

**Zeitschrift:** Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern  
**Herausgeber:** Naturforschende Gesellschaft in Bern  
**Band:** 57 (2000)

**Artikel:** Ökologie des Bielersees  
**Autor:** Tschumi, Pierre-André  
**Kapitel:** 2: Einleitung  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-318631>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 22.12.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Nur der volle Einsatz aller meiner Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter – Laboranten, Lizentianden und Doktoranden (beiden Geschlechts) – sowie unserer Sekretärin, Frau L. Freiburghaus, ermöglichte die Durchführung des umfangreichen Projektes. Ihnen danke ich ganz besonders. Ihre Beiträge werden in den einschlägigen Kapiteln gewürdigt.

## 2. Einleitung

### 2.1 Was ist Ökologie?

Ökologie ist die Wissenschaft von den Beziehungen der Organismen zueinander und zu ihrer Umwelt. Sie ging ursprünglich aus der Biologie hervor, ist heute multidisziplinär (Biologie, Chemie, Physik, Geographie, Meteorologie, Ökonomie usw.). Auch der Mensch mit seinen biologischen, wissenschaftlichen, technologischen, wirtschaftlichen und kulturellen Aspekten ist Objekt der Ökologie, als wichtiger Partner in zahlreichen Ökosystemen, aber auch als Hauptverursacher von Umweltschäden. Zu ihrer Behebung oder Verhütung müssen die Funktionsweise von Ökosystemen und die darin herrschenden Gesetzmäßigkeiten bekannt sein.

### 2.2 Wie funktioniert ein Ökosystem?

*Abbildung 1* stellt das Grundkonzept der Ökologie und dieser Arbeit dar.

Im Mittelpunkt der Ökologie steht das Ökosystem, bestehend aus einer Lebensgemeinschaft (Biozönose) von Mikroorganismen, Pflanzen, Tieren und Menschen, und aus den nichtlebenden Teilen des Raumes, dem Biotop<sup>1</sup>, wie Luft, Wasser, Gestein und Böden. Beispiele von Ökosystemen sind Wälder, Flüsse, Seen, Sümpfe, Meere, Savannen oder noch vom Menschen besiedelte und bewirtschaftete Gebiete.

Sämtliche Ökosysteme leben dank den grünen Pflanzen, welche mit anorganischer Nahrung allein auskommen (autotroph): Aus Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Wasser (H<sub>2</sub>O) und Mineralsalzen (Nitrat, Phosphat, Sulfat usw.) bauen sie durch Photosynthese im Blattgrün, mit Hilfe von Licht, energiereiche pflanzliche Substanz auf: Bio- bzw. Phytomasse. Sie sind die wichtigsten Produzenten (genauer Primärproduzenten, auf *Abbildung 1* als grünes Rechteck dargestellt) des Systems. Biomasse (organismische Substanz) dient allen übrigen (heterotrophen) Lebewesen als Nahrung: den Pflanzenfressern (Konsumenten 1. Ordnung: orangefarbenes Rechteck), den Fleischfressern (Konsumenten 2. Ordnung: rotes Rechteck), und allen Organismen, die sich von organischen Abfällen (Laubstreu, Kot, Leichen usw.) ernähren (Zerleger, wie Bakterien, Pilze, Kleintiere: braunes Rechteck).

1 Heute wird dieser Begriff meist für Gartenweiher, Teiche sowie natürliche Feucht- und Nassstandorte verwendet.

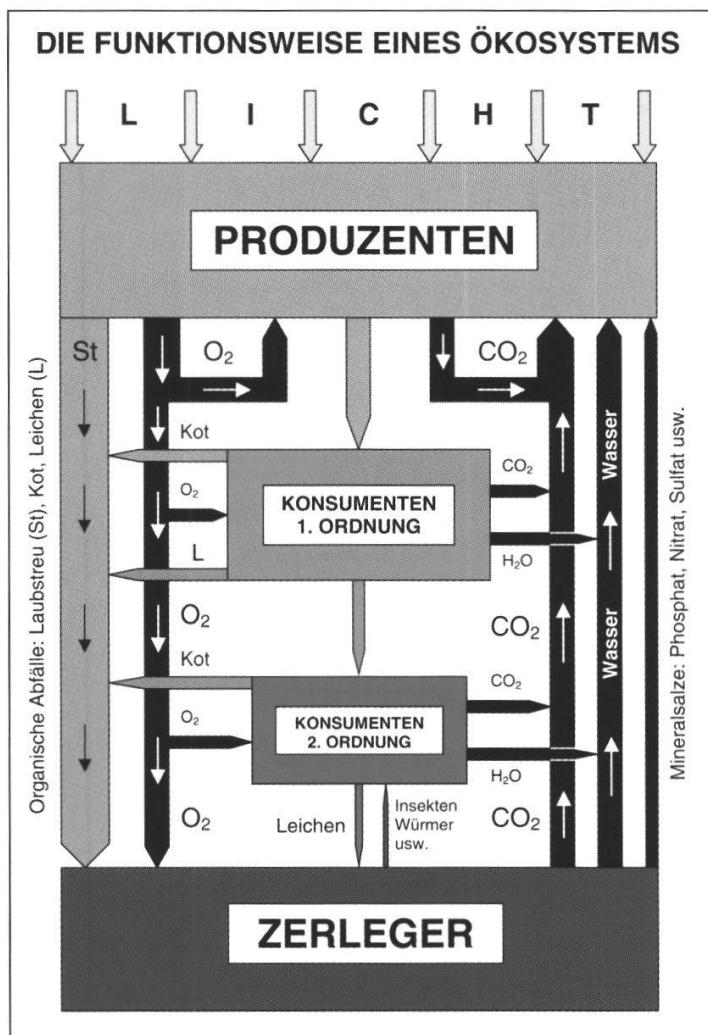


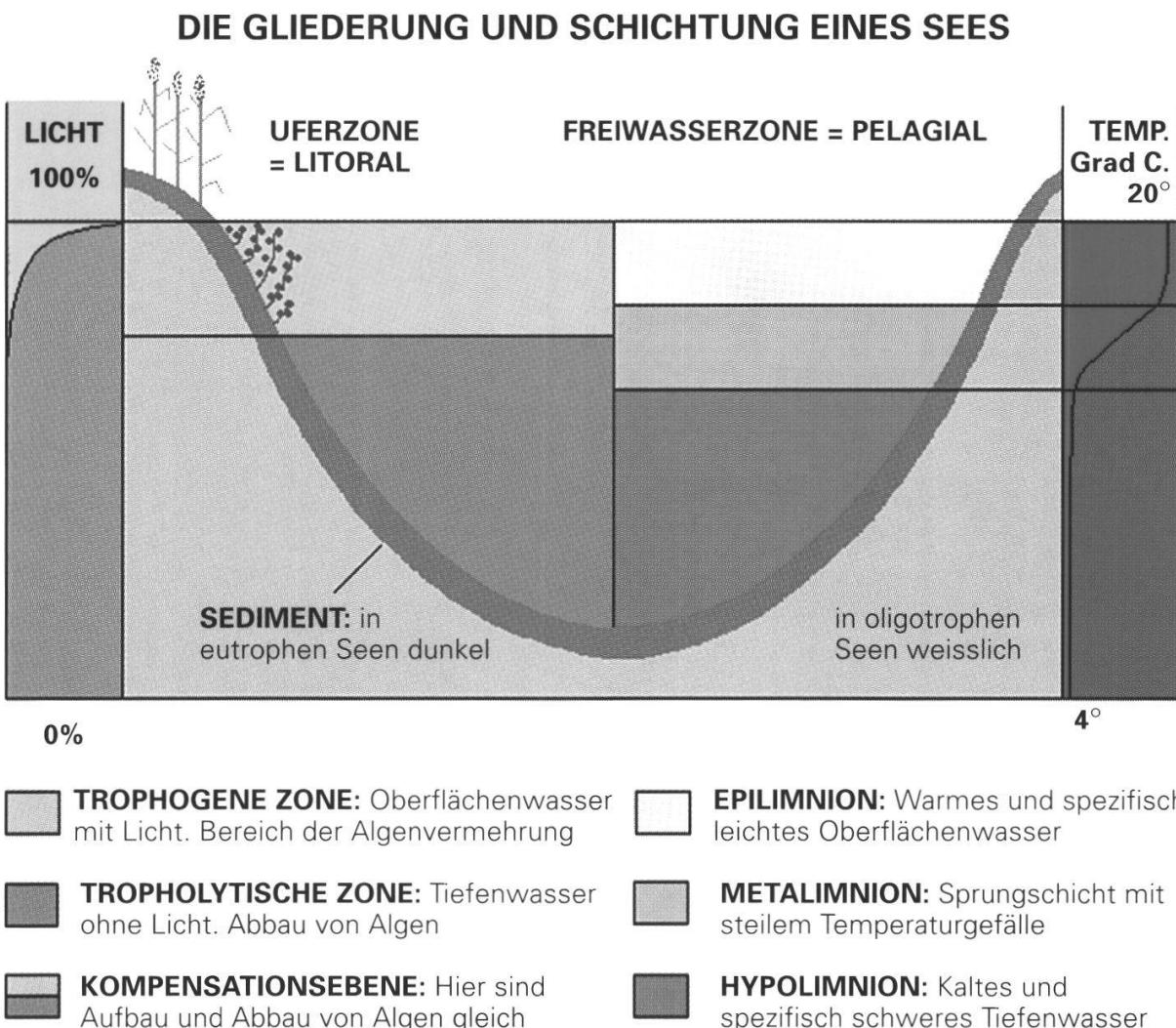
Abbildung 1: So funktionieren Ökosysteme wie Ozeane, Seen, Fließgewässer, Wälder, Wiesen usw. Erläuterungen unter 2.2.

Die rechteckigen Kästchen von *Abbildung 1* stellen die verschiedenen Organismenkategorien oder trophischen Ebenen dar. Sie werden durch Stoff- und Energieflüsse miteinander verbunden (Pfeile) und bilden mit diesen zusammen Nahrungsketten, entlang welchen energiereiche Biomasse (farbig) und energiearme anorganische Substanz (schwarz) von einer trophischen Ebene zur nächsten gelangt.

Sämtliche Produkte und Abfälle des Systems sind wiederverwertbar und werden wiederverwertet: Biomasse und organische Abfälle als Nahrung, der Sauerstoff aus der Photosynthese zum Atmen, das heisst zur «Verbrennung» organischer Stoffe zwecks Energiegewinnung in Zellen und Geweben; die Endprodukte der Atmung:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und Mineralsalze, als Pflanzennährstoffe. So bilden sich Kreisläufe, ohne Akkumulation von Abfall im System, dies im Unterschied zur menschlichen Zivilisation.

### 2.3 Die Besonderheiten eines See-Ökosystems

Abbildung 2 zeigt, dass ein See horizontal gegliedert ist in einen Uferbereich (Litoral) und eine Freiwasserzone (Pelagial). Vertikal ergibt sich eine Gliederung, links in trophogene und tropholytische Zone gemäss Lichtintensität und Algenproduktion bzw. -abbau (Trophie), und rechts in Epilimnion und Hypolimnion gemäss Erwärmung des Oberflächenwassers infolge Lichtabsorption (Thermik). Diese Feststellungen werden im folgenden erläutert:



Temperaturschichtung nur im Sommer: **SOMMERSTAGNATION**. Bei Abkühlung des Epilimnions im Herbst und Winter durchmischen Wind und Wellen den ganzen See: **WINTERZIRKULATION** mit Luftsauerstoff-Eintrag, im Bielersee fast bis zur Sättigung.

Abbildung 2: Die Gliederung eines Sees nach Tiefe, Lichteinfall, Vegetation und Wassertemperatur. Die Temperaturschichtung (rechts) besteht nur im Sommerhalbjahr. Siehe 2.3.

### 2.3.1 Wasser und Licht

Lebensraum der Biozönose ist das Wasser, und Licht ist der Motor aller Lebensvorgänge und wichtiger physikalischer Prozesse im See. Auf die Seeoberfläche gelangt viel Lichtenergie, auf den Bielersee zum Beispiel im Jahresverlauf  $1,4\text{--}1,5 \cdot 10^{14}$  kJ oder soviel, wie bei der Verbrennung von 5 Mio. t Kohle oder 3,6 Mio. t Erdöl freigesetzt würde. Damit liesse sich der ganze Wasserkörper von  $1,2 \text{ km}^3$  theoretisch von  $0^\circ\text{C}$  auf  $28^\circ\text{C}$  erwärmen. Wasser absorbiert eindringendes Licht; im Frühling wurden, bei klarem Wasser, in 1 m Tiefe noch rund 60% und in 10 m Tiefe 1% der Oberflächenintensität gemessen. Im Sommer, wenn das Wasser durch Algen getrübt ist, können in 1 m Tiefe um die 35% und in 5 m Tiefe noch 1–2% der Oberflächenintensität verbleiben. In grösseren Tiefen eines Sees herrscht auch tagsüber Dunkelheit.

### 2.3.2 Temperaturschichtung im Sommerhalbjahr

Bei Zunahme der Sonnenscheindauer und Strahlungsintensität im Frühling absorbieren die obersten Wasserschichten immer mehr Licht und erwärmen sich. Da kein Licht in grössere Tiefen dringt, bleibt das Wasser dort auch im Hochsommer kalt, um  $4\text{--}6^\circ\text{C}$ . Kaltes Wasser ist spezifisch schwerer als warmes; daher schwimmt im See das erwärmte Oberflächenwasser, das Epilimnion, wie Öl auf dem schwereren Tiefenwasser, dem Hypolimnion. Die thermische Schichtung bleibt im Sommerhalbjahr trotz Wind und Wellen erhalten (Sommerstagnation). Das Wasser kann sich aber auch bei Stagnation bewegen:

PAUL NYDEGGER [80] und JÜRGEN ORELLI [84] konnten mit Driftkörpern im Sommer horizontale Strömungen des Epilimnions nachweisen, welche teils durch Zuflüsse, teils durch Erdrotation verursacht werden (*s. Abbildung 39*). Dies konnte NYDEGGER mit rotierenden Seemodellen veranschaulichen und bestätigen. Anhaltende Winde durchmischen ferner das Epilimnion und verfrachten Oberflächenwasser von einem Ufer zum gegenüberliegenden, was eine Sprungschichtneigung [83] und wirbelförmige Zirkulation bis ins tiefe Hypolimnion induziert, ersichtlich an kurzfristigen Erhöhungen des  $\text{O}_2$ -Gehaltes von 1,7 mg/l auf >5 mg/l in 71,5 m Tiefe [81].

### 2.3.3 Durchmischung im Winterhalbjahr

Wenn sich im Herbst das Epilimnion infolge abnehmender Einstrahlung und kälterer Luftmassen abkühlt, erreicht es wieder gleiche Temperaturen wie das Tiefenwasser. Die thermische Schichtung besteht nicht mehr, und bei Wind wird der ganze Wasserkörper nicht zu tiefer Seen vollständig durchmischt. Wir nennen dies Winter-Vollzirkulation. Sie dauert bis zum nächsten Frühling und ist für den seeinternen Transport von Nährstoffen und Sauerstoff sehr wichtig. Im Verlauf der Winterzirkulation wird der ganze Wasserkörper des Sees abgekühlt unter Abgabe von viel Wärme an die Umgebung. Dies beeinflusst das lokale Klima und begünstigt den Weinbau am See.

### 2.3.4 Die Organismen

Die Primärproduzenten eines Sees sind mikroskopisch kleine Algen (pflanzliches Plankton = Phytoplankton) und die Laichkräuter der Ufervegetation. Wichtigste Primärkonsumenten sind Rädertierchen und kleinste Krebschen (tierisches Plankton = Zooplankton), ferner Wandermuscheln (Kap. 14) und einige Fische (s. 15.2). Das Plankton ist der freischwebende Teil der Lebensgemeinschaft, ohne oder mit beschränkter Eigenbewegung. Zu den Konsumenten höherer Ordnung gehören Fische, die sich vom Zooplankton oder andern Fischen ernähren. Zerleger sind Bakterien, Pilze und ein- bis mehrzellige kleinste Tierchen.

### 2.3.5 Photosynthese oben

Algen brauchen Licht zum Leben. Sie können sich daher nur in den obersten Wasserschichten vermehren, bestenfalls bis in Tiefen, wo noch 1% der Oberflächenstrahlung herrscht. Diese Schicht heisst trophogene Zone. Sie braucht nicht genau dieselbe Ausdehnung zu haben wie das Epilimnion.

### 2.3.6 Abbau von Algen oben und unten

Schon in der trophogenen Zone werden Algen zersetzt. Viele sinken aber in die Tiefe. Ohne Licht sterben sie und werden rasch durch Zerleger abgebaut, in der tropholytischen Zone, die annähernd mit dem Hypolimnion übereinstimmt.

### 2.3.7 Nährstoffkreisläufe

Algen brauchen zur Vermehrung anorganische Nährstoffe, insbesondere Kohlenstoff (CO<sub>2</sub>) bzw. Karbonat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, Ion mit 2 negativen Ladungen) oder Bikarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Phosphat (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) und Sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Deshalb nimmt bei Vermehrung der Algen in der trophogenen Zone im Sommerhalbjahr die Konzentration der Nährstoffe ab. Durch Abbau von Algen im Epilimnion werden sie ständig nachgeliefert (kleiner Kreislauf). Auch Zuflüsse sorgen für Nachschub. Beim Abbau von Algen in der Tiefe werden im Jahresverlauf viel Nährstoffe frei. Ihre Konzentration nimmt während der Sommerstagnation im Tiefenwasser zu. Erst während der Winterzirkulation werden sie wieder auf den ganzen Wasserkörper, bis ins Epilimnion, verteilt (grosser Kreislauf).

### 2.3.8 Der Sauerstoffhaushalt eines Sees

Bei der Photosynthese wird Sauerstoff ( $O_2$ ) freigesetzt. Dies übersättigt im Sommerhalbjahr das Oberflächenwasser oft mit  $O_2$ . Der Überschuss geht langsam in die Atmosphäre. Der Abbau von Algen in der Tiefe verbraucht  $O_2$ . Da die  $O_2$ -Reserven des Hypolimnions bei Sommerstagnation sehr beschränkt erneuerbar sind (höchstens infolge der durch kleine Wasserwirbel verursachten sog. Eddy-Diffusion), führt hohe Algenproduktion in der trophogenen Zone zu starkem  $O_2$ -Verbrauch in der Tiefe, im Extremfall bis zu völligem Schwund. Erst bei Winterzirkulation gelangt im Oberflächenwasser gelöster Sauerstoff wieder in die Tiefe, und das  $O_2$ -arme Tiefenwasser sättigt sich, an die Oberfläche verfrachtet, rasch mit Luftsauerstoff.  $O_2$ -gesättigtes Wasser enthält, auf Bielerseehöhe (429,2 m ü.M.) bei  $0^\circ C$  13,89, bei  $10^\circ C$  10,72 und bei  $20^\circ C$  8,63 mg/l  $O_2$  (s. *Tabelle 2*, unter 5.1.1).

## 2.4 Seen können krank werden

### 2.4.1 Phosphor beschränkte ursprünglich die Algenvermehrung

Gewässer enthalten in gelöster Form geringe Mengen von Pflanzennährstoffen, namentlich die oben erwähnten Verbindungen von C, N, P und S. Sie stammen aus verwittertem Gestein, Böden und vom Abbau von Biomasse, der Kohlenstoff auch aus dem  $CO_2$ -Pool der Atmosphäre. Das Verhältnis der Nährstoffe C, N, P entspricht in einem Gewässer nicht genau dem Bedarf der Algen. In diesen kommen C, N und P in einem atomaren Verhältnis von 106 C : 16 N : 1 P vor, oder von 41 C : 7 N : 1 P nach Gewicht. In den meisten Gewässern sind C und S im Überschuss vorhanden. N und P dagegen waren bis anfangs 20. Jahrhundert mit Konzentrationen von  $<200$  mg/m<sup>3</sup> N bzw. von  $<10$  mg/m<sup>3</sup> P Mangelware, wobei meist das Angebot an Phosphor sehr spärlich war. P bildete ursprünglich in den meisten Gewässern den wachstumsbeschränkenden Faktor, den Minimumfaktor.

### 2.4.2 Gesunde Seen

Seen mit  $<10$  mg/m<sup>3</sup> Gesamt-P und  $<200$  mg/m<sup>3</sup> Nitrat-N gelten als nährstoffarm (oligotroph). Die Algenvermehrung ist durch das geringe Nährstoffangebot stark eingeschränkt. Das Wasser ist blau und klar, mit hoher Sichttiefe (s. 4.1.2 und *Abbildung 7*). Im Sommerhalbjahr sinken wenig Algen ins Tiefenwasser; ihr Abbau verbraucht wenig Sauerstoff, und die  $O_2$ -Reserven des Hypolimnions sind für weiteren Abbau, aber auch für Fische, ausreichend und fallen nie unter 4 mg/l  $O_2$ . Im ursprünglich extrem oligotrophen Lake Tahoe in Kalifornien wurden 1968 Sichttiefen von 32 m, 1984 noch von 23 m gemessen. Für die Abnahme sind Überbauungen, Tourismus und zunehmende Algenvermehrung verantwortlich [46].

### 2.4.3 Kranke Seen

Seen mit P-Konzentrationen von  $>10\text{--}20 \text{ mg/m}^3$  und  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen von  $>200\text{--}300 \text{ mg/m}^3$  gelten als nährstoffreich (eutroph). Die Algenvermehrung wird durch das hohe Nährstoffangebot beschleunigt. Das Wasser ist schmutzig-grün und trüb mit geringer Sichttiefe. Im Sommerhalbjahr sinken viele Algen ins Tiefenwasser; ihr Abbau verbraucht viel  $\text{O}_2$  und die  $\text{O}_2$ -Reserven des Hypolimnions reichen bald für weiteren Abbau nicht mehr aus. In den Tiefen des Sees fällt die  $\text{O}_2$ -Konzentration auf  $<4 \text{ mg/l}$  bis  $0 \text{ mg/l}$ . Dies beeinträchtigt das Selbstreinigungsvermögen des Tiefenwassers. Ein Teil der absinkenden Algen und anderer organischer Abfälle ergibt über Grund Faulschlamm. Bei  $\text{O}_2$ -Mangel bilden sich beim Zerfall der Biomasse Sumpfgas (Methan,  $\text{CH}_4$ ) statt Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Ammoniak ( $\text{NH}_3$  bzw.  $\text{NH}_4^+$ ) statt Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) und Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) statt Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Solche Seen sind krank, weil das Leben in ihrer Tiefe gefährdet ist.

Und doch hat BRIGITTE WIEDERKEHR-MOSER [148] 1975 im Faulschlamm der 3 Becken des Bielersees bis in Tiefen von 52 m Zuckmückenlarven (*Chironomus*) und bis in 72 m Tiefe 9 verschiedene Arten von Schlammröhrenwürmern (*Tubifex* und andere) nachgewiesen, und zwar bis über 33 000 Individuen pro  $\text{m}^2$ . Ferner fand im Sommerhalbjahr 1974 RENÉ STEBLER [110, 111] im Seesediment in 74 m Tiefe pro  $\text{m}^2$  bis 750 000 Jungstadien (C4, s. 12.3.2.1) des Hüpferlings *Cyclops vicinus*. Für Sauerstoff wenig anspruchsvolle Organismen können somit auch im Schlamm eines kranken Sees leben.

### 2.4.4 Der Mensch als Verursacher der Seekrankheit

Schon im letzten, aber besonders in diesem Jahrhundert ist der Nährstoffgehalt der meisten Seen stark angestiegen [3, 69, 82]. Hauptursachen sind die Zunahme der Wohnbevölkerung, die damit zusammenhängende Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion und die Einführung phosphathaltiger Waschmittel nach dem Zweiten Weltkrieg.

#### 2.4.4.1 Wohnbevölkerung

Von 1880 bis 1971 (zu Beginn unserer Untersuchungen) nahm die Wohnbevölkerung der Schweiz von 2,8 Mio. auf 6,3 Mio. zu. Ende 1990 betrug sie 6,849 Mio., Ende 1993 6,97 Mio., 1994 wurde die 7-Mio.-Grenze überschritten [20, 21]. Noch rascher nahm der in grösseren Siedlungen bzw. Städten lebende Bevölkerungsanteil zu (Verstädterung). Betrugen 1888 die landwirtschaftlich Tätigen in der Schweiz noch 36,9%, war ihr Anteil 1980 auf 4,7% und 1990 auf 3,9% zurückgegangen. Jeder Mensch scheidet im Tag mit Kot und Harn 1,5 g P und 12 g N aus. Die biologischen Abgänge der Stadtbewohner werden über Kanalisationen in Gewässer geleitet und düngen diese, statt, wie ursprünglich, das Kulturland. Verstädterung unterbricht den natürlichen Kreislauf der Nährstoffe und ist, zusätzlich zum Bevölkerungswachstum, Bahnbrecher der Überdüngung (Eutrophierung) von Seen.

#### 2.4.4.2 Landwirtschaft

Von 1911 bis 1978 nahm der Viehbestand der Schweiz (Rinder, Pferde, Schweine, Schafe, Ziegen) von 2,66 Mio. auf 4,66 Mio. zu. Zugemessen haben vor allem Rindvieh (von 1,44 auf 2,04 Mio.) und Schweine (von 570 000 auf 2,2 Mio. um 1980) [105]. Dies ergibt mehr N- und P-haltigen Hofdünger, 1978 das Äquivalent von 167 000 t N und 30 000 t P. Nach 1978 ging der Viehbestand bis 1997 auf 3,567 Mio. zurück, und damit sank der Anfall von Stalldünger-N auf rund 130 000 t und von Stalldünger-P auf 20 000 t [105].

Von 1936/40 bis 1991/95 nahm der Verbrauch von zugekauftem N-Dünger unablässig zu von 2340 t auf 84 800 t/a, das heisst um einen Faktor von 36! Bis 1997/98 sank er auf 58 600 t/a N. Der Verbrauch von zugekauftem P-Dünger nahm von 1936/40 bis 1979/80 von 11 000 t/a auf 24 000 t/a P zu. Bis 1997/98 sank er wieder auf 8560 t/a [105]. Ein Teil dieser Dünger gelangt durch Auswaschung, Oberflächenabfluss oder Bodenerosion diffus in die Gewässer und ist durch Kläranlagen nicht zu erfassen. Nitrat gelangt auch ins Grundwasser und beeinträchtigt seine Qualität.

#### 2.4.4.3 Wasch- und Reinigungsmittel

Nach 1955 wurden in der Schweiz den Wasch- und Reinigungsmitteln Polyphosphate (z.B.  $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10}$ ) als Wasserenthärter zugefügt. Parallel damit stieg der Verbrauch von Waschpulver auf synthetischer Basis von 5000 t (1952) auf >40 000 t (1974) und der Reinigungs-, Wasch- und Putzmittel zusammen von 31 566 t (1955) auf 94 894 t. Um 1974 erreichte der Pro-Kopf-Verbrauch von Phosphor in Wasch- und Reinigungsmitteln den Rekordwert von 3.4 g pro Tag und Person [44], mehr als doppelt soviel wie P aus unserem Stoffwechsel. Waschmittelphosphate gelangten über Kanalisationen volumänglich in die Gewässer und übten hier dieselbe Düngwirkung aus wie Phosphat anderer Herkunft. Seit 1986 sind Textil-Waschmittelphosphate verboten.

Anfang der 70er Jahre hatten die meisten Seen der Schweiz den Höhepunkt ihrer Überdüngung erreicht. In der Folge nahm die P-Belastung der Seen dank Gewässerschutzmassnahmen ab [3, 23, 69, 82]. Dies zeigt unsere *Abbildung 21* für den Bielersee.

### 2.5 Natürliche Eutrophierung und Verlandung von Seen

Die durch den Menschen verursachte Überdüngung der Seen lässt uns leicht vergessen, dass Seen auch natürlicherweise eutroph werden können. Durch Bodenerosion gelangen Nährstoffe, organische und anorganische Teilchen in die Gewässer. Zeitweise wird dadurch die Algenvermehrung beschleunigt, und die sedimentierenden Algen und eingeschwemmten Partikeln füllen im Laufe von Jahrtausenden ein Seebecken auf. Der See verlandet. Mit diesem natürlichen Prozess werden wir uns im folgenden nicht weiter befassen.

## 2.6 Gewässerschutz, Ziele und Realität

Ziele des Gewässerschutzes sollten, soweit noch möglich, die Erhaltung oder Wiederherstellung eines naturnahen Zustandes der Gewässer sein, bezüglich Wasserführung und -Qualität, Ufergestaltung, Organismen. Nach dem Inkraftsetzen der Gewässerschutzgesetze von 1957 und 1971 wurden vor allem bauliche Massnahmen zur Abwasserreinigung ergriffen und subventioniert. Bisher sind in der Schweiz rund 1000 kommunale Abwasserreinigungsanlagen (ARA) gebaut worden, welche die Siedlungsabwasser mechanisch (Rechen, Sandfang, Fettfänger, Klärbecken), biologisch (mit Zerlegerorganismen auf Tropfkörpern oder im Belebtschlamm), chemisch (Phosphatfällung mit  $Fe^{+++}$  oder  $Al^{+++}$ ) und physikalisch (Flockungfiltration) reinigen. Hierfür wurden bis 1997 40 Mrd. Franken in Bau von Kanalisationen und Erstellung und Betrieb von Kläranlagen investiert [21]. Im Laufe der 70er und 80er Jahre gingen in vielen Seen, auch im Bielersee, P-Belastung und -Konzentration markant zurück. N freilich nahm bis 1991 weiterhin zu (siehe Abbildung 21, unter 7.3.2, ferner 17.3.6.2). Die Algenproduktion, auf die es schliesslich ankommt, nahm in stark eutrophen Seen nur wenig ab: Bei hohem P-Eintrag werden die Algenpopulationen im Sommer so dicht, dass ihr Gedeihen nicht mehr durch P, sondern durch Lichtmangel infolge Selbstbeschattung eingeschränkt wird. In vielen Seen ist trotz der Abnahme der P-Werte Licht immer noch limitierend. P war ursprünglich 10- bis 20mal im Überschuss vorhanden, heute noch 2- bis 3mal.

Abwasserreinigungsanlagen bekämpfen insofern Ursachen, als durch Wiederverwertung von Klärschlamm in der Landwirtschaft der durch Verstädterung unterbrochene Nährstoffkreislauf wieder geschlossen wird. In der Schweiz fallen jährlich >4 Mio.  $m^3$  Klärschlamm an. Der Verwendung von Klärschlamm als Dünger sind aber Grenzen gesetzt. Viele Böden werden bei Massentierhaltung mit zugekauftem Kraftfutter dermassen überdüngt, dass zusätzliche Gaben von Klärschlamm aus Gewässerschutzgründen unerwünscht sind. Ferner sind zahlreiche Klärschlämme wegen ihres Schwermetallgehalts suspekt. 1994 gelangten in der Schweiz mit Klärschlamm 200 Tonnen Schwermetalle auf landwirtschaftliche Böden (1984: >500 t) [21]. Wurden 1975 noch 70% des Klärschlammes in der Landwirtschaft verwertet [28], waren es 1990 noch 42%. Um 2000 dürften es 36% sein [31]. Von den >4 Mio.  $m^3$  Flüssigschlamm pro Jahr (1995: 290 000 t Trockensubstanz) wurden 1990 58% deponiert oder verbrannt [29]. Abwasserreinigungsanlagen haben wohl die Gewässer entlastet, belasten aber jetzt Böden und Atmosphäre. Dies zeigt:

Die Wiederverwertung der biologischen Abfälle aller Organismen einer Region, wie die Schweiz, ist durch die Produktivität des Kulturlandes und die Belastbarkeit der Gewässer mit Biomasse und Nährstoffen begrenzt. Wird die Region mit Menschen und Haustieren dank Import von Nahrung künstlich übervölkert, können nicht mehr alle Abfälle auf natürliche Art rezykliert werden. Sie häufen sich im System (z.B. in Gewässern) an und werden dann technisch entsorgt, beispielsweise verbrannt oder deponiert, aber nicht ohne Rückwirkungen auf die Umwelt. Aus dem organismischen Abfallüberschuss (Hofdünger, Klärschlamm) entstehen entweder Methan ( $CH_4$ ), ein

Treibhausgas, oder  $\text{CO}_2$  (treibhausneutral, s. 8.3.). Biomassen-Stickstoff bildet das gewässerbelastende Nitrat, nach Denitrifikation zum Teil  $\text{N}_2$  (unbedenklich), aber auch das Treibhausgas und den Ozonkiller  $\text{N}_2\text{O}$  (Lachgas). Phophat wird nicht vernichtet, sondern nur modifiziert und verschoben. Dasselbe gilt für Schwermetalle im Klärschlamm.

Ursachenbekämpfungsmassnahme ist das Phosphatverbot vom 1.7.1986 für Textilwaschmittel. Aber warum nicht gleich für alle Reinigungsmittel? Und wie werden sich die Ersatzstoffe (z.B. NTA) in Gewässern auswirken? Und warum erst 1986, nachdem schon Ende der 60er Jahre bekannt war, dass P der Hauptverursacher der Gewässer-eutrophierung ist? Ein Verbot hätte Anfang der 70er Jahre die P-Fracht von Abwässern rasch um zwei Drittel herabgesetzt und vielerorts den Einbau einer kostspieligen 4. Reinigungsstufe erspart [1]. Politik und Wirtschaft haben oft andere Ziele als Gewässerschutz aus ökologischer Sicht. Und doch waren, angesichts der hohen und zunehmenden Besiedlungsdichte, die bisherigen Gewässerschutzmassnahmen unumgänglich.

### 3. Das Untersuchungsgebiet

#### 3.1 Der Bielersee und die Gewässer seines Einzugsgebietes

Wir haben die meisten Untersuchungen am Bielersee durchgeführt (s. Abbildung 3). Dieser liegt im Nordwesten der Schweiz am Jurasüdfuss, rund 25 km nordwestlich von Bern. Seine Längsachse (15 km) erstreckt sich von Biel in südwestlicher Richtung nach La Neuveville bis Le Landeron. Die (maximale) Breite beträgt auf der Höhe von Schafis 4,25 km, bei der Ausmündung des Nidau-Büren-Kanals 1 km. Der westliche Teil des Sees wird durch eine 4 km lange Landzunge zwischen Erlach und der St. Petersinsel, den Heidenweg, in zwei Becken unterteilt: das südwestliche Lüscherzer Becken und das nordwestliche Neuenstadter Becken. Zwischen Insel und Biel liegt das östliche Hauptbecken. Das felsige Nordufer fällt steil ab, das südliche Litoral dagegen hat flache, bis 500 m breite Sandbänke mit Tiefen von 1,5–2 m. Die tiefste Stelle des Sees (74 m) liegt südwestlich von Tüscherz, im Hauptbecken. Dort war unsere wichtigste Probestelle.

Die Zuflüsse des Bielersees sind der Aare-Hagneck-Kanal mit 76,9%, der Zihl-Kanal aus dem Neuenburgersee mit 20,6% und die Schüss aus dem St. Immortal mit 2,5% des Zuflusswassers (s. Fussnote unter 5.2.2.5). Der Twannbach sowie kleinere Bäche sind unbedeutend. Hauptabfluss ist der Nidau-Büren-Kanal. Die bei Biel abfliessende Alte Zihl mündet südöstlich von Nidau, oberhalb von Brügg, in den Nidau-Büren-Kanal. Die mittlere Ablussmenge bei Brügg beträgt von 1935 bis 1996 244  $\text{m}^3/\text{s}$  [52].

Unter den Zuflüssen haben wir die Schüss unter der Leitung von **FRAU ANGELA VON KÄNEL** eingehend untersucht [136, 137]. Ihre Mitarbeiter waren **ADRIAN JAKOB** [53, 56] und **ROBERT WEGMÜLLER** [144]. Diese Arbeiten waren der Schutzwürdigkeit, zivilisatorischen Belastung und Limnologie der Schüss gewidmet. Wir werden im folgenden nicht näher darauf eintreten können. Ebenso verweisen wir für die Untersuchungen von **HANS ULRICH RÜFENACHT** und **MARTIN SPÖRRI** [93] an der Alten Aare zwischen Aarberg und Lyss auf 3.2 und ihre Arbeiten.