sauerstoffmangel bestand aber noch am 12. September (vgl. dazu auch Abb. 11 u. 12).





**Foto 7:** Vor dem Nordufer des alten Aasees treibender toter Fisch; aufgenommen am Mittag des 31. August 2001; weiter zu erkennen: weißlicher Schaum, aufsteigende Gasblasen, viele kleine Aggregate von Cyanobakterien.

(Aufnahme: H. Keckevoet).

© Institut für Hygiene UKM Surholt, Mathys



Erkennbar, aber deutlich weniger stark reagierte der pH-Wert. Hier wurden an der Oberfläche Werte zwischen 8,6 abends und 8,2 morgens gemessen, in 1 Meter Wassertiefe zwischen 8,3 abends und 7,8 morgens.

Das ganze Geschehen repräsentiert sich vor sehr deutlich aber in den sehr niedrigen Werten für die Redoxspannung (s. Abb. 20 u. 22). Danach fielen in der unteren Hälfte der Wassersäule diese Werte bis unter den Bereich von 100 mV. Das zeigt auf, dass hier deutlich reduzierende chemische Prozesse die Oberhand hatten. Konkret, es kam unten im See, wie auch die Messungen bestätigen, zur anaeroben Rücklösung von Phosphaten, dies passiert schon bei ca. 200 mV, darüber hinaus kam es dann aber auch zu massiver Sumpfgasbildung. Überall im See stiegen Methangasblasen auf (s. Foto 5, 7 u. 8). Bei Erreichen von 100 mV kommt es auch zur Bildung von übel riechendem und sehr giftigem Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ). Dass der See in dieser Situation nicht gleich nach „faulen Eiern“ roch, liegt wohl an seinem durch die Phosphat-Rücklösung erhöhten Gehalt an Eisen-Ionen. Diese binden  $H_2S$  sehr effektiv. Erst, wenn die  $H_2S$ -Bildung infolge völligen Fehlens von Sauerstoff und totalen Absinkens des Redoxpotentials zu intensiv wird und alles Eisen als Sulfid ausgefällt ist, tritt dann der üble Geruch auf, der das endgültige Umkippen des Gewässers anzeigt. Soweit ist es aber in den ersten Septembertagen des Jahres 2001 nicht mehr gekommen. Abkühlen von Luft und Wasser und vor allem Einsetzen von Regen ab dem 3. September stoppten den Prozess des Umkippens.

Äußerlich war das Umkippen des Sees außer an der Methangasbildung und der Bildung von weißlichen Schäumen (beides u.a. auf Foto 7 bzw. 8 zu sehen) auch am Auftauchen einer ganzen Reihe von toten Fischen an der Wasseroberfläche zu erkennen, die nicht nur am Ufer (Foto 7 u. 8), sondern nach Berichten der Mitarbeiter der Segelschule Overschmidt vor allem auch draußen auf dem See treibend zu beobachten waren ( vom Morgen des 31.08. bis 3.09.). Ob deren Sterben nur durch Sauerstoffmangel verursacht wurde oder ob auch Einflüsse von toxischen Stoffen mitwirkten, bleibt hier ungeklärt

Der Fund von ca. 80 toten Fluss- und Teichmuscheln am Morgen des 3. September 01 unter den Gittern des Anlegers an der Torminbrücke ist möglicherweise auch in diesen Zusammenhängen zu sehen. Wegen der Fähigkeit der Muscheln, auch starken Sauerstoffmangel über Tage zu ertragen, kommt als Ursache für deren Tod aber eher die Aufnahme von Cyanobakterien und deren Toxine in Betracht. Sie nehmen ihre Nahrung durch Filtrieren auf. Damit konzentrieren sie die Bakterien und deren Toxine in ihrem Körper zwangsläufig in hohem Maße an, was nachgewiesenermaßen zu einer Vergiftung ihres Hepatopankreas führt und damit beim Überschreiten einer bestimmten Toxin-Dosis auch zum Absterben dieser Tiere.



**Foto 8:** Im östlichen Uferbereich des alten Aasees (gegenüber der alten Mensa) treibender toter Fisch; aufgenommen am Vormittag des 1. September 2001; auffällig die vielen „wasserlinsen-ähnlichen“ Aggregate aus Cyanobakterien auf der Wasseroberfläche und das Aufsteigen zahlreicher Gasblasen.

(Aufnahme: B. Surholt).

© Institut für Hygiene UKM Surholt, Mathys

## **Kap. IIc: Das massive Auftreten von Cyanobakterien im Aasee und die Rolle der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Gewässers**

Dass der Aasee aus einer ganzen Reihe von Gründen ein Gewässer ist, in dem Cyanobakterien sehr gute Lebens- und Wachstumsbedingungen vorfinden, wurde schon in früheren Untersuchungen herausgearbeitet. Die wichtigsten Gründe seien kurz noch einmal aufgelistet.

Zunächst einmal ist es die Struktur des Aasees. Er ist ein sehr flacher See, der gut sonnenexponiert ist. Beide Voraussetzungen führen dazu, dass sich der Wasserkörper während der gesamten Vegetationszeit (Frühjahr-Sommer-Herbst) sehr schnell und bis zum Gewässerboden hinunter erwärmen kann. Bestimmte Cyanobakterien (wie *Microcystis*) wachsen besonders gut bei Wassertemperaturen über 20 °C. Weiter ist es die niedrige Wasseraustauschrate und die geringe Strömungsgeschwindigkeit des Wassers. In der von 1992-1994 durchgeführten Untersuchung konnte gezeigt werden, dass in niederschlagsarmen Zeiten (also in der Regel im Sommer) die Verweildauer des Wassers auf über 70 Tage ansteigt. Vor allem die großen, im Wasser schwebenden Kolonien von Cyanobakterien können sich optimal entwickeln und werden höchstens sehr langsam fortgetragen.

Aus den oben angeführten Gründen war die Verweildauer/Austauschrate des Wassers im Aasee im August 2001 sogar besonders gering. Die Wassertemperaturen erreichten gleichzeitig durchgängig Temperaturen von 25 °C, für viele Cyanobakterien eine Optimaltemperatur, die gleichzeitig bei leichtem Überschreiten für die im Aasee vorkommende Plankton-Algen bereits sehr kritisch wird. Viele der Algen beginnen dann relativ schlagartig abzusterben, was wahrscheinlich der Auslöser des in diesem Jahr beobachteten „Umkippens“ des Sees war. Diese Algen stellen eine sehr große Biomasse dar. Stirbt diese ab, entfällt nicht nur deren Sauerstoffproduktion, es kommt darüber hinaus zu starkem Sauerstoffverbrauch bei der Zersetzung dieser Organismen. Folge ist Sauerstoffmangel bis hin zu völligem Fehlen von Sauerstoff. Diesem Schwinden des Sauerstoffs können die großen Mengen an Photosynthesebetreibenden Cyanobakterien nur sehr unzureichend entgegenwirken, allenfalls in der relativ dünnen Schicht unmittelbar unter der Wasseroberfläche, wo sie sich angesammelt haben.

Besonders wichtige weitere Faktoren sind die Nährstoffe. Hierbei spielt das Phosphat die wichtigste Rolle. Ganz besonders fördern hohe Phosphatgehalte das Wachstum der Cyanobakterien. Massenblüten dieser Organismen sind folglich vor allem auch die Folge der Überdüngung unserer Binnengewässer mit diesem Pflanzennährstoff. Strukturelle Gegebenheiten, insbesondere größere Wassertiefe, im Zusammenspiel mit biologischen Faktoren führen in den meisten anderen Seen im Laufe der Vegetationsphase zur Reduktion vor allem der Phosphatgehalte des oberen Wasserkörpers, nicht so im Aasee. Hier kann es nicht zu einem effektiven Sedimentieren von gebundenen Phosphaten in tiefere Wasserschichten und letztlich in tiefliegende Sedimente kommen. Wegen der zu geringen Wassertiefe kommt es, wie sich besonders bei den diesjährigen Untersuchungen zeigte, im Aasee immer wieder sehr schnell und sehr effektiv zu Phosphat-Rücklösung („Rückdüngung“) aus dem Sediment. Auch werden wegen weitgehenden Fehlens echter Ufervegetation und Unterwasserpflanzen kaum Nährstoffe in höheren Pflanzen gebunden. Auch der neu angelegte renaturierte Bereich der Aa nimmt diese Aufgabe bislang allenfalls sehr unzureichend wahr.

Für die Beurteilung der Rolle der Nährstoffe ist zudem wichtig, dass eine Reihe von Cyanobakterien-Arten die Fähigkeit haben, bei Eintreten eines Mangels an Stickstoffdünger (also an Nitrat), den Stickstoff der Luft als N-Dünger zu nutzen (vergleichbar den „Knöllchenbakterien“ der Leguminosen). Dies können andere photosynthetisch aktive Planktonorganismen nicht. Tritt dann eine Stickstoff-Mangelsituation auf und ist gleichzeitig

genügend Phosphat vorhanden, vermehren sich die Cyanobakterien konkurrenzlos, während die Dichte der anderen Arten abnimmt oder diese sogar ganz verschwinden. Eine solche Situation fand sich im Aasees während des gesamten Monats August 2001. Durch die sehr niedrige Abflussmenge der Aa in dieser Zeit wurden relativ wenige Nährstoffe in den See getragen und diese wurden von der im Wasserkörper vorhandenen Biomasse schnell aufgenommen. Frei gelöste Nährstoffe waren im Wasser dann zunächst kaum noch vorhanden. Durch die sehr starke Rücklösung von Phosphaten aus der „Phosphat-Reserve Sediment“ stand aber im See sehr schnell wieder reichlich Phosphat zur Verfügung, aber kein Nitrat. Dies war eine für ein weiteres ungehemmtes und vor allem konkurrenzloses Wachsen und Vermehren der Cyanobakterien äußerst vorteilhafte Situation.

### **Kap. II.d: Die physiko-chemischen Eigenschaften des Aasees, die die Bildung von Toxinen in den Cyanobakterien fördern**

Zu dieser äußerst günstigen Situation für das Vermehren und Wachsen der Cyanobakterien im Aasee kommt nun ganz offensichtlich auch noch hinzu, dass die vorgefundenen Bedingungen zusätzlich auch sehr deutlich die Produktion von Microcystinen (also der gefundenen Cyanobakterien-Toxine) fördern. Diesen Schluss lassen die Befunde von entsprechenden Laboruntersuchungen zu. Diese Befunde waren:

1. Eine Temperatur von 25 °C stellt die Optimal-Temperatur für die Toxin-Produktion durch *Microcystis* dar.
2. Ein weiterer, die Toxinproduktion fördernder Faktor ist ein erhöhter pH-Wert.
3. Erhöhte Phosphat-Konzentrationen im umgebenden Medium fördern ebenfalls die Microcystin-Produktion von *Microcystis*.

Diese drei eine Microcystin-Produktion fördernden Faktoren waren im August 2001 im Aasee gegeben.

Auch geeignete Lichtintensität und Lichtqualität förderten in Laboruntersuchungen die Toxinbildung. Diesbezüglich ist davon auszugehen, dass die 2001 im Aasee für die Toxinbildung verantwortlichen Cyanobakterien, die ja über die Fähigkeit verfügen, sich aktiv, durch Änderung und Anpassung ihres Auftriebes im diesbezüglich optimalen Bereich der Wassersäule einzuschichten (s.o.), diese Fähigkeit auch entsprechend nutzten.

Ferner war in Laborversuchen festzustellen, dass Cyanobakterien dann die meisten Toxine bilden, wenn sie in ihrer intensiven (logarithmischen) Wachstumsphase sind. Die Befunde der parallel durchgeführten mikroskopischen Untersuchungen zeigten, dass vor allem das Cyanobakterium *Microcystis* Mitte August 2001 im Aasee in einer intensiven Wachstumsphase war. Entsprechend hoch waren die Microcystin-Gehalte des Planktons, das z.B. am 15. August 2001 aus dem SCM-Hafens entnommen wurde. Hierin wurden bei einer Dominanz von *Microcystis* bis 1,7 mg Microcystine pro g Trockengewicht der Planktonmasse gemessen (vgl. dazu die entsprechenden Angaben in Fastner et al., 1999).

**Resümee:** Die im Untersuchungszeitraum 2001 vorgefundenen physikalischen und chemischen Eigenschaften des Aasee-Wassers förderten ganz offensichtlich nicht nur ganz stark das Wachsen und Vermehren von Cyanobakterien (hier vor allem das von *Microcystis*), sie waren darüber hinaus auch optimal für die Produktion von Toxinen (hier von Microcystinen) in den Zellen dieser Cyanobakterien.

**Literatur:**

Chorus, I. (1998): *Die Blaualgen („Cyanobakterien“) – eine Berliner Besonderheit in „Zukunft Wasser“*, Dokumentation zum Symposium zur Nachhaltigkeit im Wasserwesen in der Mitte Europas, Berlin 17. bis 19. Juni 1998, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie

Chorus, I. and Bartram J. (eds) (1999): *Toxic Cyanobacteria in Water – A Guide to their Public Health Consequences, Monitoring and Management*. Published on the behalf of World Health Organization by E & FN Spon, London

Chorus, I. (2000): *Impact of Toxic Cyanobacteria on Recreational Water Use – Contribution for the Xth World Water Congress, Melbourne, 11-17 March 2000*.

Chorus, I., Falconer, I.R., Salas, H.J. and Bartram, J. (2001): *Health Risks caused by Freshwater Cyanobacteria in Recreational Waters – J. Toxicol. Environ. Health (im Druck)*

Bundesgesundheitsamt (1997): *Empfehlung zum Schutz von Badenden vor Cyanobakterien-Toxinen*. Bundesgesundheitsblatt 7/97, 261-264

Fastner, J., Neumann, U., Wirsing, B., Weckesser, J., Wiedner, C., Nixdorf, B. and Chorus, I. (1999): *Microcystins (Hepatotoxic Heptapeptides) in German Fresh Water Bodies – Environ. Toxicol. 14, 13-22*

Fitzgeorge, R., Clark, S. and Keevil, C. (1994): *“Routes of intoxication”*. In: Codd, G.A., Jefferies, T.M., Keevil, C.W. and Potter, E. (eds.): *Detection Methods for Cyanobacterial Toxins*. The Royal Society of Chemistry, pp. 69-74.



# **A n h a n g**

**Graphische Darstellungen der Befunde**  
*Abbildungen 1 - 22*

**Daten der Gewässeranalysen**

und

**Befunde der Planktonuntersuchungen**  
*Mitte Juli bis Mitte Oktober 2001*

*(gehört nicht zum Manuskript)*

**Grenzwerte für Pestizide (EU und Deutschland) in Trinkwasser**

**Pestizide insgesamt:** 0,5 µg / Liter

Dabei dürfen einzelne den Wert 0,1 µg / Liter nicht überschreiten!

PAKs insgesamt: 0,2 µg / Liter (auch Wert der WHO)

Cancerogene wie Benzapyren: 0,01 µg / Liter