

Bericht Nr. 34

Limnologischer Zustand des Bodensees

Jahresbericht Januar 2006 bis März 2007
-Untersuchungsprogramm Freiwasser-

Bericht des Fachbereichs Einzugsgebiet
über das Jahr 2005 / 2006

VORWORT

Der vorliegende Bericht der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) enthält die Ergebnisse der regelmäßigen limnologischen Freiwasseruntersuchungen des Bodensees im Jahr 2006 / 2007. Die allgemeinen Grundlagen und limnologischen Zusammenhänge, die zum Verständnis dieses Berichtes notwendig sind, wurden im Bericht Nr. 9: Limnologischer Zustand des Bodensees - Grundlagen (2. Auflage, Stand 1993) dargestellt.

Am Bericht haben mitgearbeitet:

Dr. Hans-Rudolf Bürgi, Dübendorf
 Mag. Dietmar Buhmann, Bregenz
 Dipl. nat. ETH. Heinz Ehmann, Frauenfeld
 Dr. Hans Güde, Langenargen
 Dr. Harald Hetzenauer, Langenargen
 Dr. Reiner Kümmerlin, Langenargen
 Dipl.-Inform. Günther Kuhn, Langenargen
 Dipl.-Ing. Robert Obad, Langenargen
 Dr. Henno Roßknecht, Langenargen
 Dr. Heinz Gerd Schröder, Langenargen
 Dr. Hans Bernd Stich, Langenargen
 Dr. Thomas Wolf, Langenargen

Die Grundlage für den Bericht bildet das Langzeit-Untersuchungsprogramm der Kommission, an dessen Durchführung die folgenden Institutionen mitgewirkt haben:

Institut für Umwelt und Lebensmittelsicherheit des Landes Vorarlberg in Bregenz: Untersuchungen des Chemismus in der Bregenzer Bucht.

Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), Dübendorf, Fachabteilung Hydrobiologie/ Limnologie: Datenverarbeitung.

Amt für Umwelt des Kantons Thurgau, Frauenfeld:
 Terminfahrten, Messungen und Untersuchungen des Chemismus und des Phytoplanktons im Untersee-Rheinsee.

Institut für Seenforschung der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Langenargen:
 Terminfahrten, Messungen und Untersuchungen des Chemismus, des Phyto- und Zooplanktons im Obersee und Untersee-Zellersee, bakteriologische Untersuchungen, physikalische und sedimentologische Untersuchungen; Datenverarbeitung und Berichterstattung

Physikalisch-chemische Untersuchungen des Überlinger Sees an der Probenahmestelle zwischen Überlingen und Wallhausen wurden von der Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein (AWBR) und vom Technologiezentrum Wasser (TZW), Karlsruhe durchgeführt. Die Ergebnisse werden jeweils in

den AWBR-Jahresberichten veröffentlicht und sind daher hier nicht enthalten.

Der Deutsche Wetterdienst, Offenbach, stellte Daten der Wetterstation Konstanz für die Analyse der meteorologischen Situation des Obersees zur Verfügung.

	Abb.	Tab.	Seite
Einleitung			4
Zustandsbeschreibung für das Seejahr			5
	1		19
 Langfristige Entwicklung von			
Phosphor (Obersee), Sauerstoff (Obersee), Chlorid (Obersee), Stickstoff (Obersee), Phytoplankton (Obersee), Zooplankton (Obersee), Phytoplankton (Untersee, Zellersee)	2-5	1	64 20-17
 Obersee			
Witterung, Wasserstände, Temperatur, Sauerstoff, Orthophosphat, Andere Phosphorverbindungen, Nährstoffinhalte, Nitrat, Nitrit, Ammonium, Stickstoff partikulär, Silikat, Anorganische Kohlenstoffverbindungen, Eisen, Mangan, Phytoplankton, Zooplankton, Bakterienplankton	6-31	2	68 24-39
 Untersee			
Zellersee Thermik, Sauerstoff, Orthophosphat, Nährstoffinhalte, Eisen, Andere Phosphorverbindungen, Nitrat, Nitrit, Ammonium, Silikat, Anorganische Kohlenstoffverbindungen, Phytoplankton	32-51	4	72 40-50
 Rheinsee Thermik, Sauerstoff, Orthophosphat, Nährstoffinhalte, Eisen, Andere Phosphorverbindungen, Nitrat, Nitrit, Ammonium, Silikat, Anorganische Kohlenstoffverbindungen, Phytoplankton	52-72	5	74 51-62
 Vergleich des limnologischen Zustandes an verschiedenen Untersuchungsstationen			
Obersee		3	70
Untersee		6	76
 Anhang			
Bericht des Fachbereichs Einzugsgebiet über das Jahr 2005 / 2006			78
 Auskünfte			84

EINLEITUNG

Der Bericht zum Seejahr 2006 / 2007 enthält eine kurze Beschreibung und Bewertung des aktuellen Seezustandes, ergänzt durch die Darstellung der langfristigen Entwicklung der wichtigsten Größen. Sie werden von Jahr zu Jahr fortgeschrieben.

Die dann folgenden Abbildungen und Tabellen geben eine Übersicht über Örtlichkeiten, Wassertiefe und Zeitpunkt der Probenahme und Messungen sowie über Klimabedingungen, Temperatur, chemische und biologische Verhältnisse im Freiwasser. Für den Bodensee-Obersee beschränken sich diese Darstellungen hauptsächlich auf die zentrale Untersuchungsstation Fischbach-Uttwil. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungsstelle wurden auch die Stoffinhalte unter Verwendung der Seevolumina berechnet, die sich aus der Tiefenvermessung von 1990 ergeben haben. Quervergleiche zwischen verschiedenen Obersee-Untersuchungsstationen werden nur für einige ausgewählte Parameter durchgeführt. Seit Januar 2000 werden die Untersuchungen nach dem überarbeiteten Programm für die Langzeituntersuchungen durchgeführt, wie es im Anhang des Grünen Berichtes Nr. 26 beschrieben wurde.

Für den Bodensee-Untersee werden die Zustände im Zellersee und Rheinsee behandelt. Für die Tabellen wurden charakteristische Summenwerte, z. B. der Stoffinhalt des ganzen Sees, eines Seeteils oder bestimmter Wasserschich-

ten sowie Konzentrationsmaxima und -minima in der Oberflächenschicht oder über dem Seeboden ausgewählt.

Die Datentabellen mit den gesamten Meßwerten für den Freiwasserbereich (Physik, Chemie, Phytoplankton) wurden nach Archivierung auf Datenträgern bei der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) und beim Institut für Seenforschung (ISF) der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, den damit direkt befassten Stellen zugestellt. Nachdem die datentechnischen Umstrukturierungen im Jahr 2001 abgeschlossen werden konnten, werden die Daten der IGKB nun in einer zentralen Datenbank BOWIS am Institut für Seenforschung archiviert.

Das jeweilige limnologische Zustandsbild des Freiwassers wird stark durch die Witterungserscheinungen geprägt. Zustandsänderungen von Jahr zu Jahr dürfen daher nicht von vornherein als Ausdruck einer Entwicklungstendenz interpretiert werden. Dazu sind längere Zeitreihen in Form von Trendkurven notwendig. Dies ist beim Vergleich der Verhältnisse aufeinanderfolgender Jahre zu beachten. Zur langjährigen chemischen und biologischen Entwicklung im Freiwasser des Bodensees wird auf die Blauen Berichte Nr.37 (1987: Crustaceenplankton), 39 (1989: Phytoplankton) und 48 (1998: chemische Parameter im Bodensee-Obersee) verwiesen.

Zustandsbeschreibung für das Seejahr 2006/07

Bodensee - Obersee

Im Seejahr 2006/07 lag die Phosphorkonzentration wie im Vorjahr bei 8 mg/m³. Der Gehalt an anorganischem Stickstoff - im wesentlichen Nitrat - stieg leicht von 0,94 auf 0,98 g/m³. Die Biomasse des Phytoplanktons lag 2006 mit 8,5 g/m² unter dem Vorjahreswert (9,5 g/m²).

Die mittleren monatlichen Sauerstoffgehalte in 200-254 m Tiefe lagen von Januar bis Anfang August 2006 stets über den Werten des Vorjahres. Ab August 2006 wurden die Sauerstoffkonzentrationen der jeweiligen Vorjahreswerte aber nicht mehr erreicht. Das herbstliche Sauerstoffminimum über Grund in 254 m Tiefe war 2006 mit 7,3 g/m³ etwas geringer als im Vorjahr (7,5 g/m³).

Die **hydrologische Situation** des Bodensees wurde im Seejahr 2006/2007 durch die in diesem Zeitraum auftretenden meteorologischen Extreme geprägt. Zum einen gab es eine ungewöhnlich lange und kalte Auskühlungsphase, die im Dezember 2005 begann und sich mit unterdurchschnittlich niedrigen Temperaturen bis März 2006 fortsetzte. Zum anderen folgte dieser lang-

anhaltenden Kältephase eine Periode sehr warmer Monate, die mit Ausnahme August 2006 alle überdurchschnittlich hohe Monatsmitteltemperaturen aufwiesen. Das Resultat der Auskühlungsphase Anfang 2006 war eine weitestgehende Durchmischung der Wassersäule Anfang bis Mitte März 2006, wobei mit Temperaturdifferenzen von maximal 0,1°C über die gesamte Wassersäule nahezu Homothermie erreicht wurde und sich auch die Unterschiede in der Leitfähigkeit mit $dS < 5$ S/cm auf sehr niedrigem Niveau bewegten. Durch die bereits genannten sehr niedrigen Temperaturen in den Monaten Januar, Februar und März mit jeweiligen Temperaturmittelwerten von -1,7°C (2,2 °C unter 30-MW), 0,6°C (1°C unter 30-MW) und 3,4°C (2,2°C unter 30-MW) kam es zu einer extremen Abkühlung der gesamten Wassersäule mit Hypolimniontemperaturen, die sich nahe dem theoretischen Tiefstwert für das Dichtemaximum in dieser Tiefe bewegten.

Aufgrund der demgegenüber nur leicht überdurchschnittlich wärmeren Lufttemperaturen in April und Mai 2006 mit mittleren Monatstemperaturen, die 0,6 Grad bzw. 0,2 Grad über dem 30-jährigen Mittelwert lagen, entwickelte sich die thermische Schichtung des Sees danach moderat und hatte Mitte Mai,

bei einer Dicke der durchmischten Oberflächenwasserschicht von etwa 10 m, bereits Oberflächentemperaturen von 13,3 °C erreicht. Durch einen in der zweiten Maihälfte erfolgten Temperaturrückgang, der mit stärkerem Windaufkommen verbunden war, kam es danach im See zu einer oberflächlichen Abkühlung auf Temperaturen von 9°C und der Absenkung des Metalimnion-Hypolimnion-Überganges auf etwa 20 m. Demgegenüber war im Vorjahr 2005 die Absenkung der Metalimnionsschicht zu diesem Zeitpunkt bereits auf 35 m vorangeschritten.

Im Anschluß daran wurde das Stratifizierungsgeschehen im See durch das weit überdurchschnittlich warme Wetter des Jahres 2006 bestimmt. Während der Monate Juni und Juli wurden Monatsmitteltemperaturen gemessen, die 1,7°C bzw. 4,6°C über dem 30-jährigen Mittelwert lagen und eine zügige Erwärmung des Sees zur Folge hatten, der am 14.06.2006 eine Oberflächentemperatur von 18,2°C und am 5.07.2006 bereits eine Temperatur von 22,7°C aufwies. Im Lauf des Monats August hingegen, der mit 15,7°C als einziger der folgenden Monate unterdurchschnittliche Lufttemperaturen (3,2°C geringer gegenüber dem 30-jährigen Mittelwert) aufwies, gingen die Oberflächentemperaturen auf das Niveau von Mitte Juni zurück, während die Untergrenze des Metalimnions auf etwa 40 m absank. Aufgrund der sehr hohen Lufttemperaturen im September und Oktober (2,9°C

bzw. 3,2°C über 30-jährigem Mittel) blieb dieser Schichtungszustand im wesentlichen unverändert bis Ende Oktober erhalten, wobei die Oberflächentemperatur in diesem Zeitraum bis auf 14,3°C am 25.10.2006 zurückging – eine für diese Jahreszeit außergewöhnlich hohe Temperatur. Aufgrund der auch im November und Dezember sowie im Januar überdurchschnittlichen Monatsmitteltemperaturen (2,9°C, 1,6°C und 4,7°C über langjährigem Mittelwert) blieb eine für diese Jahreszeit deutliche thermische Stratifizierung erhalten, bei der erst Ende Januar eine Absenkung des Metalimnion-Hypolimnion-Überganges auf 150 m zu beobachten war, während in Wassertiefen bis 40 m immer noch Temperaturen über 5°C auftraten. Diese Situation änderte sich bis März bei gleichbleibend überdurchschnittlichen Lufttemperaturen nur wenig, so dass Anfang März 2007, ohne dass auch nur annähernd eine Homothermie erreicht wurde, bereits der neue Stratifikationszyklus des Sees begann. Die Kombination aus extrem starker Abkühlung im Winter 2005/2006 zusammen mit den außergewöhnlich hohen Temperaturen im Winter 2006/2007 sorgte dafür, dass keine vollständige Durchmischung im See erreicht werden konnte.

Ebenso wie im Winter 2005/2006 wurden auch im Winter 2006/2007 geringe Wasserstände erreicht, die in den Monaten Januar-März 2007 nahezu aus-

nahmslos niedriger ausfielen, als die langjährigen Mittelwerte, jedoch wurden keine Extremwerte unter 250 cm erreicht wie im Vorwinter.

Die Konzentration des **Gesamtphosphors** im Freiwasser betrug im Frühjahr 2007 während der Monate Februar bis April im Mittel 8 mg/m^3 (Abb. A, Konzentration während der Vertikalzirkulation). Damit blieb die Phosphorkonzentration während der Zirkulationsphase gegenüber dem Vorjahr konstant (2005: 9 mg/m^3 ; 2004: 10 mg/m^3 ; 2003 und 2002: 12 mg/m^3).

Der **Orthophosphat - Phosphor** lag von Anfang April bis Dezember 2006 in den oberen Schichten bis in Tiefen von 30-50 m meist unter 2 mg/m^3 . Das volumengewichtete Mittel von 0 bis 30 m entsprach in diesem Zeitraum mit $0,9 \text{ mg/m}^3$ dem Wert des Vorjahres.

Der **anorganische Stickstoff** (Nitrat-, Nitrit- und Ammoniumstickstoff) mit Nitrat als Hauptkomponente stieg 2006 im Jahresmittel leicht auf $0,98 \text{ g/m}^3$ (Vorjahr: $0,94 \text{ g/m}^3$; Abb. C).

Chlorid als Indikator vielfältiger Salzbelastungen erhöhte sich im Jahresmittel von $5,5$ (2005) auf $6,0 \text{ g/m}^3$ (Abb. C).

Die **Sauerstoffgehalte** im Hypolimnion des Obersees von 200 - 254 m Tiefe lagen von Januar bis Anfang August 2006 stets über den Werten des Vorjahres.

Nach der anhaltenden Schönwetterphase im Juni und Juli 2006 wurde eine verstärkte Sauerstoffzehrung im tiefen Hypolimnion festgestellt. Bis zum Jahresende blieben in der Folge die Sauerstoffkonzentrationen im Hypolimnion unter den Vorjahreswerten.

Die ungewöhnlich milden Temperaturen Anfang 2007 verursachten eine der unvollständigsten vertikalen Durchmischungen seit Beginn der Aufzeichnungen vor 45 Jahren. Dadurch fiel die erwartete Sauerstoffholung in der Tiefe nicht nur aus, sondern die Konzentrationen des Sauerstoffs nahmen von Januar bis April 2007 sogar leicht ab. Dank der inzwischen erreichten geringeren Sauerstoffzehrungsraten infolge der niedrigen Phosphorkonzentrationen liegt der derzeitige Sauerstoffgehalt deutlich über dem Niveau früherer zirkulationsschwacher Jahre. Dies spiegelt sich auch im gesamten Sauerstoffinhalt des Obersees wieder, der in den Monaten März und April 2007 mit 520 000 Tonnen nur wenig unter dem Vorjahreswert (533 000 Tonnen) lag.

Die niedrigste einen Meter über Grund gemessene Sauerstoffkonzentration war 2006 mit $7,3 \text{ g/m}^3$ etwas geringer als im Vorjahr ($7,5 \text{ g/m}^3$). Sie wurde Anfang November erreicht (Abb. B).

Das **Phytoplankton** im Bodensee-Obersee erreichte 2006 im Jahresmittel eine Biomasse von $8,5 \text{ g/m}^2$ (0-20m) und

liegt damit etwas niedriger als im Vorjahr. In den vergangenen Jahren wurden folgende Werte festgestellt: 2005: 9,5 g/m², 2004: 8,4 g/m², 2003: 9,2 g/m² (0-20 m). Nach den hohen Werten in der zweiten Hälfte der siebziger Jahre und in den achtziger Jahren fiel die Gesamtbiomasse des Phytoplanktons innerhalb weniger Jahre schnell ab und hat sich inzwischen auf niedrigerem Niveau stabilisiert. Seit 16 Jahren schwankt die Biomasse zwischen 13,4 g/m² (1996) und 6,7 g/m² (2001) Der Mittelwert der letzten acht Jahre liegt bei 9,2 g/m².

Die Phytoplankton-Entwicklung wich 2006 stark vom Muster der Vorjahre ab; so setzte sich der in den letzten Jahren beobachtete Trend zu niedrigeren Frühjahrsblüten nicht weiter fort. Außerdem begann auf Grund des langen und kalten Winters die Frühjahrsblüte 2006 erst Ende April; also wesentlich später als im Vorjahr. Sie erreichte ihren Höhepunkt Mitte Mai mit 33,6 g/m²; dieser Wert ist mehr als doppelt so hoch wie im Vorjahr. Ein ausgeprägtes Klarwasserstadium fand 2006 im Gegensatz zum Vorjahr nicht statt, die Biomasse sank lediglich wieder ab auf einen Wert von 7,6 g/m², der Ende Mai erreicht wurde. Die Biomasse verharrte von Mitte Juni bis Anfang November auf Werten zwischen 8,2 g/m² und 11,3 g/m²; das heißt, es folgten keine Sommer- und Frühherbstmaxima wie in den meisten Jahren. Ende November wurde noch einmal ein kleines Spätherbstmaximum von 13,3 g/m²

erreicht; danach sank die Biomasse wieder ab auf das jedes Jahr zu beobachtende Winterminimum, das im Dezember Werte zwischen 5,5 und 7,5 g/m² erreichte.

Die zentrischen Kieselalgen traten 2006 wie in den vier Vorjahren während des Frühjahrsmaximums stark in den Hintergrund, erreichten jedoch von Februar bis Ende März beträchtliche Anteile an der Biomasse. Dominierend waren während des Winters erstmals *Stephanodiscus alpinus* als euryöke Form, während der Frühjahrsblüte *Cyclotella cyclopuncta* als dezidierte Oligotrophierungsanzeiger. Die pennaten Kieselalgen traten während des Frühjahrsmaximums, von Mai bis Anfang Juli und im November stark in den Vordergrund. Während des Frühjahrsmaximums dominierte *Fragilaria ulna* var. *acus*, im November *Fragilaria crotonensis*. Cryptomonaden erreichten das ganze Jahr über größere Anteile an der Biomasse; sie dominierten das Planktonbild aber lediglich im Dezember. Die Dinoflagellaten dominierten mit *Ceratium hirundinella* von August bis Oktober; während des Septembers bildeten sie den größten Teil der Gesamtbiomasse. Die Chrysophyceen erreichten im Mai mit *Erkenia* und von Juli bis August mit *Dinobryon* und *Mallomonas* nennenswerte Anteile an der Biomasse. Coccale Grünalgen, die höhere Nährstoffkonzentrationen bevorzugen, erreichten wie bereits in den vier Vorjahren das ganze Jahr über nur noch einen

unbedeutenden Anteil an der Biomasse. Fädige und coccale Blaualgen wurden wie in den Vorjahren kaum noch beobachtet.

Der Jahresmittelwert des **Crustaceenplanktons** lag 2006 niedriger als im Vorjahr. Die Abnahme der Mittelwerte liegt zwischen 17 % (Daphnien) und 50 % (*Eudiaptomus gracilis*). Lediglich bei der heterogenen Gruppe der "übrigen Cladoceren" stieg der Jahresmittelwert um 40%.

Abgesehen von einem hohen Wert im Januar (34300 Ind/m²) waren die Individuendichten der Daphnien bis einschließlich Mai niedrig (<14000 Ind/m²). Von Juni bis September stiegen die Werte an, sie lagen zwischen 140000 und 165000 Ind/m². Ab Oktober lagen die Individuendichten wieder unter 32000 Ind/m². Im Vergleich zu 2005 waren die Individuendichten im Früh- und Spätsommer niedriger (-20 bis -85 %), in den Monaten Juni und Juli waren sie 24 % bzw 58 % höher.

Die Bestände der heterogenen Gruppe "übrigen Cladoceren" (*Bosmina*, *Bythotrephes longimanus*, *Leptodora kindtii* und *Diaphanosoma brachyurum*) lagen bis einschließlich April zwischen 1500 Ind/m² und 8800 Ind/m², ab Oktober war die Individuenzahl wieder unter 4200 Ind/m². Während das Maximum der Daphnien erst im September auftrat, lag das Individuenmaximum der

"übrigen Cladoceren" bereits im Juni (52500 Ind/m²). Auch die Individuendichten im Juni und Juli waren höher als 2005 (210 % bzw. 187 %).

Sowohl bei den Daphnien als auch bei den übrigen Cladoceren waren die hohen Individuendichten im Januar und Februar auffällig, die deutlich höher waren als in den entsprechenden Monaten 2005.

Sowohl bei den adulten Tieren als auch bei den Copepodiden von *Eudiaptomus gracilis* waren die Individuendichten 2006 grundsätzlich niedriger. Die Abnahme betrug bis zu 92 % (adulte Tiere, März) bzw. 91 % (Copepodide, April). Das Maximum der Individuendichte der adulten Tiere lag im Februar und betrug 38600 Ind m⁻² (April 2005: 82800 Ind/m²). Bei den Copepodiden lag das Maximum im Januar und betrug 43800 Ind/m² (Dezember 2005: 119000 Ind/m²). Das Minimum der Individuendichte der adulten Tiere lag im März (7000 Ind/m²), das der Copepodide im April (4900 Ind/m²). Während der Sommermonate lagen die Individuendichten der adulten Tiere zwischen 10600 Ind/m² und 17500 Ind/m², die der Copepodide zwischen 28500 Ind/m² und 41800 Ind/m². 2006 waren die Populationsdichten und die saisonalen Änderungen bei *Eudiaptomus gracilis* gering.

Bei den cyclopoiden Copepoden waren die Individuendichten im April (adulte Tiere 800 Ind/m²) bzw. März (Copepodide 22000 Ind/m²) minimal. Die saisonale Änderung der Individuendichte liess bei den adulten Tieren ein Maximum im August erkennen, die Individuendichte betrug 136000 Ind/m². In den übrigen Monaten waren die Individuendichten unter 66000 Ind/m². Bei den Copepodiden waren die Werte im März und April minimal und stiegen im Mai und Juni an. Von Juli bis November lagen die Individuendichten unter 91300 Ind/m². Ein erstes Maximum lag im August und betrug 164000 Ind/m², das zweite Maximum lag im November und betrug 212000 Ind/m².

Bei der **Gesamtbakterienzahl** - bestimmt durch fluoreszenzmikroskopische Direktzählung – bewegten sich die Werte im Berichtsjahr auf einem ähnlichen Niveau wie in den Vorjahren. Es wurden bis dahin auch keine auffälligen Besonderheiten für das Berichtsjahr beobachtet.

Für die seit 1999 an der Station Fischbach-Uttwil durchgeführte monatliche Erhebung der Vertikalverteilung von *Escherichia coli* als Vertreter der **Fäkalbakterien** wurden auch für das Kalenderjahr 2006 die allgemein bemerkenswert niedrigen Belastungswerte für diese Keimgruppe im Freiwasser bestätigt. Im Jahre 2006 lagen über 85 % der insgesamt 144 untersuchten Proben

unterhalb von 1 Keim/100 ml. Die seltenen erhöhten Werte wurden 2006 im Februar und April im Tiefenwasser angetroffen. Sie weisen auf tiefe Einschichtungen belasteten Flusswassers zu diesen Zeitpunkten hin. Trotz des regenreichen Augusts wurden zu diesem Zeitpunkt im Gegensatz zum Zeller See keine erhöhten Werte festgestellt. Wegen der kurzen Überlebenszeiten (wenige Tage) einerseits und der andererseits im Verhältnis dazu großen Zeitintervalle (ein Monat) bei der Probenahme muss angenommen werden, dass nicht alle Belastungen mit Fäkalkeimen erfasst werden. Damit wird allerdings nicht die durch inzwischen mehrjährige Datenreihen belegte Einschätzung einer allgemein geringen Belastung in Frage gestellt.

B o d e n s e e - U n t e r s e e

Die **Phosphorkonzentration** - bestimmt als Gesamtphosphor im Freiwasser - hat 2006 im Rheinsee mit einem Jahresmittel von 10 mg/m³ gegenüber 2005 mit 11 mg/m³ leicht abgenommen. Im Zellersee ging der Wert von 18 auf 17 mg/m³ zurück.

Der Gehalt an **anorganischem Stickstoff** (Nitrat-, Nitrit- und Ammoniumstickstoff) mit Nitrat als Hauptkomponente nahm 2006 im Rheinsee auf 0,92 g/m³ zu (2005: 0,86 g/m³). Im Zellersee erhöhte

sich der Wert leicht auf $0,95 \text{ g/m}^3$ (2005: $0,93 \text{ g/m}^3$).

Der **Sauerstoffgehalt** über dem Seeboden betrug im Rheinsee im November 2006 $0,4 \text{ g/m}^3$. Im Vorjahr hatte die Minimalkonzentration Anfang November bei $0,1 \text{ g/m}^3$ gelegen. Im Zellersee, der bis 1992 über Jahrzehnte hinweg einen zeitweiligen totalen Sauerstoffschwund aufwies, wurde auch 2006 bei allen Messungen ein geringer Sauerstoff-Restgehalt gemessen. Der niedrigste Wert lag im August bei $0,8 \text{ g/m}^3$. In 2005 wurde ein Minimalwert von $0,6 \text{ g/m}^3$ im Oktober gefunden.

Das **Phytoplankton** im Zellersee erreichte 2006 im Jahresmittel eine Biomasse von $11,5 \text{ g/m}^2$ (0-20m) und liegt deutlich tiefer als im Vorjahr. In den vergangenen Jahren wurden folgende Werte erreicht: 2005: $13,2 \text{ g/m}^2$, 2004: $13,9 \text{ g/m}^2$ (0-20m). Wie im Obersee gab es auch im Zellersee sehr hohe Planktonbiomassen in der zweiten Hälfte der siebziger Jahre und in den achtziger Jahren, wobei die Schwankungen zwischen den einzelnen Jahren höher als im Obersee waren. Die Gesamtbiomasse des Phytoplanktons fiel auch im Zellersee innerhalb weniger Jahre schnell ab und hat sich inzwischen auf niedrigerem Niveau stabilisiert. Seit 15 Jahren schwankt die Biomasse mit Ausnahme des Jahres 1999 ($25,8 \text{ g/m}^2$) nur noch wenig und bewegt sich zwischen Werten von $10,5$ und $18,7 \text{ g/m}^2$ (0-20 m). Damit liegt das trophische Ni-

veau im Zellersee immer noch deutlich höher als im Bodensee-Obersee. Der Durchschnittswert der letzten fünfzehn Jahre liegt inzwischen bereits unter dem Niveau von 1961.

Im Jahr 2006 konnte wegen Eisbedeckung des Zellersees die Probenahmestelle in der zweiten Januar- und der ersten Februarhälfte nicht erreicht werden. Eine in früheren Jahren oft beobachtete Spätwinterblüte konnte auch aus diesem Grund nicht festgestellt werden; es ist aber zu vermuten, dass eine solche auf Grund des langen und kalten Winters nicht stattgefunden hat. Ende Februar begann sich eine Frühjahrsblüte zu entwickeln, deren höchster Wert am 21.3. mit $26,7 \text{ g/m}^2$ gemessen wurde. Dieser Wert war auch die höchste Biomasse, die im Jahr 2006 beobachtet wurde. Wie im Obersee fand auch im Zellersee 2006 kein ausgeprägtes Klarwasserstadium statt. Die Biomasse sank lediglich langsam wieder ab auf einen Wert von $5,4 \text{ g/m}^2$, der Mitte Juni erreicht wurde. Ende August folgte ein kleines Sommermaximum mit $15,5 \text{ g/m}^2$; nach einem kurzen Absinken entwickelte sich ein Herbstmaximum, das über den Großteil des Oktobers andauerte und dessen höchster Wert am 10.10. mit $15,6 \text{ g/m}^2$ gemessen wurde. Danach sank die Biomasse langsam auf das jedes Jahr zu beobachtende Winterminimum ab; Mitte Dezember wurden $5,4 \text{ g/m}^2$ erreicht.

Die zentrischen Kieselalgen traten vor allem während der Frühjahrsblüte stark in den Vordergrund und bildeten im März und April den größten Anteil an der Biomasse. Unter den oligotraphen Arten dominierte anfangs *Cyclotella cyclopuncta* wie in den Vorjahren. *Stephanodiscus neoastraea* und *S. alpinus* als euryöke Formen mit hoher Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Umweltbedingungen erreichten daneben beträchtliche Anteile. Die pennaten Kieselalgen bildeten im Mai den größten Anteil an der Biomasse; dabei dominierte vor allem *Fragilaria ulna* var. *acus*. Daneben traten sie im Oktober noch einmal mit einem nennenswerten Anteil auf, vor allem von *Fragilaria crotonensis*. Cryptomonaden erreichten das ganze Jahr über beträchtliche Anteile an der Biomasse; in der zweiten Jahreshälfte dominierten sie das Planktonbild und bildeten ab September den größten Anteil der Biomasse. Die Dinoflagellaten erreichten nur Anfang Juli größeren Anteil an der Biomasse, wobei *Ceratium hirundinella* dominierte. Die Chrysophyceen erreichten im Gegensatz zum Obersee fast das ganze Jahr über mit *Erkenia* sowie mit verschiedenen *Mallomonas*- und *Dinobryon*-Arten nennenswerte Anteile an der Biomasse; Ende August dominierten sie das Planktonbild mit *Dinobryon sertularia*. Coccale und begeißelte Grünalgen wurden wie in den Vorjahren wenig beobachtet, lediglich Ende August und Ende Oktober traten sie etwas stärker auf; dabei hatten im

August *Pandorina* und im Oktober *Scenedesmus* den größten Anteil. Blaualgen gingen stark zurück und konnten lediglich Anfang Januar mit *Anabaena lemmermannii* festgestellt werden; dies konnte schon im Vorjahr beobachtet werden.

Das Phytoplankton im Rheinsee erreichte 2006 im Jahresmittel eine Biomasse von $6,4 \text{ g/m}^2$ (0-20m) und liegt etwas höher als im Vorjahr. In den vergangenen Jahren wurden folgende Werte erreicht. 2005: $5,3 \text{ g/m}^2$, 2004: $6,6 \text{ g/m}^2$ (0-20m). Die Langzeitentwicklung des Phytoplanktons im Rheinsee unterscheidet sich sehr stark von der in Obersee und Zellersee. Dort lagen in der zweiten Hälfte der siebziger Jahre und in den achtziger Jahren hohe Planktonbiomassen vor, denen ein schneller Abfall folgte. Im Rheinsee begannen die Untersuchungen des Phytoplanktons 1976, als die Phosphorkonzentrationen bereits ihren Höhepunkt überschritten hatten und laufend absanken. Trotzdem zeigten sich 1980 und 1981 nach einmal zwei Maxima. Diesen folgten eher niedrigere Werte in den achtziger Jahren, dann aber wieder ein kontinuierlicher Anstieg in den neunziger Jahren bis zu einem Maximum im Jahr 1997 mit $66,5 \text{ g/m}^2$. Ab dem Jahr 1998 begann allerdings die Plankton-Biomasse schnell abzufallen, um bereits nach vier Jahren Werte zu erreichen, die tiefer als im Zellersee und auch im Obersee liegen. Seit 2001 hat sich die Planktonentwicklung auf niedri-

gem Niveau stabilisiert und schwankt noch zwischen $8,7 \text{ g/m}^2$ und 6 g/m^2 . Der Durchschnittswert der letzten sechs Jahre beträgt 7 g/m^2 und liegt damit deutlich niedriger als im Obersee und im Zellersee.

Auch im Rheinsee konnte wegen Eisbedeckung die Probenahmestelle von Mitte Januar bis Ende Februar über einen Zeitraum von fünf Wochen nicht erreicht werden. Eine eventuelle Spätwinterblüte konnte auch aus diesem Grund nicht festgestellt werden; es ist aber zu vermuten, dass eine solche auf Grund des langen und kalten Winters nicht stattgefunden hat. Ende Februar begann sich eine Frühjahrsblüte zu entwickeln, deren höchster Wert am 14.3. mit $16,2 \text{ g/m}^2$ gemessen wurde. Anders als im Obersee und im Zellersee fand im Rheinsee 2006 ein deutliches Klarwasserstadium statt; die niedrigste Biomasse wurde Ende April mit $4,1 \text{ g/m}^2$ gemessen. Dann stieg die Biomasse schnell an, um am 9.5. mit $20,2 \text{ g/m}^2$ die höchste Biomasse zu erreichen, die im Jahr 2006 beobachtet wurde. Die Biomasse sank danach wieder ab und blieb den Frühsommer über auf ausgesprochen niedrigem Niveau. Anfang August stieg die Biomasse wieder an und erreichte Ende August ein kleineres Sommermaximum mit $8,4 \text{ g/m}^2$; danach folgten noch zwei sehr kleine Maxima Ende September und Anfang November. Anfang Dezember wurde der sehr geringe Wert von $1,0 \text{ g/m}^2$ erreicht.

Im Rheinsee dominierten die zentrischen Kieselalgen während der Frühjahrsblüte noch stärker als im Zellersee und bildeten im März und April den größten Anteil an der Biomasse. Unter den oligotraphenten Arten dominierte *Cyclotella cyclopuncta*, daneben *Stephanodiscus neoastrea* und *S. alpinus* als euryöke Formen. Die pennaten Kieselalgen bildeten im Mai den größten Anteil an der Biomasse; dabei dominierten vor allem *Fragilaria ulna* var. *acus*. Cryptomonaden erreichten einen wesentlich geringeren Anteil an der Biomasse als im Zellersee; lediglich im August dominierten sie kurzzeitig das Planktonbild. Die Dinoflagellaten erreichten nur im Mai, August und im September einen größeren Anteil an der Biomasse, wobei *Gymnodinium* im Mai und *Ceratium* im Spätsommer dominierte. Der Anteil der Chrysophyceen war geringer als im Zellersee und setzte sich aus *Erkenia* sowie verschiedenen *Mallomonas*- und *Dinobryon*-Arten zusammen. Grünalgen wurden wenig beobachtet, lediglich Anfang August traten sie etwas stärker auf; dabei hatte *Carteria* den größten Anteil. Blaualgen konnten lediglich Ende August und im September mit *Anabaena lemmermannii* festgestellt werden.

Im Jahr 2006 wurde erstmals an der Station Zeller See die Belastung mit **Fäkalkeimen** (*Escherichia coli* EC und intestinale Enterokokken IE) erfasst. Dabei zeigte sich im Vergleich zur zentralen

Oberseestation eine deutlich höhere Fäkalkeimbelastung, da über 80 % der 72 untersuchten Proben mehr als 1 Keim/ml enthielten. Allerdings erfüllten alle Proben immer noch die Anforderungen für gute Badewasserqualität. Erhöhte Werte wurden im Winter und frühen Frühjahr bis April vor allem in der Tiefenwasserschicht, im verregneten späten Frühjahr (Mai bis Anfang Juni) in oberflächennahen Schichten und im ebenfalls niederschlagsreichen August in der Sprungschicht 10 – 15 m gefunden. Diese Befunde decken sich mit den aus chemischen Untersuchungen abgeleiteten Einschichtungsbildern der Radolfzeller Aach und weisen somit auch deutlich auf die Hauptbelastungsquelle der Fäkalkeime hin. Aufschlussreich erwiesen sich hierzu auch die Befunde aus der nach vorangehender langer Trockenzeit im Juli erhobenen Probenahme. Dabei war in allen Tiefenstufen eine Belastung mit Fäkalkeimen nicht nachweisbar. Das ist ein weiterer Beleg dafür, dass nur bei Regenwetter (vor allem infolge Regenentlastungen von Kanalnetzen) mit einem erhöhten Risiko von Keimbelastungen zu rechnen ist.

Gesamtbewertung des Seezustandes

Die sehr gute **Sauerstoffversorgung** der grundnahen Wasserschichten des Freiwassers an der tiefsten Stelle im Boden-

see-Obersee vom Vorjahr wurde 2006 nicht erreicht (Abb. B).

Insbesondere die übliche Sauerstoffholung des tiefen Hypolimnions von 200-254 m Tiefe fiel in den ersten Monaten des Jahres 2007 praktisch aus. Die Ursache für diese Beobachtung lag einerseits am milden Winter und andererseits am sehr kalten Tiefenwasserkörper, der sich mit Temperaturen um 4°C nahe am Dichtemaximum des Wassers befand. Beide Faktoren, sowohl höhere Temperaturen der oberen Seebereiche als auch sehr kalte Temperaturen des Tiefenwassers behindern den vertikalen Wasseraustausch stark, wie eine Analyse der IGKB-Datenbestände seit 1961 ergab. Anfang 2007 verstärkten sich beide Effekte gegenseitig. Zu wenig abgekühlte, leichtere Wasserkörper an der Seeoberfläche und sehr schwere Wasserkörper in der Tiefe, ein Relikt aus dem sehr kalten Winter des Vorjahres, stabilisierten die vertikale Schichtung erheblich und verhinderten einen wirkungsvollen Stoffaustausch.

Der **Phosphorgehalt** - bestimmt als Gesamtphosphor während der Zirkulationsperiode von Februar bis Anfang April – blieb gegenüber 2006 mit 8 mg/m³ konstant (Abb. A).

Der **anorganische Stickstoffgehalt** (Nitrat-, Nitrit- und Ammoniumstickstoff) hat sich auch im vergangenen Untersuchungszeitraum nur wenig geändert und schwankt seit Anfang der achtziger Jahre

auf einem Konzentrationsniveau von 0,9 bis 1,0 g/m³ (Abb. C).

Im Bodensee-Untersee mit den untersuchten Seeteilen Rheinsee und Zellersee gingen die Phosphorgehalte gegenüber dem Vorjahr weiter leicht zurück. Sie liegen aber immer noch etwas höher als im Obersee. Die Gründe dafür liegen in der Ausschwemmung belastender Biomasse aus dem Obersee sowie in der saisonalen Freisetzung von Phosphor aus den Sedimenten. Die positiven Wirkungen der Sanierungsmaßnahmen sind jedoch auch am Untersee unübersehbar.

In der **Phytoplankton-Zusammensetzung** des **Obersees** spielen Ubiquisten, also Arten ohne eine Indikationsfunktion nach wie vor eine wichtige Rolle. Das ganze Jahr über erreichten diese Ubiquisten beträchtliche Anteile an der Gesamtbiomasse. Insbesondere die Cryptophyten sind ein sehr gutes Futter für die Primärkonsumenten und stellen somit während des gesamten Zeitraums die Ernährung auch der höheren Stufen der Nahrungskette sicher. Auch die kleinen zentrischen Kieselalgen, die von Januar bis März das Plankton dominierten, werden vom filtrierenden Zooplankton bevorzugt aufgenommen und sind gut verwertbar. Die pennaten Kieselalgen, die die Frühjahrsblüte dominierten und auch im Frühsommer sowie im November beträchtliche Anteile an der Biomasse erreichten, sind dagegen von Zooplankton nur schwer verwertbar.

Gegenüber dem Vorjahr hat sich die Plankton-Zusammensetzung 2006 etwas geändert. Die Oligotrophierungsanzeiger waren zwar wie in den Vorjahren stark vertreten, jedoch wurde die Frühjahrsblüte von der euryöken Form *Fragilaria ulna* var. *acus* dominiert. Ausgesprochene Eutrophierungsanzeiger spielen nur noch eine ganz untergeordnete Rolle; auch Cyanophyceen waren kaum noch vertreten.

Die Jahresdurchschnittsbiomasse hat sich auf einem Niveau stabilisiert, das etwa dem Mittel der letzten acht Jahre entspricht (9,2 g/m²), also Werten zwischen 6,7 und 13 g/m². Dieser Wert liegt ungefähr auf der Höhe der Biomasse von 1961.

Auch für die **Phytoplankton-Zusammensetzung** des **Zellersees** können diese Aussagen gemacht werden. Im Zellersee setzt in den meisten Jahren bereits im Februar eine Spätwinterblüte ein; dies war 2006 durch den extrem kalten Winter jedoch um einige Wochen verzögert. Außerdem dominieren dort während dieser Spätwinterblüte die zentrischen Kieselalgen. Die Jahresdurchschnittsbiomasse hat sich im Zellersee auf einem Niveau stabilisiert, das tiefer liegt als das Mittel der letzten sechzehn Jahre (15 g/m²). Mit Ausnahme des Jahres 1999 sind dies Werte zwischen 10,3 und 18,7 g/m² (0-20 m). Damit liegt das trophische Niveau im Zellersee deutlich höher als im Boden-

see-Obersee. Der Durchschnittswert der letzten sechzehn Jahre liegt inzwischen bereits unter dem Niveau von 1961.

Der **Rheinsee** zeigt eine von Obersee und Zellersee stark abweichende Langzeitentwicklung. Die Untersuchungen begannen 1976, als die Phosphorkonzentrationen bereits ihren Höhepunkt überschritten hatten und laufend absanken. Trotzdem zeigten sich 1981 und von 1995 bis 1997 starke Maxima des Planktons. Ab dem Jahr 1998 begann allerdings die Plankton-Biomasse schnell abzufallen, um bereits nach vier Jahren Werte zu erreichen, die tiefer als im Zellersee und auch im Obersee liegen. Auch im Rheinsee steht ein Großteil des Jahres gut fressbares Phytoplankton zur Verfügung. Dies trifft insbesondere für die Frühjahrsblüte mit einem großen Anteil an zentrischen Kieselalgen zu. Allerdings ist im Rheinsee der Anteil der ebenfalls gut fressbaren Cryptophyten mit Ausnahme des Spätsommers geringer als im Obersee und Zellersee.

Seit 2001 hat sich die Planktonentwicklung auf niedrigem Niveau stabilisiert und schwankt noch zwischen $8,7 \text{ g/m}^2$ und 6 g/m^2 . Der Durchschnittswert der letzten sechs Jahre beträgt 7 g/m^2 und liegt damit deutlich niedriger als im Obersee und im Zellersee.

Die saisonale Entwicklung der Individuendichte der **Crustaceen** verlief im Wesentlichen wie im Vorjahr 2005 und

entsprach dem eines oligotrophen Sees. Die klimatischen Besonderheiten zeigten keinen offensichtlichen Einfluß auf das Crustaceenplankton.

Für die **Gesamtbakterienzahl** wurde auch 2006 das inzwischen durch die Reoligotrophierung erreichte insgesamt niedrige Niveau für diesen Parameter bestätigt.

Belastungen durch die weit überwiegend mit Siedlungsabwässern eingetragenen **Fäkalkeime** (*Escherichia coli* EC und intestinale Enterokokken IE) sind in der großen Freiwasserzone des Bodensee-Obersees nach wie vor kaum bemerkbar. Im Jahr 2006 enthielten über 85 % aller Proben weniger als 1 Keim/100 ml, die übrigen Proben wiesen nur in wenigen Einzelfällen erhöhte Werte (< 10 Keime / 100 ml) auf. Die im See teil Zellersee im Untersee gefundenen generell höheren Belastungswerte, bei der nur bei rund 20 % der Proben weniger als 1 Keim/100 ml enthielten, stehen eindeutig im Zusammenhang mit der dort starken Beeinflussung der Probenstelle durch die Nähe der Mündung der Radolfzeller Ach. Dennoch erfüllten auch dort mehr als 95 % der Proben die Anforderungen für sehr gute Badewasserqualität, d.h. auch dort kann trotz der Mündungsnähe von einer geringen Belastung mit Fäkalkeimen ausgegangen werden. Die Befunde am Zeller See bestätigen aber zusätzlich nochmals sehr eindrücklich sowohl das Indikati-

onspotenzial für die Einschichtung belasteten Flusswassers als auch das mit Starkregenereignissen verbundene erhöhte Keimbelastungsrisiko am See.

Fazit und Handlungsbedarf

Das vergangene Seejahr war das vierte Niedrigwasserjahr in Folge. Auf einen sehr kalten, lang anhaltenden Winter 2005 / 2006 folgte ein überdurchschnittlich warmes Folgejahr und ein außergewöhnlich milder Winter 2006 / 2007. Infolgedessen unterblieb eine vollständige Durchmischung im Bodensee.

Die Wasserqualität des Sees befindet sich in einem sehr guten Zustand. Der langjährige Trend abnehmender Phosphorgehalte hat sich im Obersee abgeschwächt und pendelt sich offensichtlich auf einem niedrigen Wert ein. Die positiven Auswirkungen der erreichten niedrigen Konzentrationen zeigen sich klar in der Sauerstoffversorgung tiefer Seebereiche. Trotz der mangelhaften Vertikalzirkulation im vergangenen Winter hielten sich die Sauerstoffkonzentrationen im tiefen Hypolimnion auf einem deutlich höheren Niveau als in früheren Jahren mit vergleichbar schlechten Durchmischungen.

Diese Entwicklung dokumentiert die Stabilität des Ökosystems für den Fall einer

ungünstigen Klimaentwicklung. Denn sie entschärft die aus unvollständigen Vertikalzirkulationen zu erwartenden negativen Folgen für die Sauerstoffversorgung des Sees.

Im Untersee wird die trophische Entwicklung nach wie vor von der Phosphorfreisetzung aus den Sedimenten beeinflusst. Darüber hinaus spielt die aus dem Obersee eingetragene Biomasse eine Rolle. Die höhere Algenentwicklung im Untersee spiegelt diese Einflüsse wider. Allerdings sind die Phosphorgehalte sowohl im Zellersee als auch im Rheinsee in 2006 weiter leicht gefallen, was eine weitere Verbesserung der Situation erwarten lässt.

Die Ergebnisse der Freiwasseruntersuchungen bestätigen eindrücklich den nachhaltig positiven Effekt der Gewässerschutzmaßnahmen aller Länder und Kantone im Einzugsgebiet des Bodensees. Die laufende Intensivierung der Nutzungen verlangt die konsequente Beibehaltung der hohen Anforderungen an die Abwasserbehandlung, die Minimierung diffuser Nähr- und Schadstoffeinträge sowie die Reduktion struktureller Beeinträchtigungen.