

Nationalpark
Berchtesgaden



Der Königssee Eine limnologische Projektstudie



Der Königssee Eine limnologische Projektstudie

Arbeitsgruppe Limnologie des Zoologischen Instituts der Universität München
Leitung und Ausarbeitung: O. Siebeck

Impressum:

Nationalpark Berchtesgaden
Forschungsberichte 5/1982; 2. Auflage 1985

Herausgeber:
Nationalparkverwaltung Berchtesgaden
im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums
für Landesentwicklung und Umweltfragen

Alle Rechte vorbehalten

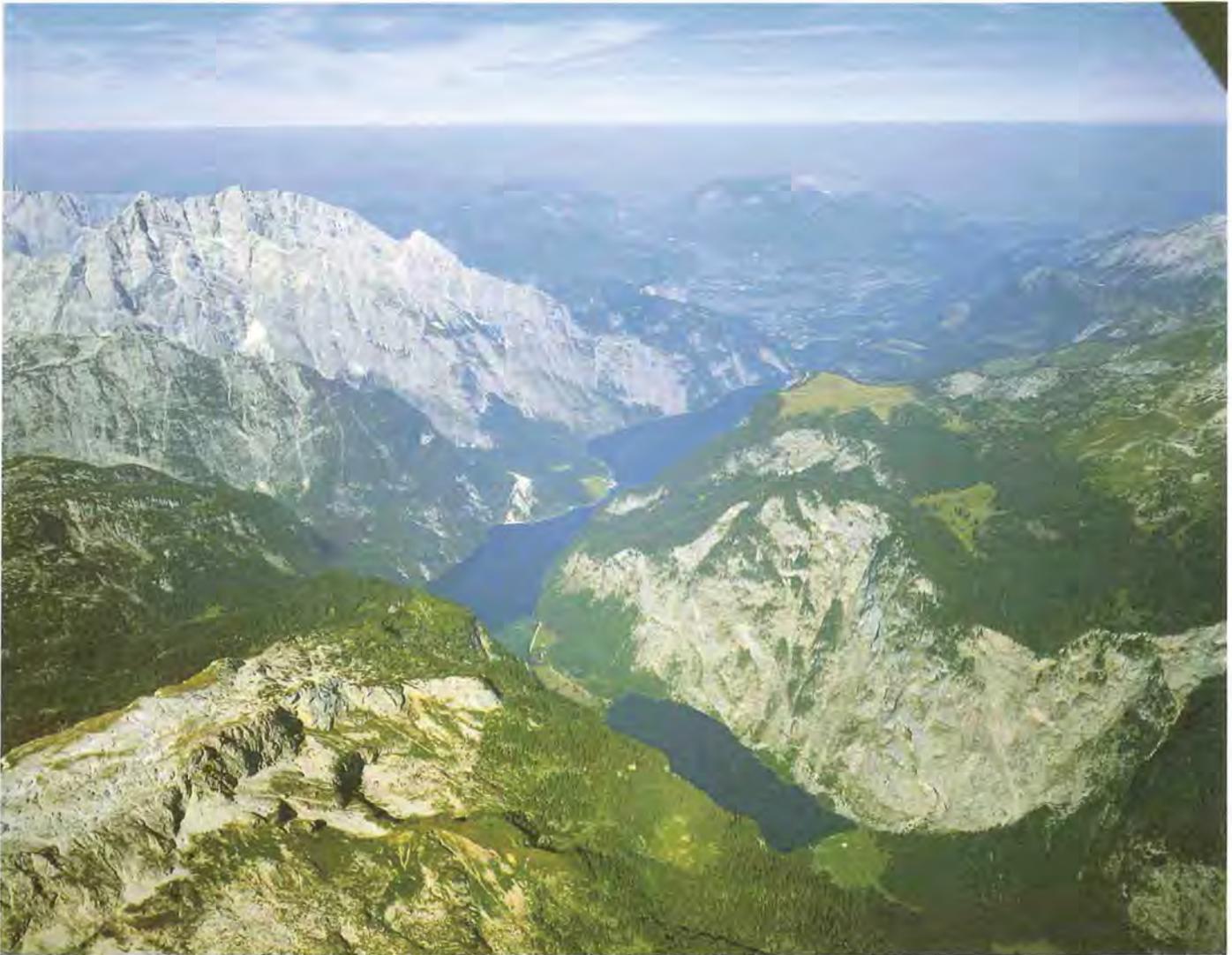
ISSN 0172-0023
ISBN 3-922325-04-1

Satz und Druck:
Ortmann-Druck, Mitterfelden

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung und Dank	5
2. Problemstellung	8
3. Erdgeschichte der Königssee-Landschaft	9
3.1 Die Entstehung der alpinen Kettengebirge	9
3.2 Die alpine Trias im Berchtesgadener Raum	9
3.2.1 Die Trias in der Tirolischen Facies	10
3.2.2 Der Jura in der Tirolischen Facies	12
3.3 Zur Großtektonik der Berchtesgadener Alpen	13
3.4 Die Entstehung des Königssees	13
4. Das hydrologische System „Königssee“	15
4.1 Der See als Teil eines hydrologischen Systems	15
4.2 Das Königssee-Einzugsgebiet	16
4.2.1 Orographische Eigenschaften	16
4.2.2 Hydrologische Eigenschaften	17
4.2.3 Geologische Eigenschaften	17
4.2.4 Vegetation	21
4.2.5 Anthropogene Einflüsse	21
4.3 Morphometrische Eigenschaften des Seebeckens	24
5. Der Königssee als Lebensraum	34
5.1 Strukturelle Gliederung eines Sees	34
5.2 Die Sonnenstrahlung als Energielieferant	35
5.3 Die Eigenschaften des Pelagials	35
5.3.1 Transmissionseigenschaften	35
5.3.2 Thermik	38
5.3.2.1 Schichtung und Zirkulation	38
5.3.2.2 Wärmeinhalt	39
5.3.2.3 Jahreszeitlicher Temperaturverlauf	40
5.3.2.4 Vertikale Temperaturschichtung	42
5.3.2.5 Zirkulationsverhalten	45
5.3.2.6 Relativer thermischer Widerstand und Stabilität	45
5.3.3 Die chemischen Eigenschaften	48
5.3.3.1 Prinzipielle Vorbemerkungen	48
5.3.3.1.1 Pflanzennährstoffe, Herkunft und Bedarf	48
5.3.3.1.2 Chemische Schichtungen in Abhängigkeit vom Trophiegrad	50
5.3.3.2 Salinität und Ionenzusammensetzung	50
5.3.3.3 Karbonate, Leitfähigkeit und pH	55
5.3.3.4 Nitrat	58
5.3.3.5 Silikat	59
5.3.3.6 Sulfat	61
5.3.3.7 Phosphat	61
5.3.3.8 Sauerstoff	64
5.3.3.8.1 Verteilung im oligotrophen und eutrophen See	65
5.3.3.8.2 Verteilung in Raum und Zeit	65
5.3.3.8.3 Aktuelles und relatives Sauerstoff-Defizit	67
5.3.3.8.4 Dynamik der Konzentrationsveränderungen	68
5.3.3.8.5 Größe und Tiefenabhängigkeit der Zehrung im Hypolimnion	71
5.3.3.8.6 Ursachen der tiefenabhängigen Zehrungsunterschiede	71
5.4 Abschätzung des Nährstoffimportes	77
5.5 Abschätzung der kritischen Belastungsgrenzen	79
6. Ausgewählte Organismengesellschaften des Ökosystems Königssee	83
6.1 Organismen des Benthals	83
6.1.1 Die submerse Makrophytenvegetation	83

6.1.2	Die Chironomiden	87
6.2	Organismen des Pelagials	88
6.2.1	Das Phytoplankton	88
6.2.1.1	Artenzusammensetzung	88
6.2.1.2	Veränderung im Jahresablauf	93
6.2.1.3	Biomasse und Chlorophyll	100
6.2.2	Das Crustaceenplankton	103
6.2.2.1	Artenzusammensetzung	103
6.2.2.2	Tiefenverteilung	106
6.2.2.3	Populationsdynamik	108
6.2.2.4	Biomasse	111
6.2.3	Das Rotatorienplankton	114
6.2.3.1	Artenzusammensetzung	114
6.2.4	Die Fische	116
6.2.4.1	Artenzusammensetzung	116
7.	Der Aufbau organischer Substanz	119
7.1	Die photoautotrophe Primärproduktion im Lebensraum Pelagial	119
7.1.1	Vorbemerkungen	119
7.1.2	Vertikale Produktionsverteilung	121
7.1.3	Schätzung der Tages- und Jahresproduktion	123
7.1.4	Aktivität, photosynthetische Kapazität, Turnover und Effektivität	124
8.	Zusammenfassung	126
8.1	Entstehung, Geologie, Hydrologie, Morphometrie	126
8.2	Hydrographie	126
8.3	Chemische Eigenschaften	126
8.4	Organismengesellschaften	127
8.5	Populationsdynamik der Planktoncrustaceen	127
8.6	Phytoplanktonmasse und Primärproduktion	127
8.7	Anthropogene Beeinflussung des Königssees	128
8.8	Indikatoren für den gegenwärtigen oligotrophen Status des Königssees	128
9.	Literaturverzeichnis	129



Blick auf den Königssee und den Obersee vom Flugzeug aus. Die fjordartige Einbettung des Königssees inmitten der steil aufragenden Gebirgszüge schränkt nicht nur die Sonnenstrahlung ein, sondern auch die Windtätigkeit. Diese beiden Fakten sind für den Stoffhaushalt des Königssees von großer Bedeutung. Die überwiegend unbewirtschafteten Flächen im Einzugsgebiet des Königssees sichern ihm eine besonders gute Wasserqualität.
Freigegeben Reg. v. Obb. Nr. GS 300/8618.

1. Einleitung und Dank

Überall, wo der Mensch durch seine Zivilisation in die Ordnung seiner terrestrischen Umgebung eingreift, beeinflusst er wegen der engen Wechselwirkungen zwischen Land, Wasser und Atmosphäre seine gesamte Umwelt. Die Kennzeichen dieser Einflüsse sind vielfältig. Im Grunde genommen lassen sie sich jedoch einem gemeinsamen Phänomen zuordnen: der Erhöhung des Energie- bzw. Materieflusses in der menschlichen Gesellschaft, die sich von der Natur jedoch nicht abkoppeln lässt und daher eine gewaltige Umstrukturierung mit z. T. unvorhersehbaren Folgen bewirkt.

Der Kern dieser Entwicklung kann nicht gestoppt werden. Er ist so alt wie der Mensch – ja, so alt wie das Leben, denn jeder heterotrophe Organismus zerstört Ordnung in seiner Umwelt, um eigene Ordnung aufzubauen. Was den Menschen betrifft, so bestürzt das Aus-

maß, den dieser Konflikt in relativ kurzer Zeit angenommen hat. Verursachte der Mensch früher ausschließlich lokal begrenzte Schäden, wie z. B. die Verkarstung der Landschaft durch Abholzung ganzer Wälder, so beobachten wir heute globale Veränderungen, wie z. B. die Verschmutzung der Meere und die Zunahme des Kohlendioxyds in der Atmosphäre.

Man sollte nicht daran zweifeln, daß der Mensch die intellektuelle Fähigkeit besitzt, vorhandene Schäden einzudämmen und weitere Fehlentwicklungen zu verhindern. Die von ihm entwickelte Technik kann ihm durchaus das erforderliche Rüstzeug liefern – aber nur, wenn mindestens zwei Voraussetzungen erfüllt sind: Die Technik darf nicht nur im Sinne der althergebrachten Naturüberwindung, nicht zur Sicherung eines ungehemmten Konsums und keineswegs nur zur notdürftigen Reparatur oder gar Maskierung der entstandenen Schäden eingesetzt werden, sondern zur Durchsetzung einer den Haushalt der Natur erhaltenden Entwicklung.

Das ist die eine Voraussetzung. Die andere Voraussetzung ist, daß die Konsequenzen dieser Forderungen rasch in die Praxis umgesetzt werden. Zwischen Einsicht und Praxis darf es – kybernetisch gesprochen – keine lange „Totzeit“ geben.

Welche Arten von Einsichten liefern uns das „Know how“ für Maßnahmen zur Erhaltung des Naturhaushalts? Was auch immer dazugehören mag, unentbehrlich sind in jedem Fall Einsichten in das Funktionieren von Ökosystemen mit und ohne Einfluß des Menschen. Was aquatische Ökosysteme betrifft, so hat H. T. Odum bereits im Jahre 1957 mit seinen bahnbrechenden Untersuchungen über die „Trophic structure and productivity of Silver Springs“ Maßstäbe und Richtung für das weitere Vorgehen festgelegt. Seither sind zahlreiche weitere Arbeiten in dieser umfassenden Konzeption bekannt geworden, auf limnologischem Sektor jedoch nur im Ausland. Dafür gibt es viele Gründe, die hier nicht zu diskutieren sind. Zu ihnen zählt aber auch der Umstand, daß sich Flüsse und Seen in Deutschland unter dem Einfluß der anthropogenen Belastung meist schneller verändern, als im Verlauf einer umfassenden Ökosystemanalyse akzeptierbar ist.

In Deutschland gibt es nur noch einen großen See, der dank einer nahezu unberührten Umgebung hinreichend konstante Eigenschaften besitzt und daher für eine Ökosystemanalyse geradezu optimal ist: den Königssee. Wie ist diese Sonderstellung zu erklären? Zunächst waren es wohl die besonderen Erschwernisse, die sich seiner „Erschließung“ entgegengestellt haben. Sie ergeben sich aus seiner Lage inmitten des um ihn steil aufragenden Gebirges. Langfristig hätte aber auch dieser Umstand keinen hinreichenden Schutz für See und Umgebung geboten. Das von der Nationalparkverwaltung Berchtesgaden herausgegebene Buch „Geschichte eines Schutzgebietes“ (H. Zierl 1981) vermittelt einen guten Einblick in das hartnäckige Bemühen, auch dieses Gebiet nach Maßstäben zu bearbeiten, die sich z. B. aus dem Massentourismus ergeben. Und in dem Buch „Nationalpark Berchtesgaden“ (G. Meister 1976) läßt sich nachlesen, welche Eingriffe diese Landschaft in früheren Jahren bereits über sich ergehen lassen mußte.

Ohne den fortwährenden Einsatz einiger weniger Persönlichkeiten wären der Königssee und seine Landschaft nicht zu retten gewesen. Zwei Daten kennzeichnen diesen Erfolg ungezählter Initiativen und unablässigen Bemühens: der 13. Juli 1972 – an diesem Tage faßte der Bayerische Landtag den Beschluß, einen „Bayerischen Alpenpark“ zu planen und – sechs Jahre später – der 1. August 1978 – als die vom damaligen Bayerischen Ministerpräsidenten Dr. h. c. A. Goppel unterzeichnete Verordnung über den Alpen- und den Nationalpark Berchtesgaden in Kraft gesetzt worden ist.

Der unmittelbare Zweck dieser Verordnung, „die gesamte Natur zu schützen“ (§ 6, 1), wird nicht ihre einzige Wirkung sein. Indem sie neben der Erholung ausdrücklich auch den Bildungszweck hervorhebt (§ 6, 3), bietet sie unserer Generation und den folgenden die groß-

artige Gelegenheit, ein Stück verhältnismäßig unberührter Natur in einer grandiosen Landschaft unmittelbar vor den Toren einer immer mehr von Zersiedelung beeinflussten Landschaft zu erleben. Der Nationalpark Berchtesgaden wird daher eine Stätte sein, die unsere zwischen den Sachzwängen des Tages handelnde Gesellschaft zum Nachdenken über Herkunft und Ziel ihres Daseins ebenso nötig hat wie ihre Kulturdenkmäler.

Der naturwissenschaftliche Anteil der Bildungsaufgaben setzt wertfreie Forschung voraus. Diesem Anliegen trägt der § 7, 1 Rechnung, indem es dort heißt, daß „Forschungseinrichtungen . . . wissenschaftliche Untersuchungen sowie Forschungsvorhaben durchführen“.

Zahlreiche Fragestellungen sind bereits in den vergangenen Jahren bearbeitet worden, weitere sind Gegenstand laufender Untersuchungen (vgl. Amtsblatt des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen Nr. 6). In Zukunft wird das von der Bundesrepublik Deutschland und der UNESCO betreute Forschungsprogramm „Man and Biosphere“ durch das Projekt Nr. 6: „Einfluß menschlicher Aktivitäten auf Gebirgs- und Tundraökosysteme“ ein besonderes Gewicht erhalten.

Damit sind wir bei dem am 1. 12. 1977 dem Zoologischen Institut der Universität München vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen erteilten Auftrag „Limnologische Erforschung des Königssees“ angelangt. Sein zentrales Anliegen war die Erarbeitung der „limnologischen Grundlagen für eine umfassende Analyse des Ökosystems Königssee, die sich . . . in weitere künftige Forschungsvorhaben im Bereich des Nationalparks einordnen lassen“.

Dem besonderen Umstand, daß limnologische Grundlagenforschung an den Universitäten in Bayern nur jeweils von Einzelpersonen oder Kleinstgruppen mit entsprechender Ausstattung betrieben werden kann, trug das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen insofern Rechnung, als es die gesamte für limnologische Arbeiten erforderliche Grundausrüstung und die Mittel für zwei wissenschaftliche Assistentenstellen nach BATIIa für den Untersuchungszeitraum von drei Jahren zur Verfügung gestellt hat. Trotz dieser Unterstützung wären die Arbeiten auf dem Königssee ohne die Hilfe des Forstamtes Berchtesgaden, das uns im Forsthaus in St. Bartholomä die Einrichtung eines Feldlabors gestattete und gelegentlich personelle Unterstützung gewährte, nicht möglich gewesen. Dieser Institution, aber auch Herrn Forstdirektor Dr. Zierl und seinen Mitarbeitern von der Nationalparkverwaltung Berchtesgaden für ungezählte organisatorische Hilfen und Herrn Direktor Kupfer von der Staatlichen Schifffahrt Königssee gilt unser ganz besonderer Dank.

Die organisatorische Planung, Gerätebestellungen, Zollangelegenheiten, Verwaltung und Abrechnung haben uns, die wir ohne jede Verwaltungshilfe auskommen mußten, oft schwer zugesetzt. Daß dennoch alle

Probleme zufriedenstellend gelöst werden konnten, verdanken wir den Herren vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, insbesondere Herrn Dr. Mühlhölzl und Herrn Regierungsdirektor Dr. A. Hamm, Bayerische Landesanstalt für Wasserforschung. Dem Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft, das die Neuvermessung des Königssees übernommen hat, danken wir für die Überlassung der Meßergebnisse.

An der Durchführung des Königsseeprojektes haben von der Abteilung Limnologie des Zoologischen Instituts zeitweise und für die im einzelnen angegebenen Spezialgebiete mitgewirkt: Ing. grad. Dipl.-Biol. F. R. Bauer (Chemie, Primärproduktion), J. Fürfang (Chemie), Dipl.-Biol. E. Geipel (Phytoplankton), Dipl.-Biol. R. Kotschenreuther (Crustaceenplankton), Dipl.-Biol. H. Lemmer (Crustaceenplankton), Dipl.-Biol. R. Lehmann (Sedimentation), Dipl.-Biol. R. Müller (Sauerstoffhaushalt), Dipl.-Biol. M. Peter (Phytoplankton), Dipl.-Biol. G. Seitz (Chemie). Die Mitarbeit von R. Kotschenreuther, R. Lehmann, H. Lemmer, R. Müller und G. Seitz erfolgte im Rahmen von Diplomarbeiten, die im Literaturverzeichnis aufgeführt sind. An den für den Abschlußbericht erforderlichen Auswertearbeiten waren R. Müller, F. R. Bauer und U. Böhm beteiligt. Meine technische Assistentin Fräulein A. Lutz schrieb den Text und fertigte die Zeichnungen an.

Bei den Auswertearbeiten waren wir bestrebt, eine möglichst weitgehende Vergleichbarkeit mit den im internationalen „OECD-Eutrophication Programme Alpine Lakes“ untersuchten Seen zu erreichen. Darüber

hinaus waren wir bestrebt, die Besonderheiten des Königssees unter dem Aspekt einer vergleichenden Limnologie darzustellen. Ohne das vielfältige Vergleichsmaterial von z.T. noch nicht publizierten Ergebnissen wäre dieses Anliegen kaum realisierbar gewesen. Unser Dank gilt daher den Professoren Dr. H. Ambühl, Zürich, Dr. R. Pechlaner, Innsbruck, Dr. M. Tilzer, Konstanz, Dr. H. Zankl, Erlangen, und den Doktoren C. Steinberg, München, O. Moog, Weyregg, C. Sossau, Innsbruck, R. und H. Schröder, Reichenau, A. Herzig, Wien, H. Sampl, Klagenfurt, K. Preißler, München, B. Scharf, München, Jaskolla, München, E. Kainz, Scharfling, und Priv.-Doz. Dr. F. Frimmel, München. Herrn Prof. Dr. Hrbáček, Prag, danken wir für die Bestimmung der Cladoceren, Dr. Einsle, Konstanz, für die Bestimmung der Copepoden, Dr. h.c. Koste, Quakenbrück, für die Bestimmung der Rotatorien und Dr. Reiss, München, für die Bestimmung der Chironomiden.

An dieser Stelle sei mir auch ein persönlicher Dank gestattet. Er gilt meiner Technischen Assistentin Fräulein A. Lutz und meiner Doktorandin Fräulein U. Böhm für ihre intensive und verlässliche Mitarbeit.

Wir übergeben den Abschlußbericht der Öffentlichkeit in der Hoffnung, künftigen Untersuchungen eine brauchbare Basis und der Nationalparkverwaltung Berchtesgaden viele Informationen für ihre Bildungsarbeit zu liefern. Was Letztere betrifft, so sind wir dem Wunsche des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen nach einer Darstellung der Ergebnisse in einem weiteren Rahmen gerne nachgekommen.

2. Problemstellung

Mit der Auftragserteilung durch das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen wurde die erste zusammenhängende limnologische Untersuchung eingeleitet. Die verfügbaren limnologischen Daten aus früherer Zeit beruhen durchwegs auf gelegentlichen Einzelmessungen und sind dementsprechend in der Literatur höchstens in Form kurzer Hinweise auffindbar. Nur in der Arbeit von O. Schindler (1950): „Der Königssee als Lebensraum“, die in den ersten Nachkriegsjahren entstanden ist, gibt es Angaben zur Temperatur, vor allem aber über das Plankton, die Fische und das Problem des Triaenophorus-Befalls der Seesaiblinge.

Zu Beginn unserer Arbeiten war der Königssee somit ein limnologisch weitgehend unbekanntes Gewässer. Aus diesem Umstand ergab sich zwingend die Aufgabe einer **limnologischen Bestandsaufnahme**, wobei der finanzielle Rahmen von Anfang an die Festsetzung von Prioritäten erforderlich machte. Die Chemie der Seezuflüsse, die Bestandsaufnahme des Litorals, die quantitative Bestandsaufnahme der Rotatorien und der Fische blieben von Anfang an ausgeschlossen. Stark eingeschränkt wurden die Messungen zum Strahlungs- und Wärmehaushalt und die quantitative Bestandsaufnahme des profundalen Benthos.

Die Auswahl der bearbeiteten Themen ergibt sich aus den folgenden Kapiteln. In Erweiterung des vertraglich festgelegten Programms war es erfreulicherweise möglich, einige spezielle Themen aufzunehmen, die sich im Verlaufe der Arbeiten ergeben hatten und von Diplomanden im Rahmen der für Diplomarbeiten vorgegebenen Zeit bearbeitet werden konnten.

3. Erdgeschichte der Königssee-Landschaft

3.1 Die Entstehung der alpinen Kettengebirge

Die Entstehung der Königssee-Landschaft ist kein lokales Ereignis, sondern Teil eines Geschehens, das der Bildung der Kettengebirge im gesamten Mittelmeerraum und darüber hinaus zugrunde lag. Wir können mit unseren Betrachtungen hierzu bei einer Hypothese der Geologen beginnen (Panza et al. 1982), nach welcher die heutigen Kontinente am Ende der präkambrischen Entwicklung in einem einzigen Urkontinent (= Pangäa) vereint waren. Viele Millionen Jahre später soll dieser Superkontinent in die Zahl der heute bestehenden Kontinente zerfallen sein, die sich voneinander fortbewegt haben (Kontinentalverschiebung). Zwischen Europa und Afrika auf der einen Seite – und Nord- und Südamerika auf der anderen Seite – entstand so der Atlantik. Sehr viel später, in der Trias – das war vor über 210 Millionen Jahren – trennten sich auch Europa und Afrika. Zwischen ihnen entstand ein großes Südmeer, die Tethys, die sich in ost-westlicher Richtung von Indonesien über Südasien bis in das Gebiet des östlichen Mittelmeeres erstreckte. In diesem erdumspannenden marinen Sedimentationsbecken (Geosynklinale) liegt die Wiege des alpidischen Gebirgszuges, der sich von den Pyrenäen und dem Atlas über die Apenninen und Alpen, über den Kaukasus und den Himalaya bis nach Indonesien erstreckte.

Am Ende der Trias – vor ca. 200 Millionen Jahren – hat sich das Meer aus weiten Gebieten zurückgezogen, so daß die Triassedimente Festland wurden (Ganss 1979). Aber schon zu Beginn der nachfolgenden Periode des Jura senkte sich dieses Festland erneut unter Meeresniveau. In dieser Zeitspanne erreichte die Tethys ihre größte Ausdehnung in nördlicher Richtung. Als sich jedoch die Kontinentalränder von Europa und Afrika während der Kreidezeit vor ca. 100 Millionen Jahren einander wieder näherten, schrumpfte die Tethys, wobei sie in voneinander getrennte Restmeere aufgegliedert wurde, von welchen eines zum heutigen Mittelmeer geworden ist.

Als die Kontinentalränder zusammengestoßen waren, wurde die Norddrift des afrikanischen Kontinents nicht beendet. Indem große Teile der Erdkruste (Lithosphäre) in die Tiefe gezogen wurden (Panza et al. 1982), schoben sich die Ränder beider Kontinente im Eozän – vor etwa 60 Millionen Jahren – wie riesige Scherben übereinander (Abb. 1). Dabei sollen sie viele 100 km ihrer Randgebiete verloren haben. Die südlicher gelegenen Gesteinskomplexe sind über die nördlicher gelegenen hinweggeglitten (Zankl 1981), und so wird verständlich, daß das Material der Kalkalpen und somit auch das Material der Berchtesgadener Hochgebirge weit nach Norden verfrachtet worden ist. Seine Heimat muß im südlichen Bereich der Tethys, d. h. in der Nähe des heutigen Nordrandes von Afrika gelegen sein. Im Jungtertiär, vor etwa 20 Millionen Jahren, waren die im Norden gelangten Gesteinsschichten zunächst eine weitflä-

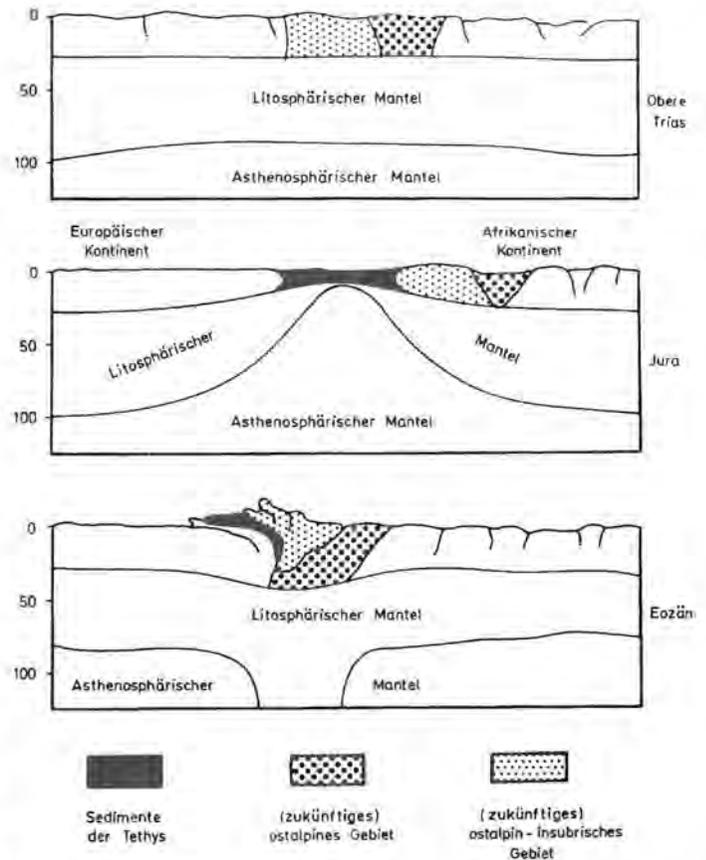


Abb. 1: Kontinentalverschiebung zwischen Afrika und Europa. In der Obertrias gehören europäischer und afrikanischer Kontinent noch der einheitlichen Lithosphäre des Urkontinents Pangäa an. Im Jura waren beide durch den Urozean Tethys getrennt. Später wurde der Ozean zusammengeschoben. Die Kollision führte zur Bildung zahlreicher Überschiebungsdecken sowie zur Hebung und Faltung der Gesteinsschichten, die für den Aufbau des Alpengebietes charakteristisch sind (nach Panza et al. 1982 verändert).

chige und formenarme Mittelgebirgslandschaft. Sie ist später durch einen gigantischen Hebungsprozeß und lokale Vertiefungen durch Talerosion zur Hochgebirgslandschaft geworden.

Dieser grobe Überblick wird dem Wechsel der Bedingungen in diesem unvorstellbar großen Zeitraum von vielen Hundertmillionen Jahren selbstverständlich nicht gerecht. Es ist daher auch nicht verwunderlich, daß der Geologe bei der Beschreibung und Analyse der durch Sedimentation entstandenen Gesteine auf viele Details stößt, die ihm eine weitaus differenziertere Betrachtung ermöglichen und darüber hinaus unzählige Fragen bringen. Ihre Analyse ist eine faszinierende Arbeit. Man bedenke, daß die Unterschiede in der Schichtung eines Gesteinsprofils m. E. Aussagen über Herkunft, Alter und die am Ort ihrer Entstehung herrschenden Bedingungen zulassen. Der erste Schritt der Analyse besteht darin, daß man die einzelnen Schichten und ihre Aufeinanderfolge beschreibt, so gut, daß man sie mit einem Namen bezeichnen kann und auch andernorts wieder erkennt.

3.2 Die alpine Trias im Berchtesgadener Raum

Für den Zeitraum der Trias, der vor ca. 225 Millionen Jahren mit der Ausbreitung der Tethys begann und vor

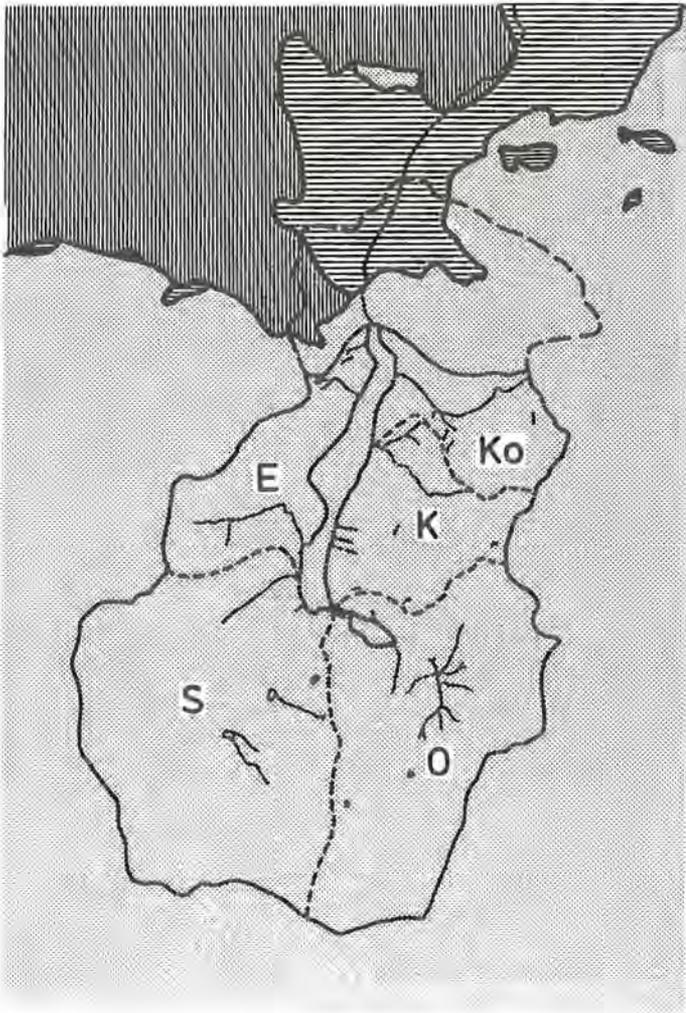


Abb. 2: Tektonische Übersichtskarte des Einzugsgebietes vom Königssee und seiner Nachbargebiete. Tirolische Facies Süd (punktiert), Berchtesgadener Facies (senkrecht schraffiert), Hallstätter Facies (quer schraffiert). Durch die fein strichlierten Linien werden die orographischen Einzugsgebiete der Zuflüsse des Königssees abgegrenzt: E Eisgraben, S Schrainbach, K Kesselbach, Ko Königsbach, O Obersee; durch die grob strichlierte Linie wird das Einzugsgebiet des Königssees durch das Einzugsgebiet der Königssee-Ache (Schwöbbrücke) erweitert (kombiniert nach Angaben von Pichler 1963 und aus dem Gewässeratlas von Bayern (CC 8742), Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 1976).

ca. 195 Millionen Jahren zu Ende ging, ergeben sich im alpinen Raum folgende stratigraphische Kennzeichen: Die älteste (d. h. im unteren Trias entstandene) Schicht wird Skyth genannt. Sie enthält im Berchtesgadener Raum Werfener Schichten und Buntsandstein. Die nächstjüngeren Schichten stammen aus der mittleren Trias (Beginn vor ca. 215 Millionen Jahren). Sie werden Anis bzw. Ladin genannt. Das Anis enthält den alpinen Muschelkalk, das Ladin den Wettersteinkalk. Das ist ein kaum gebankter Riffkalk, der vorwiegend durch Korallen und kalkabscheidende Algen entstanden ist. Im anschließenden Zeitraum der Oberen Trias (Beginn vor ca. 205 Millionen Jahren) lassen sich drei Stufen unterscheiden: Die älteste ist das Kar, welche die Raibler Schichten enthält. Das Kar ist durch den Dachsteindolomit und die jüngste dieser Schichten durch das Rät, welches den Kalksteinkalk oder die Kössener Schichten enthält, charakterisiert.

3.2.1 Die Trias in der Tirolischen Facies

Es fällt auf, daß die alpinen Trias-Ablagerungen im Raum von Berchtesgaden trotz der allgemein vorherrschenden Kalk-Dolomit-Sedimentation nicht über das ganze Gebiet hinweg gleich ausgebildet sind. Man bezeichnet die Teilbereiche mit ähnlicher Ausbildung als Facies-Einheiten und unterscheidet die Tirolische Facies mit den Untereinheiten Nord bzw. Süd, die Hallstätter Facies und die Berchtesgadener Facies. In der Tirolischen Facies Nord ist als wichtige Berggruppe die Staufergruppe zu nennen; in der Tirolischen Facies Süd sind es Watzmann, Hochkalter, Hoher Göll und Steinernes Meer. Zur Berchtesgadener Facies gehören der Untersberg, das Lattengebirge und die Reiteralpe, während in der Hallstätter Facies keine hohen Berge vorkommen.

Da das Einzugsgebiet des Königssees innerhalb der Tirolischen Facies Süd gelegen ist (Abb. 2), seien die weiteren Betrachtungen auf diesen Bereich beschränkt. Die ältesten Ablagerungen der Trias (Skyth) sind hier

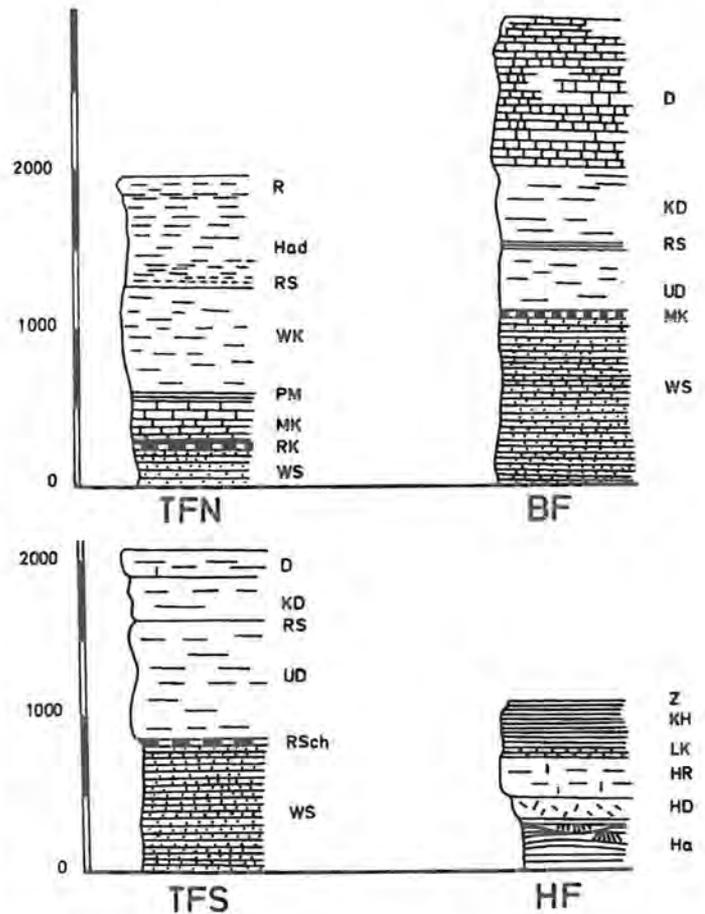


Abb. 3: Die alpinen Triasablagerungen im Raum von Berchtesgaden, die aufgrund ihrer unterschiedlichen Ausbildung verschiedenen Facies zugeteilt werden: TFN Tirolische Facies Nord, BF Berchtesgadener Facies, HF Hallstätter Facies. Das Einzugsgebiet des Königssees gehört in seiner Gesamtheit der Tirolischen Facies Süd (TFS) an. D Dachsteinkalk, Ha Haselgebirge mit Salz, HaD Hauptdolomit, HD Hallstätter Dolomit, KH Karnisch-norische Hallstätter Kalke, LK Lercheck-Kalk, MK Muschelkalk, PM Partnachmergel, R Riffkalk, RK Reichenhaller Kalk, RS Raibler Schichten, RSch Reichenhaller Schichten, UD Unterer Ramsaudolomit, WK Wettersteinkalk, WS Werfener Schichten, Z Zlambach-Mergel (nach Ganss 1977, verändert).

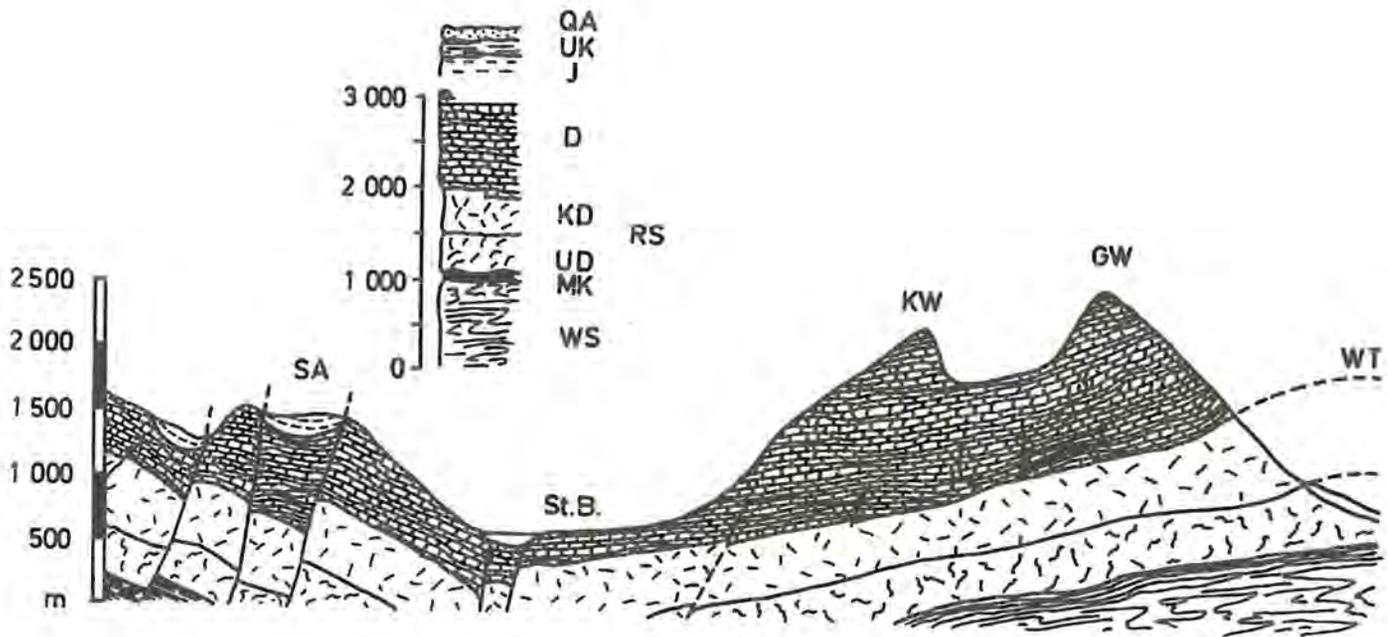


Abb. 4: Geologisches Ost-West-Profil von der Griesbergalpe zum Wimbachtal. Man beachte die Störungslinien (Bruchstellen), längs derer sich die Gesteinsschichten abgesenkt haben. Auch im Bereich des heutigen Königsseebeckens befindet sich ein Grabenbruch, der wahrscheinlich schon im ausgehenden Jura (vor 140 Millionen Jahren) angelegt worden ist. SA Seealpe, St. B. St. Bartholomä, KW Kleiner Watzmann, GW Großer Watzmann, WT Wimbachtal. Schichtenfolge: QA Quartäre Ablagerungen, UK Unterkreide, J Jura, D Dachsteinkalk, KD Karnisch-norischer Dolomit, RS Raibler Schichten, UD Unterer Ramsaudolomit, MK Muschelkalk, WS Werfener Schichten (nach Ganss 1977, verändert).

die Werfener Schichten, die in einem Flachmeer abgelagert worden sind, während sich der Meeresboden gesenkt hat. Sie bestehen aus einer wechselnden Sedimentfolge von Schiefern, Mergeln und dünn gebankten Sandsteinen und enthalten die Steinkerne von Muscheln – meist von *Anodontophora* sp. – und von Schnecken (*Natica* sp.).

Über den verhältnismäßig mächtigen Werfener Schichten (sie sind am Südrand dieser Facies über 800 m hoch) liegt die sehr dünne Anisische Stufe mit dünnbankigen, meist schwarzen und grauen Kalken (Abb. 3). Sie sind in der Regel stark zerklüftet und mit feinen weißen Kalzitgängen durchzogen. Insgesamt sind diese Schichten kaum höher als 50 cm. Sie werden Reichenhaller Schichten genannt. Die nun folgende, am Nordrand der Tirolischen Facies sehr mächtige Muschelkalkschicht ist in der Tirolischen Facies Süd nur in Resten vorhanden. Darüber folgt das Ladin, in welchem der Untere Ramsaudolomit mit bis zu 1000 m Höhe seine größte Mächtigkeit erreicht. Der Ramsaudolomit ist weiß bis hellgrau, meist ungebankt und zerklüftet. Bei der Verwitterung zerfällt er in eckigen Grus, der z. B. im Wimbachgrieß und im Eisbachtal riesige Schuttströme bildet. In der Tirolischen Facies Nord nimmt hingegen der Wettersteinkalk die Hauptschicht des Ladins ein. An seinem Aufbau waren vor allem Organismen beteiligt, darunter überwiegend Korallen und kalkabscheidende Algen, deren versteinerte Strukturen an den Gesteinsoberflächen gefunden werden.

In der Obertrias deutet die karnische Stufe den Wechsel in den Sedimentationsverhältnissen durch den stärkeren Einfluß des Festlandes an. Das Meer muß um diese Zeit immer flacher geworden sein. Durch das Ein-

schwimmen von Ton ist den zur Kalkabscheidung befähigten Organismen anscheinend die Lebensgrundlage entzogen worden (Zankl 1981), während in den Verlandungsgebieten eine üppige Vegetation mit Cycadeen (Palmfarne) und Equisetinen (Schachtelhalme) entstanden ist. Unter diesen Verhältnissen sedimentierten die Raibler Schichten, die im hinteren Wimbachtal eine 5 bis 10 m mächtige Schicht bilden. Darüber beginnen erneut Karbonatschichten, welche als besonderes Kennzeichen die kleinen, regelmäßig gebauten Ooide und die größeren, unregelmäßig gestalteten Onkoide enthalten. Sie sind aus schaligen Kalkabscheidungen in einem bewegten Flachmeer (Zankl 1981) entstanden. Über den Raibler Schichten liegt der karnisch-norische Dolomit. Er zeigt an, daß die ursprüngliche Art der Sedimentation im Prinzip wieder fortgesetzt, der Festlandeinfluß somit unterbrochen worden ist. In der Tiroler Facies Süd geht er ohne auffällige Grenze in den Dachsteinkalk über, der u. a. die Spitzen des Watzmanns, des Hochalters und die Plateaufläche des Steinernen Meeres aufgebaut hat (Abb. 4). Die dunklen Mergel, die das Rät beschließen, treten in diesem Raum kaum in Erscheinung.

Der Dachsteinkalk gilt als typisches Flachmeer-Sediment. Er ist durch eine auffällig rhythmische Bankung gekennzeichnet, in welcher jeweils bis zu 20 m dicke Kalkbänke mit einer weniger mächtigen Dolomitlage und einer dünnen, kräftig gefärbten Tonlage eine Einheit bilden. Nach Zankl (1981) ist auf den Schichtflächen ein „getreues Abbild des ehemaligen Meeresbodens“ erhalten geblieben. Besonders auffällig sind Gruppen von dickschaligen Muscheln, die sogenannten Megalodonten, die im Schnittbild einer Tierfährte („Hirschtritt“) nicht unähnlich sind. Es muß hier einst eine reich-

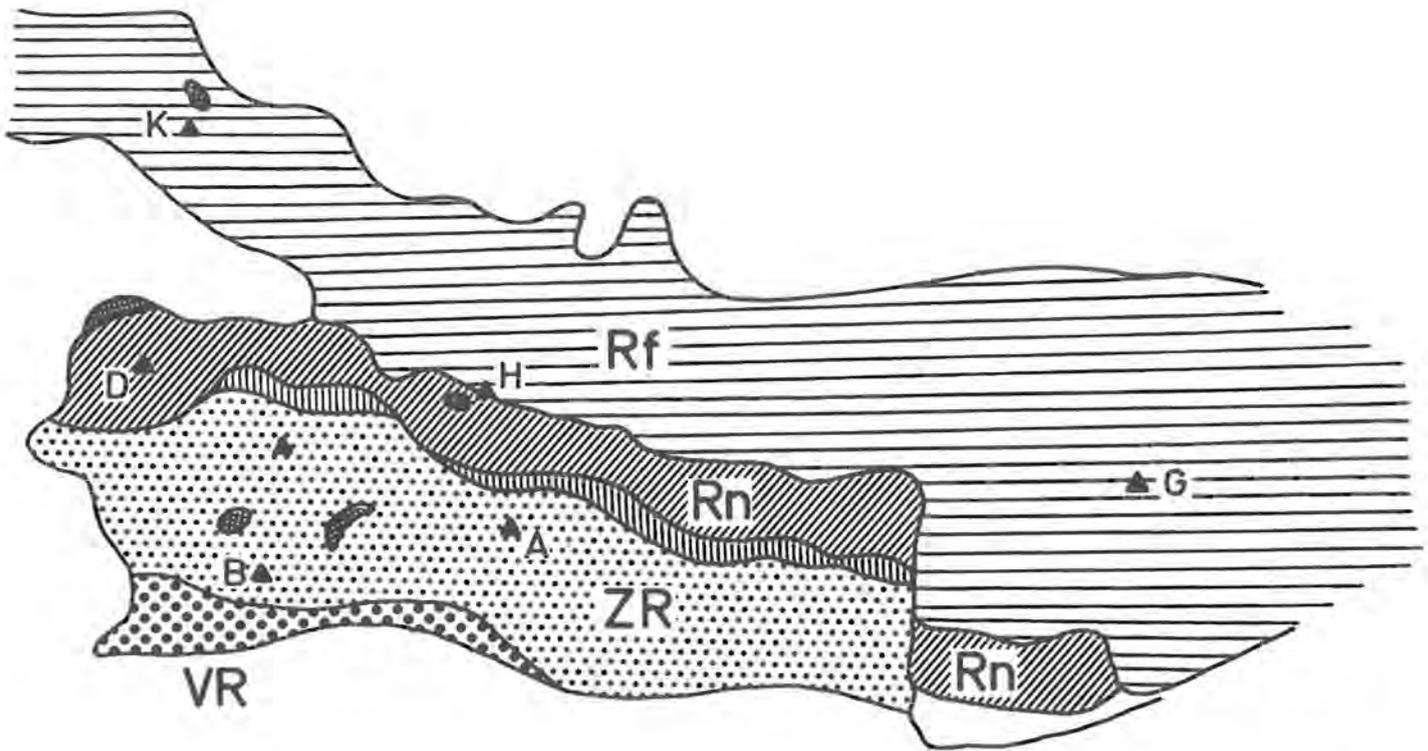


Abb. 5: An der Bildung des Dachsteinkalkes, die in der Nähe der heutigen Nordküste von Afrika in einem Flachmeer stattgefunden hat, waren zahlreiche kalkabscheidende Organismen beteiligt. Sie bildeten Riffe, deren Strukturen z. T. heute noch erkennbar sind, z. B. im Dachsteinkalk-Riff des Hohen Göll. Rifferne Zone (Rf quer gestreift), riffnahe Zone (Rn diagonal gestreift), Übergangsbereich (senkrecht gestreift), zentraler Riffbereich (ZR klein punktiert), Vorriff (VR punktiert), Auflagerung von Lias (kariert). K Kehlstein, H Hoher Göll, D Dürreckberg, B Hohes Brett, A Großer Archenkopf, G Kleiner Göll (nach Zankl 1969, verändert).

haltige Lebensgemeinschaft gegeben haben, denn man findet neben verzweigten Korallen (*Thecosmilia*) auch massive Stockkorallen, Armfüßer (*Brachiopoden*), Schnecken und Stachelhäuter, wie z. B. Seeigel.

Neben dem gebankten Kalk gibt es aber auch ausgedehnte Bereiche mit massigem Kalk, der auf Riffbildungen zurückzuführen ist. Er enthält ebenfalls die Kalkskelette zahlreicher Organismen, wie z. B. riffbildender Kalkschwämme (z. B. *Perodinella fischeri*), Korallen (z. B. *Palaeostrea grandissima*, *Thecosmilia* sp.), Hydrozoen, Bryozoen, Foraminiferen und die Strukturen kalkabscheidender Algen. In den Berchtesgadener Alpen ist der Hohe Göll ein schönes Beispiel für derartige Riffbildungen, die von Zankl (1969) untersucht worden sind (Abb. 5).

3.2.2 Der Jura in der Tirolischen Facies

Mit dem Dachsteinkalk sind wir bei einem der jüngsten Sedimentgesteine aus der Trias angelangt. Mit ihrem Ausgang zog sich das Meer weit zurück, so daß große bisher überflutete Gebiete Festland wurden und verkarsteten. In der Folgezeit senkte sich diese Karstlandschaft wieder. Sie war daher während der neuerlichen Ausdehnungsperiode der Tethys in der Juraperiode, die vor 195 Millionen Jahren begann, wieder überschwemmt. Nun lagerten sich neue marine Sedimentschichten ab, die drei Epochen zugeteilt werden: dem Lias – das ist die älteste Epoche –, dem Dogger und dem Malm.

Von den mächtigen Fleckenmergelschichten, die im Allgäu z. B. die Höfats aufbauen und auch in den Lechtaler Alpen weit verbreitet sind, ist im Bereich der Berchtesgadener Alpen nur wenig zu finden. Insbesondere über der Tirolischen Facies Süd ist der größte Teil dieser und anderer jüngerer Schichten während der Erdneuzeit (Känozoikum) wieder abgetragen worden. Um sie aufzufinden ist es nötig, die Täler zu studieren, z. B. die Wimbachklamm, die nach Zankl (1981) ein fast vollständiges Profil durch die Gesteine des Jura bietet.

Charakteristisch ist hier der rote Verwitterungslehm der Festlandperiode, der auch Hierlatzkalk genannt wird. In diesem Sediment findet man Ammoniten, Belemniten und die fünfstrahligen Querschnitte der Glieder von Seelilien (*Crinoiden*). Sie besiedelten den felsigen Untergrund aus Dachsteinkalk, in dessen Karsthohlräumen sich der rote Kalkschlick des Lias ansammeln konnte (Ganss 1979).

Neben dem Hierlatzkalk findet man auch hellgraue Kieselkalke und auffällig gebankte Kalke mit Hornsteinen (sehr harte Kieselsäureanreicherungen), den dunkelgrauen bis schwarz gefärbten Kieseliefer und den Kieselkalk. Schließlich ist der Fleckenmergel mit seinen dunkelpigmentierten Flecken zu erwähnen, die auf marine Wurmbauten zurückzuführen sind. Die nächstjüngere Schicht fällt in die Epoche des Dogger. Sie ist durch reine Ammonitenkalke und durch Radiolarite charakterisiert. Letztere sind aus Radiolarienschlick entstanden und im Verlauf der Zeit zu einem harten Kieselgestein umgewandelt worden, das man rot oder grün

gefärbt kurz vor dem unteren Ausstieg der Wimbachklamm finden kann.

Auch die Schichten des Malm enthalten Radiolarite mit z. T. gleichförmigen Kalken, die aber arm an Fossilien sind. Über ihnen liegen rötliche, Hornstein enthaltende Aptychenschichten. Das sind dünnbankige Kalke, die mit dünnen Mergelschichten wechseln und gelegentlich Ammonitendeckel, die sogenannten Aptychen, enthalten.

Die Existenz der in großen Mengen vorkommenden Radiolarien stützt die Annahme, daß das Meer während des Jura immer tiefer geworden ist. Erst während des oberen Malm zog sich das Meer über den zuletzt abgelagerten Sedimenten zurück. Das war vor ca. 137 Millionen Jahren, und seitdem ist das Gebiet um den Königssee Festland. Von den späteren Meeresüberflutungen wurde nur noch das Gebiet nördlich der Linie Ramsau-Berchtesgaden betroffen, so daß wir nur hier die marinen Sedimentfolgen der Kreidezeit finden. Zu ihnen gehören die sogenannten Roßfeldschichten, die in der Unterkreide entstanden sind. Hier findet man die ersten Wirkungen der beginnenden Alpenbewegung (Ganss 1979), deren Entwicklung zum heutigen Zustand jedoch vor allem in die Erdneuzeit (Känozoikum) fällt, die vor etwa 67 Millionen Jahren begann.

Man nimmt an, daß der Ablagerungsraum der Sedimentgesteine auch noch im Jura am Rande des afrikanischen Kontinents gelegen ist. Erst als der Raum der Tethys zusammengedrückt wurde, bildeten sich in der Kreidezeit Bruchstücke aus seiner obersten Kruste und ihrer Sedimentbedeckung, die man als Ophiolithdecken bezeichnet (Panza et al. 1982). Diese Bruchstücke überlagerten sich, wobei es zu Faltungen und Hebungen kam. Der damit eingeleitete Prozeß führte letztlich zum Aufstieg der alpidischen Hochgebirgskette. Im Jungtertiär, das vor etwa 25 Millionen Jahren begann, gab es im Berchtesgadener Raum noch eine weitflächige und formenarme Mittelgebirgslandschaft. Erst gegen Ende dieser Periode, vor ca. 10 Millionen Jahren, war sie durch den Hebungsprozeß und durch Talerosion zu einer formenreichen Hochgebirgslandschaft geworden, die in den folgenden Kaltzeiten vor allem der Wirkung des Eises ausgesetzt war.

3.3 Zur Großtektonik der Berchtesgadener Alpen

Der geologische Aufbau der Berchtesgadener Alpen läßt hinsichtlich seiner prinzipiellen Entstehung zwei Deutungsmöglichkeiten zu (vgl. Zankl 1962, Ganss 1979): In beiden Fällen ist davon auszugehen, daß die Tirolische, die Hallstätter und die Berchtesgadener Facies großtektonische Einheiten sind, wobei die beiden letzteren von der Tirolischen Facies umgeben sind (Abb. 6).

Nach der einen Deutungsmöglichkeit entstanden die Berchtesgadener Alpen in einem einheitlichen Sedimentationsraum, jedoch mit lokal unterschiedlichen Sedimentationsbedingungen. Nach der anderen Deutungsmöglichkeit sind die genannten tektonischen Einheiten nicht im gleichen Sedimentationsraum entstan-

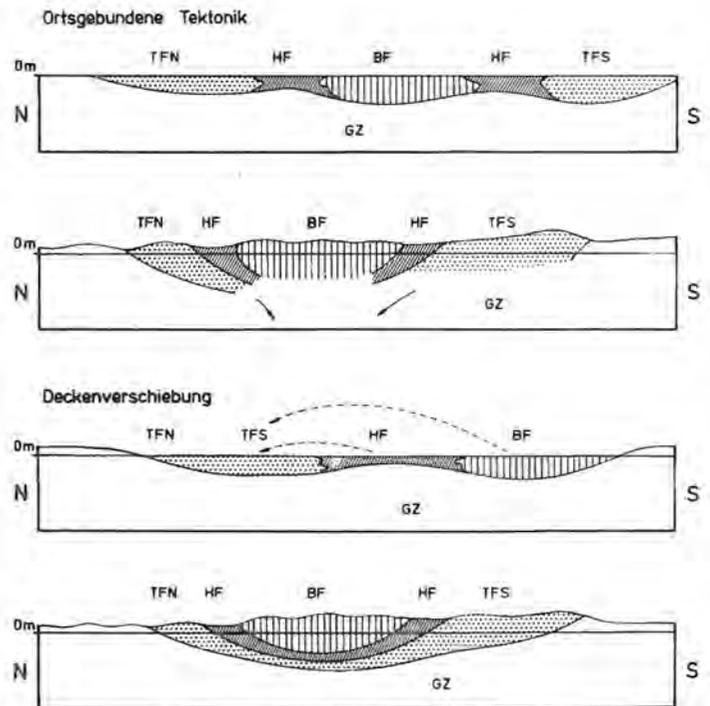


Abb. 6: Vereinfachte Darstellung des alpinen Sedimentationsraumes (Querprofil). Zur Erklärung der übereinander gestapelten Schichten gibt es im Prinzip zwei Vorstellungen, die auf der ortsgebundenen Tektonik bzw. der Deckenverschiebung beruhen. Näheres im Text (nach Ganss 1979, verändert).

den, sondern erst nachträglich durch entsprechende Deckenverschiebungen in die jetzige Position gebracht worden. Das würde bedeuten, daß der Ablagerungsraum der Hallstätter Facies südlich der Tirolischen Facies und die Berchtesgadener Facies ursprünglich noch weiter südlich von der Hallstätter Facies gelegen waren. Sie würden in diesem Fall erst später in nördlicher Richtung in eine Mulde der Tirolischen Facies verschoben worden sein, wobei die am weitesten südlich gelegene Berchtesgadener Facies über die nördlich davon gelegene Hallstätter Facies zu liegen kam. Nur Tiefbohrungen könnten zeigen, ob die verschiedenen Facies neben- oder übereinander liegen und damit die Entscheidung zwischen diesen beiden gleichwertigen Vorstellungen herbeiführen.

3.4 Die Entstehung des Königssees

Zu vielen bisher nicht ganz geklärten Fragen gehört auch die Entstehung des Königsseebeckens. Sicher ist nur, daß es bereits vor Beginn der Eiszeiten, und zwar wahrscheinlich im ausgehenden Jura (vor 140 Millionen Jahren) in einem Grabenbruch angelegt worden ist, der bis in das Pleistozän aktiv war (Jaskolla, persönl. Mitteilung).

Das Königsseebecken geht demnach auf Deckenbrüche zurück, an welchen die Dachsteinschollen abgesenkt worden sind. Ein Blick auf Abb. 4 zeigt, daß das ganze Gebiet um den Königssee zahlreiche Verwerfungen enthält, wobei im wesentlichen zwei Richtungen vorherrschen: südöstliche und nordöstliche. Zu den

südöstlich gerichteten Verwerfungen gehören die in den Hochkaltertälern, im hinteren Wimbachtal und am Watzmann, vor allem zwischen Griesspitze und Hocheck, und schließlich im Obersee- und Abwärtsgraben. Man kann sie alle als Obersee-Richtung zusammenfassen. Die nordöstlich gerichteten Störungen liegen im wesentlichen parallel zur Königssee-Längsachse. Man hat sie daher auch Königssee-Störungen genannt. Zu ihnen gehören die Störungen im Wimbachtal, im Watzmannkar, Königssee und Landtal. Längs dieser Störungslinien ist es zu einem Absenken der Gesteine gekommen, die am Westufer mindestens 600–800 m betragen und vor allem durch Abschiebungen an homothetischen Staffelbrüchen entstanden sind (Jaskolla, persönl. Mitteilung). Auf der östlichen Uferseite hat bereits Zankl (1962) ähnliche Absenkungen in den seenahen Teilen nachgewiesen.

Die im Pleistozän beginnenden Eiszeiten waren nicht nur für die weitere Gestaltung der Hochgebirgslandschaft, sondern auch für die voralpine Landschaft von erheblicher Bedeutung. Wie wir in den vorausgegangenen Abschnitten gesehen haben, war der Bau der Alpen um diese Zeit bereits abgeschlossen (ihre Hebung hält aber auch heute noch an!), als die modulierende Kraft des Eises und die Eiserosion durch Frost hinzukamen. Nun erst entstanden die Formen – Gipfel und Täler –, die wir als hochalpin bezeichnen.

Während der Würmeiszeit bildete sich am Steinernen Meer eine gigantische Plateauvergletscherung, und am Watzmann- und Hochkaltermassiv entstanden weitere lokale Gletscherströme. Der Watzmann-Gletscher verlief über den Eisgraben, und vom Steinernen Meer aus muß ein besonders großer Gletscherstrom entstanden sein, da man seine Seitenmoränen bis auf dem in 1400 m Höhe üNN. gelegenen Kührintplateau findet. Er bewegte sich durch das Königsseetal und reichte bis ca. 800 m über den heutigen Seespiegel. Berücksichtigt man die mittlere Seetiefe des Königssees (98 m), so lag über dem Seeboden nach der endgültigen Ausschürfung eine fast 900 m hohe Eisdecke, die zuvor in mehr als 1 Million Jahren den Vorläufer des Seebeckens um 300–400 m ausgehobelt und damit die endgültige Trogform geschaffen hatte. Auch das Berchtesgadener Tal war damals von einer bis zu 600 m dicken Eisschicht bedeckt. In der Höhe von Hallein trafen die Gletscherströme aus dem Berchtesgadener Land (neben dem Königsseegletscher auch der Gletscher aus dem Saalachtal) mit dem großen Salzachgletscher zusammen. Sie bildeten eine große Eiszunge, die sich weit nach Westen bis vor Traunstein und im Norden bis gegen Burghausen erstreckte.

Dieser große Gletscher bildete das Salzburger Stammbecken, dessen radial angeordnete Zungenbecken die Vorläufer für den Waginger und Tachingen See sowie für die auf österreichischem Gebiet liegenden Waller-, Obertrumer-, Graben- und Mattsee waren. Und im Prinzip wie sie entstanden weiter westlich die großen Voralpenseen aus den Zungenbecken der benachbarten Gletscher (vgl. Wilhelm 1972): der Chiemsee durch den Gletscher aus dem Tal der Tiroler Achen, das Rosenheimer Becken mit dem Simssee durch den Inngletscher

und der Würm- und Starnberger See durch den Loisach-Isargletscher. Alle diese Seen sind mit dem Rückzug des Eises vor ca. 12.000 Jahren entstanden. Zu dieser Zeit waren das Berchtesgadener Tal und die weiter südlich gelegene Landschaft aber weiterhin vom Eis bedeckt. Noch immer floß der im Gebiet des Obersees nur 1 km breite Eisstrom in nordwestlicher und dann in nördlicher Richtung. Vor dem Nordende des Königssees, wo sich die Felswände der gegenüberliegenden Ufer auf 300 m nähern, verengte er sich. In weichem Gestein (Ramsaudolomit, Haselgebirge, Juragestein) konnte er sich in nördlicher Richtung wieder ausweiten (Ganss 1979).

Es ist nicht gewiß, ob der Königssee ursprünglich wesentlich weiter nach Norden reichte als heute. Jedenfalls ist der Talboden beim Ort Königssee mit Schuttkegeln und Bergsturzmassen bedeckt, die eine kleine Wallmoräne umgeben. Mit dem weiteren Abschmelzen zog sich der Gletscher nach Süden zurück, bis er nur noch das Gebiet des Obersees einnahm.

Damit war der Königssee in seiner ganzen Ausdehnung eisfrei. Legt man die Geschwindigkeit des Gletscherrückzugs in Südschweden zugrunde (Wolstedt 1958), so könnte der Königssee ca. 2000 Jahre jünger sein als die bayerischen Voralpenseen. Infolge seiner fjordartigen Einbettung im umgebenden Gebirge dürfte diese Schätzung eher noch zu knapp bemessen sein.

Im Bereich des Obersees verweilte der Gletscher offensichtlich längere Zeit, denn es sind an seinem Westende zwei Wallmoränen entstanden, die von Anfang an für eine Trennung zwischen Königssee und Obersee gesorgt haben. Später kamen im Bereich dieses Trennungsgebietes Bergsturzmassen hinzu, der letzte möglicherweise im Jahre 1127 (Meister 1976, Ganss 1979).

4. Das hydrologische System „Königssee“

4.1 Der See als Teil eines hydrologischen Systems

Obgleich gerade die Seen unter den Gewässern als besonders gut abgrenzbare Ökosysteme gelten, sind sie wie jedes andere Gewässer jeweils nur Teilbereich eines umfassenderen Systems. Dieses sogenannte hydrologische System (das den bekannten schwedischen Limnologen Einar Naumann zur Einführung des Begriffs „Regionale Limnologie“ veranlaßt hat, vgl. Ohle 1971), enthält neben dem zu betrachtenden Gewässer auch dessen Einzugsgebiet. Darunter versteht man sein durch die Wasserscheide begrenztes Umland, innerhalb dessen ihm alles verfügbare Wasser zugeleitet wird.

Grundsätzlich lassen sich oberirdische und unterirdische Einzugsgebiete voneinander unterscheiden. Im allgemeinen werden jedoch die oberirdischen angegeben, die anhand einer guten topographischen Karte bestimmbar sind, indem beispielsweise bei einem See die um ihn herum und durch seinen Ausfluß verlaufende Linie der Höhenzüge gezeichnet wird (Dyck 1978). Wenn das auf diese Weise umrandete Gebiet, das oberirdische (= orographische) Einzugsgebiet, mit dem unterirdischen zusammenfällt, so entspricht es dem Niederschlagsgebiet des Sees. Das Einzugsgebiet kann aber auch größer oder kleiner sein als das Niederschlagsgebiet. Das ist der Fall, wenn das unterirdische Einzugsgebiet größer bzw. kleiner als das oberirdische ist. Derartige Abweichungen zwischen Einzugsgebiet und Niederschlagsgebiet sind im Locker- und Kalkgestein häufig und daher auch im Königssee-Einzugsgebiet zu erwarten, weil es hier und in seiner Nachbarschaft Karstgebiete gibt. Eine Klärung setzt immer spezielle hydrologische Messungen voraus.

Die Beziehung zwischen See und Einzugsgebiet ergibt sich aus der Eingliederung des Sees in den Wasserkreislauf des betreffenden hydrologischen Systems. Sie wird am besten durch die allgemeine Wasserhaushaltsgleichung beschrieben:

$$N + Z_u + Z_o = V + A_u + A_o + (R - B)$$

N = Niederschlag; Z = Zufluß, oberirdisch (o), unterirdisch (u); A = Abfluß, oberirdisch (o), unterirdisch (u); V = Verdunstung; R = Rücklage; B = Aufbrauch.

Daraus ergibt sich für den Inhalt des jährlichen Zuflusses (Q_Z) – ohne die Niederschläge auf der Seeoberfläche:

$$Q_Z = F_E (N_E - V_E)$$

F_E = Fläche d. Einzugsgebietes; N_E = Niederschlag/ m^2 ; V_E = Verdunstung/ m^2

und für den Inhalt des jährlichen Abflusses (Q_A) aus dem See:

$$Q_A = F_E (N_E - V_E) + F_S (N_S - V_S)$$

F_S = Fläche des Sees; N_S = Niederschlag/ m^2 ; V_S = Verdunstung/ m^2

Die Größen Zu- und Abfluß sind aber nicht nur für den Wasserhaushalt des Sees wichtig, sondern auch für seinen Stoffhaushalt, wobei zwei Fakten herausgestellt seien:

1) Die chemischen Eigenschaften des zufließenden Wassers entstehen vor allem unter dem Einfluß der Böden, der Gesteine und der Vegetation, durch die es sich bewegt. Je größer der Anteil dieser Zuflüsse gegenüber dem Niederschlag auf die Seeoberfläche, desto stärker kommen diese Eigenschaften im Seebecken zum Tragen. Bei gleichen Niederschlägen/ m^2 gilt somit in erster Näherung, daß der Einfluß des Einzugsgebietes auf den See zunimmt, wenn der relative Anteil der Seefläche abnimmt. Das Verhältnis beider Größen wird Umgebungsfaktor (f_U) genannt:

$$f_U = \frac{F_E}{F_S}$$

2) Die chemischen Eigenschaften der Zuflüsse ändern sich innerhalb des Seebeckens durch das hier ablaufende Stoffwechselgeschehen. Diese Veränderungen fallen umso mehr ins Gewicht, je langsamer der Wasseraustausch durch Zu- und Abfluß erfolgt. Die Wasseraustauschzeit (T_W) hängt vom Seevolumen (Q_S) und Abflußvolumen/Zeit (Q_A) ab:

$$T_W = \frac{Q_S}{Q_A} \text{ (Zeit)}$$

Diese beiden einfachen Beziehungen dürfen nicht darüber hinwegtäuschen, daß es sehr komplexe stoffliche bzw. energetische Wechselwirkungen zwischen einem Gewässer und seinem Einzugsgebiet gibt. In Abb. 7 sind einige Beziehungen innerhalb des terrestrischen und aquatischen Bereichs bzw. zwischen beiden angedeutet. Betrachten wir beispielsweise einen Energie-Eintrag, wie er durch eine Waldrodung zustande kommt, so ist die Folge eine Erhöhung der Erosionsrate. Damit wird den Pflanzen innerhalb (m. E. auch außerhalb) des Rodungsgebietes die Lebensgrundlage entzogen. Die pflanzliche Biomasse nimmt daher ab. Das bedeutet u. a., daß auch die Evapotranspiration herabgesetzt und so der hydraulische Abfluß erhöht wird. Die Erosionsrate nimmt nun noch mehr zu (positiver Rückkopplungseffekt). Im See führt diese Entwicklung zu einer Erhöhung der Sedimentationsrate, zur Beschleunigung der Verlandung, zur Freisetzung von Nährstoffen und damit zur Erhöhung der Nettoproduktion, die in einem Gewässer zwangsläufig zu einer Eutrophierung mit all ihren Folgeerscheinungen führen muß.

Tabelle 1**Aufteilung des orographischen Königssee-Einzugsgebietes (km²)**

(nach dem Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft 1976) *)

Königssee	Eisgraben	Schraimbach	Kesselbach	Königsbach	Obersee
5,21	14,69	50,39	15,50	11,23	39,32

*) Fläche des Königssees nach der Neuvermessung 1979 durch das BLfW korrigiert.

4.2.2 Hydrologische Eigenschaften

Zur Aufstellung einer Wasserbilanz des hydrologischen Systems Königssee sind bisher noch keine direkten Untersuchungen durchgeführt worden. Aufgrund theoretischer Überlegungen und unter Ausnutzung der vorhandenen Niederschlagsmeßstellen hat Enders (1979) jedoch die rechnerischen Grundlagen für eine Abschätzung geschaffen. Zur Berechnung der Wasserbilanz wurde als kleinste hydrologische Einheit das Einzugsgebiet der Königsseeachen (Pegel Schwöbbrücke) gewählt, die das Einzugsgebiet des Königssees enthält (Abb. 2).

Für dieses Gebiet ermittelte Enders folgende jeweils langjährige Mittel:

Niederschlagshöhe (N):	2 199 mm
Abflußhöhe (QA):	1 626 mm
Verdunstungshöhe (V):	573 mm

Aus der Wasserhaushaltsgleichung ergeben sich für das kleinere Einzugsgebiet Königssee folgende Werte:
 Zufluß zum Königssee aus seinem Einzugsgebiet:
 ohne Niederschläge auf den See $213,68 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{Jahr}$
 Niederschläge auf den See $8,48 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{Jahr}$
 Abfluß aus dem Einzugsgebiet
 Königssee $222,16 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{Jahr}$,
 das entspricht ca. $7 \text{ m}^3/\text{Sekunde}$.

Da das Seevolumen $511,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ beträgt, ergibt sich für die Wassererneuerungszeit (T_W) ein Zeitraum von 2,3 Jahren. Im Grunde genommen bedeutet das, daß das leere Seebecken innerhalb dieser Zeitspanne aufgefüllt wäre. In Wirklichkeit geht es aber um den Austausch der jeweils vorhandenen Wassermassen, der je nach den Einschichtungstiefen des zufließenden Wassers unterschiedliche Zeiten beansprucht. Die Wassererneuerungszeit ist daher nicht mehr aber auch nicht weniger als ein theoretischer Mindestwert.

Aufgrund der unterschiedlichen Größe der fünf Teilbereiche des Einzugsgebietes sind die einzelnen Zuflüsse in unterschiedlichen Anteilen an der Wasserzusammensetzung des Königssees beteiligt. Aus Tabelle 2 ergibt sich, daß von den Zuflüssen aus dem Einzugsgebiet des Königssees fast 70% aus dem Hagengebirge und dem Steinernen Meer (Obersee und Schraimbach) stammen. Die restlichen drei Einzugsgebiete sind mit Anteilen von ca. 8–12% beteiligt.

Gegenüber den Zuflüssen aus dem Einzugsgebiet tritt die Niederschlagsmenge auf die Seeoberfläche in den Hintergrund: Der Mittelwert von $8,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ bedeutet lediglich einen Anteil von ca. 4%. Diese Betrachtung führt zum Begriff des Umgebungsfaktors: Für f_u ergibt sich der Wert 25,2. Er besagt, daß die Seeoberfläche etwa 25mal im Einzugsgebiet enthalten ist.

Tabelle 2 Anteil der Zuflüsse aus den fünf Zuflußgebieten des Königssees

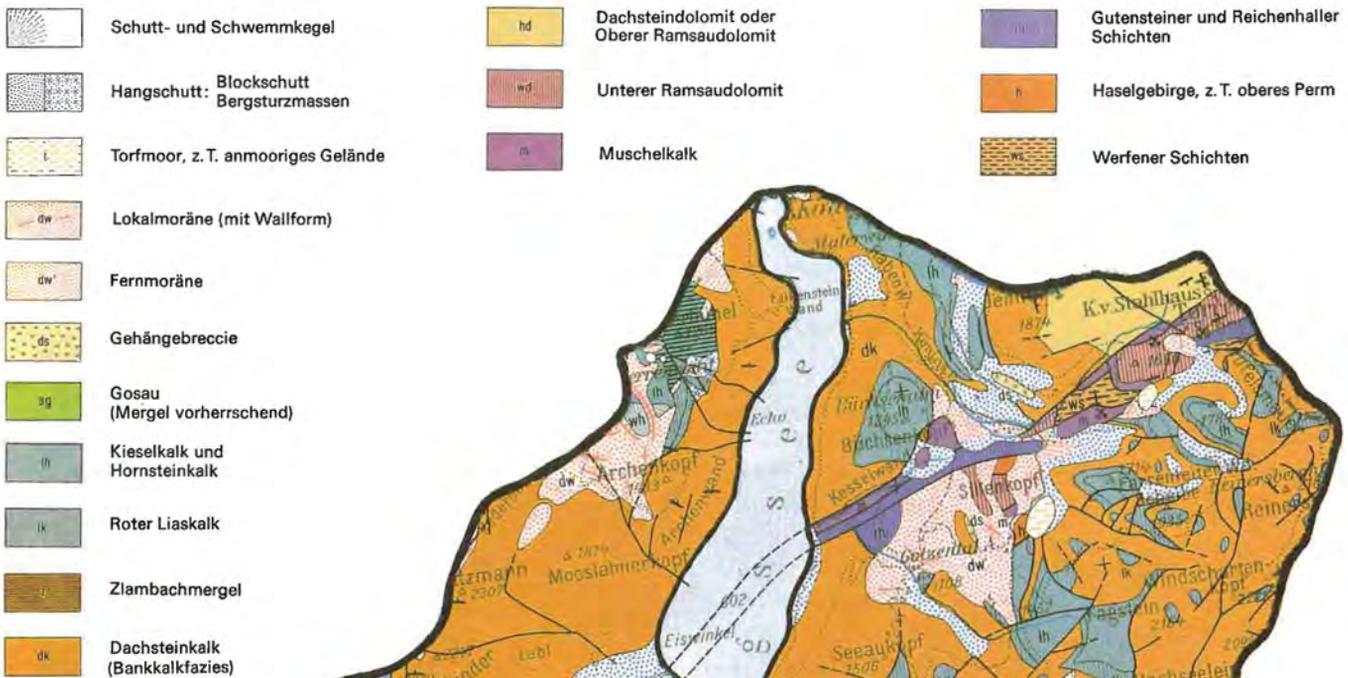
	$\times 10^6 \text{ m}^3$	%
Schraimbach	82,1	38,4
Obersee	64,1	29,9
Kesselbach	25,2	11,8
Eisgraben	23,9	11,2
Königsbach	18,4	8,6
Zuflüsse gesamt	213,7	100,0

Die Ausgangssituation in der chemischen Zusammensetzung des Königsseewassers wird somit von der chemischen Zusammensetzung der Zuflüsse bestimmt, und hier vor allem von den Zuflüssen aus den Einzugsgebieten Obersee und Schraimbach.

4.2.3 Geologische Eigenschaften

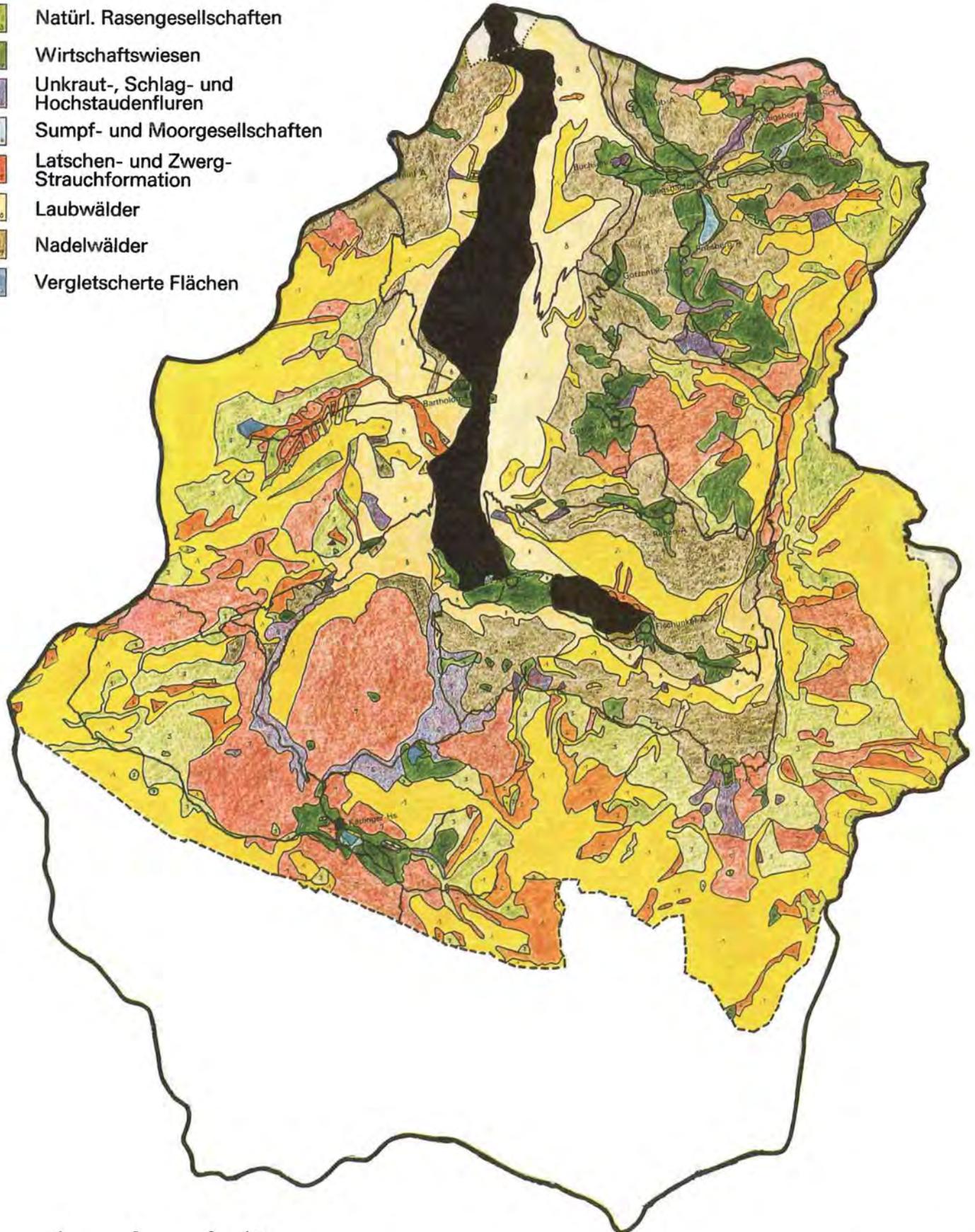
Wie bereits dargestellt, gehört das gesamte Einzugsgebiet des Königssees zur Tirolischen Facies Süd, für welche das vertikale Gesteinsprofil in Abb. 3 im Prinzip zutrifft. Daraus folgt, daß das an der Landoberfläche versickernde Regenwasser vor allem mit Dachsteinkalk und Ramsaudolomit in Berührung kommt. Es gibt aber gewisse chemische Unterschiede in der Gesteinszusammensetzung der einzelnen Zuflußgebiete. So dominiert im Einzugsgebiet „Obersee“ und „Schraimbach“, die zusammengenommen etwa 70% der Königssee-Zuflüsse ausmachen, der Dachsteinkalk, während sich der Eisbach z. T. in den Hangschuttmassen des Ramsaudolomits bewegt. Im Oberlauf des Kesselbachs schließlich befinden sich Kiesel- und Hornsteinkalke. In Tabelle 3 sind einige Orientierungswerte über die Anteile der Gesteinsarten zusammengestellt (Zankl, persönl. Mitteilung). Aus den wenigen bisher durchgeführten Untersuchungen der Zuflüsse ergibt sich in der Tat, daß im Kessel- und Königsbach die Sili-

Tafel I: Geologie des Einzugsgebietes vom Königssee. Der hier nicht berücksichtigte Teil des auf österreichischem Gebiet liegenden Steinernen Meeres unterscheidet sich nicht wesentlich von dem weiter nördlich gelegenen bayerischen Abschnitt (Ausschnitt aus der Geologischen Karte von Bayern 667 Bad Reichenhall, Bayer. Geol. Landesamt, München 1978).



Tafel II: Die Pflanzengesellschaften im Einzugsgebiet des Königssees. Weiße Flächen = nicht kartiert. Die Pflanzengesellschaften des auf österreichischem Gebiet liegenden Steinernen Meeres sind im wesentlichen Felsspalten- und Felsschuttgesellschaften (nach Lippert 1966).

- Felsspaltengesellschaften
- Felsschuttgesellschaften
- Natürl. Rasengesellschaften
- Wirtschaftswiesen
- Unkraut-, Schlag- und Hochstaudenfluren
- Sumpf- und Moorgesellschaften
- Latschen- und Zwerg-Strauchformation
- Laubwälder
- Nadelwälder
- Vergletscherte Flächen



0 1 2 3 km

(1 km = 1,42 cm)

Tabelle 3 Hydrographische und geologische Eigenschaften des Königssee-Einzugsgebietes

Einzugsgebiet	Schüttung der Zuflüsse ¹⁾		Anteile der Gesteinsarten % ²⁾		
	x10 ⁶ m ³ /Jahr	%	Dachsteinkalk	Dolomit	Kieselgesteine
Schrainbach	82,1	38,4	~ 90	~ 9	~ 1
Obersee	64,1	29,9	~ 95	~ 5	
Eisgraben	23,9	11,2	~ 50	~ 50	
Königsbach	18,4	8,6	~ 90	~ 9	~ 1
Kesselbach	25,2	11,8	~ 95		~ 5
Zuflüsse gesamt	213,7	100,0			

¹⁾ Nach Angaben des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft 1976

²⁾ Orientierungswerte nach Angaben von H. Zankl (persönl. Mitteilung)

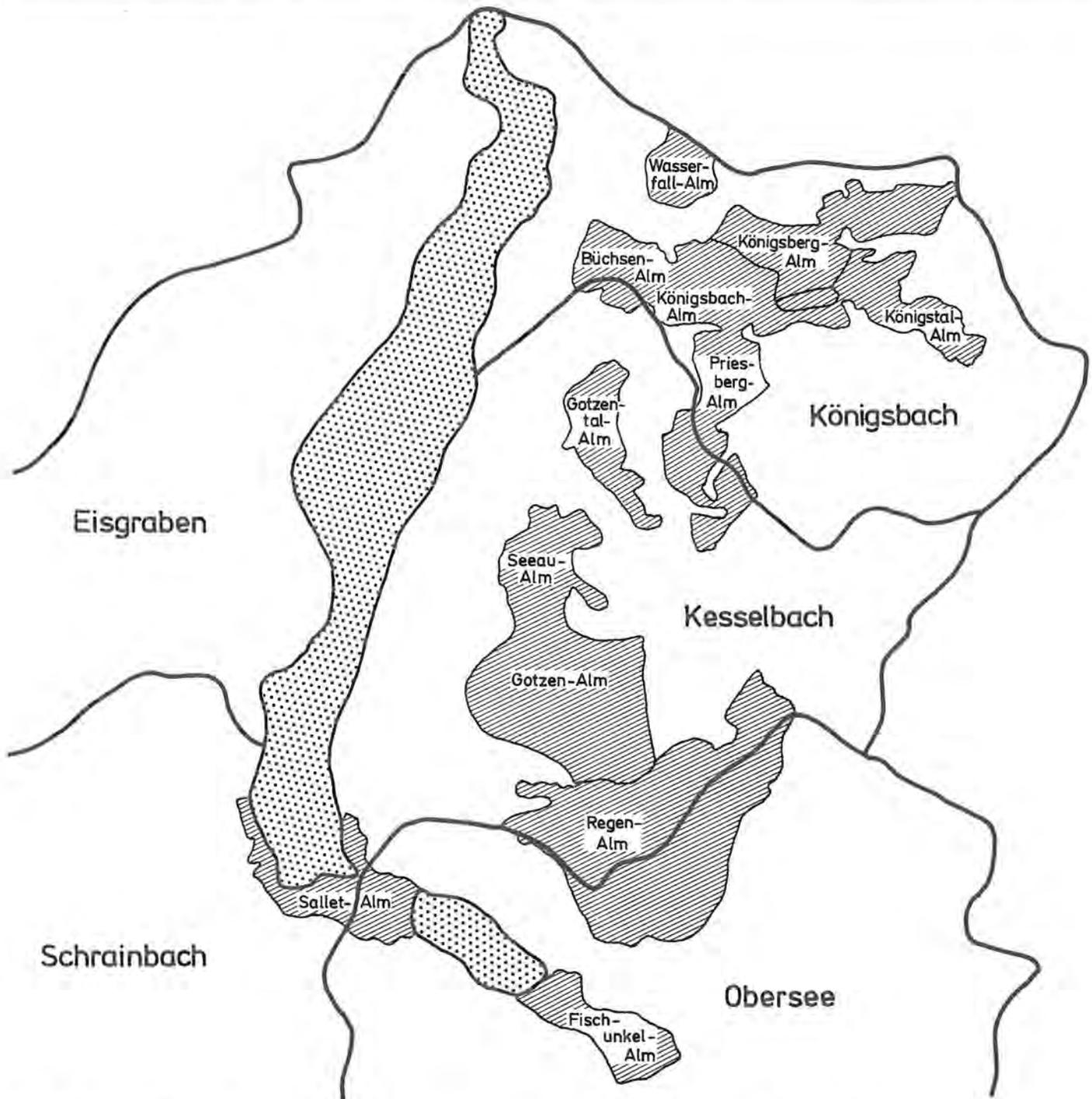


Abb. 8: Wirtschaftswiesen (Almen) im Einzugsgebiet des Königssees (aus Landschaftsanalyse Alpenpark Berchtesgaden 1981).

katkonzentrationen mit Werten um 0,7–1,0 mg/l am höchsten sind. In den übrigen Zuflüssen liegen sie zwischen 0,1–0,4 mg/l.

4.2.4 Vegetation

Über die Vegetation des Einzugsgebietes Königssee informiert die Arbeit von Lippert (1966). Sie bezieht sich auf das gesamte damalige Naturschutzgebiet Berchtesgaden, welches das Einzugsgebiet des Königssees mit Ausnahme des auf Österreich entfallenden Anteils enthält.

Wie sich aus Tafel II ergibt, setzt sich die Vegetation aus zahlreichen Pflanzengesellschaften zusammen. In den hochgelegenen Regionen dominieren die Felsspalten-, Felsschutt-, Latschen-, Zwergstrauch- und die natürlichen Rasengesellschaften. In dem auf österreichischem Gebiet liegenden Teil des Einzugsgebietes gibt es fast nur noch Felsspalten- und Felsschuttgesellschaften (Lippert, persönl. Mitteilung). Im ganzen Einzugsgebiet sind nur kleinflächige Unkraut-, Schlag- und Hochstaudenfluren vorhanden. Sie sind auf die schmalen Täler im Einzugsgebiet des Schrainbaches beschränkt. Wirtschaftswiesen gibt es vor allem in den Einzugsgebieten von Kessel- und Königsbach (Abb. 8), während sie in den Einzugsgebieten Obersee, Schrainbach und Eisgraben (hier besonders im Funten- und Grünseegebiet), um die Fischunkel- und Salletalm sowie in St. Bartholomä jeweils nur kleine Flächen einnehmen. In allen tiefer gelegenen Bereichen dominieren die Nadel- und Laubwälder, während die in dieser Aufzählung noch verbleibenden Sumpf- und Moorgesellschaften flächenmäßig ohne Bedeutung sind.

In Tabelle 4 sind die weitgehend natürlichen Pflanzengesellschaften (Felsspalten-, Felsschutt- und Rasengesellschaften, Hochstaudenfluren, Sumpf- und Moorlandschaften, Latschen- und Zwergstrauchformationen) zusammengefaßt und den Nadel- und Laubwäldern sowie den Wirtschaftswiesen gegenübergestellt.

Wald	28,0%
Natürliche Pflanzengesellschaften	63,6%
Wirtschaftswiesen	8,4%
*) ohne Berücksichtigung des auf österreichischem Gebiet liegenden Teils, der aus Karstflächen, Felsspalten- und Felsschuttpflanzengesellschaften besteht.	

4.2.5 Anthropogene Einflüsse

Die wichtigsten Einflüsse des Menschen, die bei Überschreitung gewisser Grenzen zu einer Beeinträchtigung der Biocoenosen, schließlich zu einer Verminderung der Wasserqualität und letztlich zu einer Gewässerverschmutzung führen, sind bekanntlich folgende: Die Ein-

leitung ungeklärter Abwässer in den See oder seine Zuflüsse, Abläufe aus Reinigungsanlagen für häusliche und industrielle Abwässer, Abschwemmungen von Verkehrsflächen und gedüngten landwirtschaftlichen Flächen, Schädlingsbekämpfungsmittel und Herbizide, sowie alle Maßnahmen, welche die natürliche Erosion steigern, Einleitung von Drainwasser, z. B. aus Abfalldeponien, Unfälle beim Transport oder der Lagerung xenobiotischer Substanzen und schließlich die Verunreinigung des Regenwassers durch Luftverschmutzung vor allem über Industriebetrieben und Großstädten.

Da es im Einzugsgebiet des Königssees weder Industrie noch Ortschaften gibt (der Ort Königssee liegt knapp außerhalb des Einzugsgebietes) und es auch keine landwirtschaftlichen Dünge- oder nennenswerte Verkehrsflächen gibt, fehlen im Grunde genommen alle Ursachen bis auf eine: die Produktion und Versickerung von Abwässern. Aber auch in diesem Falle besteht eine Einschränkung, weil diese Abwässer nicht wie in den besiedelten Gebieten fortlaufend, sondern im wesentlichen nur während der Touristensaison produziert werden. So könnte man zunächst vermuten, daß diese Einflüsse zu einer Beeinträchtigung der Wasserqualität des Königssees grundsätzlich nicht ausreichen. Vergleichen wir das Einzugsgebiet des Königssees mit jenem des erheblich belasteten Chiemsees (Abb. 9), so wird der Unterschied bereits anhand der Zahl der Städte und Gemeinden deutlich. Er wird noch deutlicher, wenn wir die in der Praxis bewährte Größe des sogenannten Einwohnergleichwertes (EGW) heranziehen. Darunter versteht man die durchschnittlich pro Tag und Person anfallende Schmutzfracht (die bei 20° C und hinreichendem Sauerstoffgehalt innerhalb von fünf Tagen 60 g Sauerstoff zum Abbau benötigt). Ein Vorteil dieser Größe besteht darin, daß auch abbaufähige Schmutzstoffe anderer Herkunft, z. B. aus Molkereien, in Einwohnergleichwerte umgerechnet werden können. So ist es möglich, die im Einzugsgebiet des Chiemsees insgesamt durch abbaufähige Schmutzfrachten entstehenden Belastungen in Einwohnergleichwerten auszudrücken und sie jenen des Einzugsgebietes vom Königssee gegenüberzustellen. Dabei ergibt sich, daß im Einzugsgebiet des Chiemsees etwa 254 500 EGW (ca. 183 EGW/km²) und im Einzugsgebiet des Königssees nur etwa 450 EGW (ca. 4 EGW/km²) zustandekommen. Nun muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß die Bemessung des EGW ein in der Praxis zwar bewährtes, aber doch recht grobes Verfahren darstellt. In den Grenzsituationen seiner Anwendbarkeit ist daher besondere Vorsicht geboten. Das trifft sicher auch für die Ermittlung der EGW in Gastbetrieben zu, die nicht das ganze Jahr mit einer annähernd konstanten Besucherzahl belegt sind. So wurden die 350 EGW der Gaststätte in St. Bartholomä (Tabelle 5) aus einer Zahl von 40 Beschäftigten und 260 Sitzplätzen ermittelt. Es erscheint fraglich, ob dieses Schätzverfahren einer Besucherzahl von einigen Hunderttausend pro Jahr gerecht wird. Realistischer wäre es m. E., unter Berücksichtigung einer mittleren Aufenthaltsdauer von drei bis vier Stunden, jeweils drei (evtl. auch vier) Personen zu 1 EGW zusammenzufassen. In diesem Fall käme man auf wesentlich höhere EGW – in der Größenordnung von

Tabelle 5

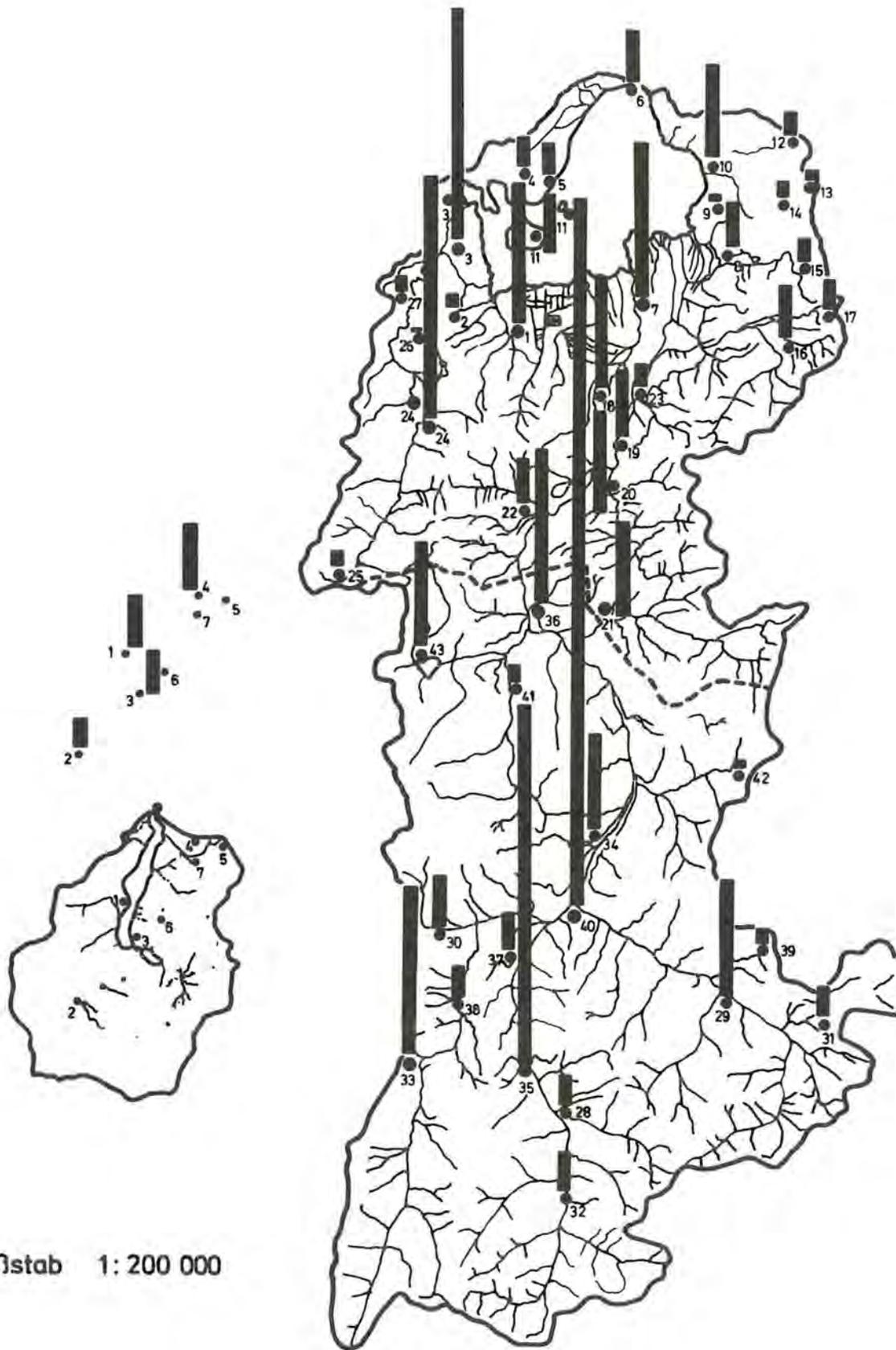
Konzentrationspunkte anthropogener Nährstoffimporte

Ortsbezeichnung ¹⁾	Besucherzahl / Jahr ²⁾ (Tagesgäste 1974)	Abwasserbehandlung	Ausbaugröße ³⁾ EGW	Abfälle
St. Bartholomä (1)	560 000	Kleinkläranlage	350	Abtransport
Kärlingerhaus (2)	10 000	Kleinkläranlage	20	Ablagerung
Salletalm (3)	94 000	Kleinkläranlage	30	Abtransport
Jenner Bergstation (4)	150 000	Kleinkläranlage	45	Abtransport
Schneibsteinhaus (5)	16 800	Kleinkläranlage	?	Abtransport
Gotzenalm (6)	24 000	keine		Abtransport
Königsbachalm (7)	?	keine		?
Fischunkelalm	?	keine		?

1) Die Zahlen hinter den Ortsbezeichnungen dienen zur Orientierung in Abbildung 9

2) Aus Landschaftsanalyse Alpenpark Berchtesgaden (1981)

3) Nach Angaben des Wasserwirtschaftsamtes Traunstein (persönliche Mitteilung 1982)



Maßstab 1: 200 000

Abb. 9: Das hydrologische System Königssee bzw. Chiemsee. Formaler Vergleich eines anthropogen stark beeinflussten Einzugsgebietes (Chiemsee) mit dem wenig beeinflussten Einzugsgebiet des Königssees. Die an den Konzentrationspunkten (die Zahlen geben die Orte an, z. B. 40 = St. Johann, 6 = Seebruck) eingezeichneten Balken geben die Belastungsgröße in Einwohnergleichwerten (EGW) an, wobei 1 cm = 2 500 EGW (beim Königssee 10fach überhöht!). Zur besseren Übersicht sind die Balken an den Konzentrationspunkten außerhalb des Einzugsgebietes dargestellt. Zahlen vgl. Tabelle 5 (nach Angaben des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft 1976, der Tiroler Landesregierung 1979 und einer persönl. Mitteilung des Wasserwirtschaftsamtes Traunstein gezeichnet).

einigen Zehntausend. Man kann weiteren Schätzverfahren andere Voraussetzungen zugrundelegen, entscheidend ist, daß genauere Erhebungen über die tatsächliche Aufenthaltsdauer der Besucher notwendig sind. Die nach der besten Schätzung ausgelegte Kläranlage des gegenwärtig vorhandenen Typs würde aber nur die optimale Ausfäulung organischer Stoffe gewährleisten. Die fortschreitende Nährstoffdeponierung – darunter Phosphat- und Stickstoffverbindungen – vermeidet sie nicht. Auf diesen Sachverhalt kommen wir an anderer Stelle zurück (vgl. Seite 77 ff.).

Insgesamt gibt es im Einzugsgebiet des Königssees im wesentlichen sechs Gaststätten bzw. Unterkunftshäuser, die im Jahr von ca. 850 000 Personen aufgesucht werden (Tabelle 5). Neben diesen Zentren des Touristenbesuchs gibt es sechs bewirtschaftete Almen, die im östlichen und südlichen Einzugsgebiet eine Fläche von 10,6 km² einnehmen. Davon liegen ca. 76% in den Einzugsgebieten Königsseebach und Kesselbach und 24% im Einzugsgebiet Obersee und Schrainbach, aus welchem der Hauptzufluß in den Königssee erfolgt (Abb. 8). Der Viehautrieb liegt bei insgesamt ca. 700 Rindern, wobei auf die Salletalm und Fischunkelalm zusammen nur etwa 10% entfallen.

Eine wesentliche anthropogene Belastung des Königssees durch Nährstoffe kann angesichts der hohen Besucherzahlen in St. Bartholomä und Sallet vor allem wegen der Ufernähe dieser beiden Touristenziele nicht ausgeschlossen werden. In der Tat werden wir Befunde anführen können (vgl. S. 94), die als „Antworten“ des

Königssees auf Nährstoffschübe gedeutet werden müssen.

Wenn im Rahmen zukünftiger Untersuchungen das Sediment am Seegrund genau analysiert werden wird, so sollte es möglich sein, die Folgen früherer Eingriffe des Menschen im Einzugsgebiet des Königssees nachzuweisen. Hierzu zählen vor allem die Folgen der „Salinenhiebe“, welchen im 17. bis zum Ende des 18. Jahrhunderts fast alle Wälder zum Opfer gefallen sind. Dieser Eingriff müßte zu verstärkter Erosion und damit auch zu verstärktem Nährstoffimport geführt haben. Vielleicht gab es im Anschluß daran sogar gewisse Eutrophierungserscheinungen, d. h. höhere Biomassen u. a. und infolgedessen nicht nur eine verstärkte, sondern auch eine andersartige Sedimentation (z. B. verstärkte biogene Entkalkung). Ähnliches konnte man im Lago di Monterosi nachweisen (Cowgill und Hutchinson 1970) und mit dem Bau der Via cassia etwa zwischen 390–150 v. Chr. in Zusammenhang bringen, der ausgedehnte Waldflächen im Einzugsgebiet dieses Sees zum Opfer gefallen waren.

4.3 Morphometrische Eigenschaften des Seebeckens

Für den Stoff- und Energiehaushalt eines Sees sind neben den hydrologischen auch viele seiner morphometrischen Eigenschaften von Bedeutung. Dafür einige Beispiele: Je größer der Wasserinhalt eines Sees, desto größer ist sein Vermögen, Wärmeenergie zu speichern. Das bedeutet, daß seine mittlere Temperatur den Ände-

Tabelle 7			
Morphometrische Daten des Königssees (Flächen)			
(Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 1980)			
Höhe (m ü. NN)	Nordbecken (km ²)	Südbecken (km ²)	Gesamtbecken (km ²)
603,3 (Seespiegel)	3,736	1,482	5,218
600	3,594	1,290	4,884
590	3,401	1,124	4,525
580	3,215	1,002	4,217
570	3,071	0,920	3,991
560	2,943	0,841	3,784
550	2,819	0,764	3,583
546	2,770	0,730	3,500
540	2,700	0,676	3,376
530	2,586	0,588	3,174
520	2,473	0,484	2,957
510	2,361	0,357	2,718
500	2,247	0,108	2,355
498,9	2,234	0,000	2,234
490	2,130	–	2,130
480	2,008	–	2,008
470	1,878	–	1,878
460	1,748	–	1,748
450	1,616	–	1,616
440	1,445	–	1,445
430	1,172	–	1,172
420	0,528	–	0,528
413,3 (Seegrund)	0,000	–	0,000

Tabelle 6

Morphometrische und hydrographische Kenndaten

	Königssee ¹⁾	Chiemsee ²⁾	Kochelsee ³⁾
Seehöhe	603,3 (m ü. NN.)	518,2 (m ü. NN.)	598,8 (m ü. NN.)
Geographische Position	12° 58' ö. L., 47° 33' n. B.	12° 26' ö. L., 47° 53' n. B.	11° 20' ö. L., 47° 39' n. B.
Seeoberfläche (A_0)	5,21 (km ²)	79,9 (km ²)	5,95 (km ²)
Seevolumen (V)	511,785 × 10 ⁶ (m ³)	2047,8 × 10 ⁶ (m ³)	184,7 × 10 ⁶ (m ³)
Größte Tiefe (z_m)	190,0 (m)	73,4 (m)	65,9 (m)
Mittlere Tiefe (\bar{z})	98,1 (m)	25,6 (m)	31,04 (m)
Relative Tiefe (z_r)	7,4 (%)	0,7 (%)	2,4 (%)
Uferlänge (L)	19,96 (km)	63,96 (km)	14,64 (km)
Uferentwicklung (D_L)	2,46	2,02	1,69
Maximale Seelänge (l)	7,725 (km)	12,80 (km)	5,08 (km)
Maximale Seebreite (b)	1,225 (km)	6,24 (km)	1,17 (km)
Hydraulische Belastung (q_s)	41,7 (m/Jahr) ⁴⁾	24 (m/Jahr)	260,2 (m/Jahr)
Mittlere Abflußmenge (MQ)	7,0 (m ³ · s ⁻¹) ⁴⁾	62,9 (m ³ · s ⁻¹)	49,1 (m ³ · s ⁻¹)
Abflußmenge (Q_J)	222,16 × 10 ⁶ (m ³ /Jahr) ⁴⁾	1983,6 × 10 ⁶ (m ³ /Jahr)	1548,4 × 10 ⁶ (m ³ /Jahr)
Theoretische Wassererneuerung ($\frac{V}{Q_J}$)	2,3 (Jahre) ⁴⁾	1,26 (Jahre)	0,12 (Jahre)
Einzugsgebiet (F_N)	131,13 (km ²)	1388,3 (km ²)	684,82 (km ²)
Umgebungsfaktor (f_U)	25,2	17,4	115

1) Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 1980, unpubl.

3) Bayerische Landesanstalt für Wasserforschung 1979, unpubl.

2) Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 1975

4) Errechnet nach Angaben aus Enders 1979

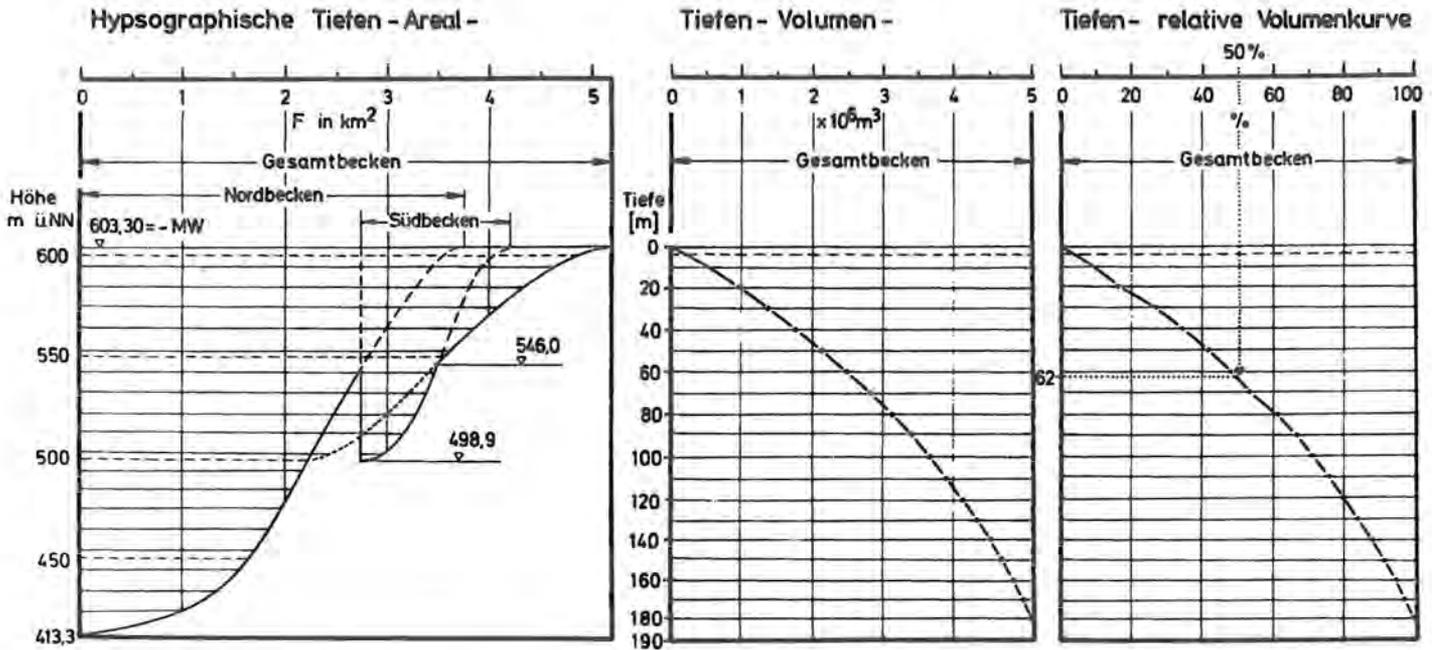


Abb. 10: Drei Darstellungen zur Morphometrie des Königsseebeckens. Die Trennungslinie zwischen Süd- und Nordbecken fällt mit der kürzesten Verbindungslinie der bei St. Bartholomä gegenüberliegenden Ufer zusammen (nach Angaben des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, persönl. Mitteilung, gezeichnet).

rungen der Lufttemperatur immer gedämpfter folgt. Je mehr der Anstieg des Volumens in einer Reihe von Seen durch eine Zunahme der Tiefe zustandekommt, desto größer ist die Ausdehnung desjenigen Tiefenbereichs, in welchem die Temperatur über das ganze Jahr hinweg niedrig und nahezu konstant bleibt. Es besteht kein Zweifel, daß diese thermischen Eigenschaften für die Bewohner dieses Sees und damit für ihre Funktion in seinem Stoffhaushalt von erheblicher Bedeutung sind. Je tiefer der See, desto kleiner ist der Volumanteil der trophogenen Zone, in welcher durch die photosynthetisch nutzbare Strahlung Pflanzensubstanz produziert wird und desto größer ist der Volumanteil der tropholytischen Zone, in welcher die Abbauvorgänge vorherrschen. Schließlich wächst mit zunehmender Tiefe auch die Ausdehnung der Tiefenzone, die durch windbedingte Durchmischungsvorgänge nicht mehr nennenswert beeinflusst wird. Denken wir uns bei gleichbleibender Seetiefe die Seeoberfläche immer kleiner, so wird dieser Effekt noch verstärkt, woraus sich die Bedeutung der Tiefe in bezug auf die Größe der Seeoberfläche ergibt. Man nennt dieses Verhältnis die relative Tiefe (z_r). Die mittlere Tiefe \bar{z} ergibt sich aus dem Quotienten Volumen/Seeoberfläche. Sie ist als Tiefenangabe besonders wichtig, weil die maximale Tiefe für den Stoffhaushalt des Sees keine Rolle spielt, wenn das zugehörige Areal relativ klein ist.

Außer vom Einzugsgebiet, das den See über seine Zuflüsse beeinflusst, gibt es auch unmittelbare Wirkungen auf das Seewasser, die vom Ufer bzw. von der Beckenwandung ausgehen. Sie sind umso größer, je größer die Uferlinie/m² Seeoberfläche bzw. je größer die Fläche der Beckenwandung/m³ Wasser ist. Zu einer ersten Abschätzung des Sachverhaltes dient m. E. eine Verhältniszahl, die als Uferentwicklung (D_L) bezeichnet wird. Da unter allen Seespiegelformen die Kreisfläche die

kleinste Begrenzungslinie besitzt, legt man sie der Berechnung der Uferentwicklung zugrunde, indem man die für eine gegebene Seeoberfläche kleinste mögliche Uferlänge auf die vorhandene bezieht.

Die wichtigsten morphometrischen und hydrographischen Kennzeichen des Königssees sind in Tabelle 6 zusammengefaßt bzw. in Abb. 10 dargestellt. Tabelle 7 enthält die vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft im 10-m-Tiefenabstand ermittelten Flächen, einerseits für das Gesamtbecken und andererseits für Nord- und Südbecken getrennt. Tabelle 8 enthält die aus diesen Angaben errechenbaren Teilvolumina sowie ihre Zunahme zum Gesamtvolumen mit zunehmender Tiefe. Aus der „Tiefen-relative Volumenkurve“ ist zu entnehmen, daß im Königssee zwischen Seeoberfläche und ca. 62 m Wassertiefe bereits 50% des gesamten Wasservolumens enthalten sind.

Einige morphologische Eigenschaften des Königssees lassen sich herausheben, wenn wir sie mit jenen anderer Seen vergleichen (Tabellen 6 und 9). Es ist zunächst festzuhalten, daß der Königssee mit einer Maximaltiefe von 190 m und einer mittleren Tiefe von 98 m zu den tiefsten Seen Europas zählt. Beschränken wir uns auf den mitteleuropäischen Raum, so gehört der Königssee zu den 13 tiefsten Seen. Erheblich tiefer sind lediglich der Comer See (440 m), Gardasee (346 m), Lago Maggiore (370 m), Luganer See (288 m), Genfer See (310 m), Brienersee (259 m), Bodensee (252 m), Thunersee (217 m) und Vierwaldstättersee (214 m). Unerheblich tiefer sind der Zugersee (198 m), Traunsee (197 m) und der künstlich aufgestaute Walchensee (192 m).

Betrachten wir das Oberflächenareal dieser Seen, so sind nicht nur die wesentlich tieferen Seen erheblich

Tabelle 8		Morphometrische Daten des Königssees (Volumen) (nach Angaben des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft 1980 berechnet)	
Wasserschicht (m)	Teilvolumen (x 10 ⁶ m ³)	Teilvolumen kumulativ (x 10 ⁶ m ³)	% kumulativ
0– 10	47,593	47,593	9,3
10– 20	44,317	91,910	17,9
20– 30	41,558	133,468	26,1
30– 40	39,316	172,784	33,8
40– 50	37,074	209,858	41,0
50– 57,3	25,679	235,537	46,0
57,3– 60	9,498	245,036	47,9
60– 70	33,281	278,317	54,4
70– 80	31,211	309,528	60,5
80– 90	29,487	339,015	66,3
90–100	26,900	365,915	71,5
100–110	22,245	388,160	75,9
110–120	21,038	409,198	79,9
120–130	20,003	429,201	83,9
130–140	18,623	447,824	87,5
140–150	17,244	465,068	90,9
150–160	15,864	480,932	94,0
160–170	14,312	495,244	96,8
170–180	11,553	506,797	99,1
180–190	4,988	511,785	100,0

größer als der Königssee, sondern auch die etwa gleich tiefen und viele der weniger tiefen Seen. Wenn wir in Tabelle 9 Seen mit annähernd gleichem Areal aussuchen, so finden wir sie fast ausschließlich bei solchen mit geringerer Seetiefe, z. B. Kochelsee ($A_0 = 5,95 \text{ km}^2$, $\bar{z} = 31,04 \text{ m}$), Wörthsee ($A_0 = 4,5 \text{ km}^2$, $\bar{z} = 13,5 \text{ m}$), Wallersee ($A_0 = 6,4 \text{ km}^2$, $\bar{z} = 9,4 \text{ m}$), Zeller See ($A_0 = 4,55 \text{ km}^2$, $\bar{z} = 39,2 \text{ m}$) und Weissensee ($A_0 = 6,5 \text{ km}^2$, $z = 36 \text{ m}$). Nur der Achensee ($A_0 = 6,8 \text{ km}^2$) ist mit einer Maximaltiefe von 133 m noch verhältnismäßig ähnlich. Seine mittlere Tiefe beträgt jedoch nur 66,8 m.

Der Königssee besitzt unter all den bisher genannten Seen die höchste relative Tiefe ($z_r = 7,4$) (Abb. 11). Auch wenn wir den Bogen weiter ziehen und die übrigen in Tabelle 9 aufgeführten Seen und schließlich auch die außereuropäischen mit in diesen Vergleich einbeziehen, so gehört der Königssee weiterhin zu den Seen mit verhältnismäßig großer relativer Tiefe.

Wenn wir uns jenen Seen zuwenden, die dem Königssee hinsichtlich ihrer relativen Tiefe gleichkommen oder ihn übertreffen, so sind es wohl immer nur solche, die entweder dem Typ des Kratersees oder dem Typ des Fjordsees angehören. Eine dem Königssee fast entsprechende relative Tiefe von $z_r = 7,2$ finden wir z. B. beim Lake Crater in Oregon (USA) ($A_0 = 55 \text{ km}^2$, $z_m = 608 \text{ m}$). Er ist ein sogenannter Caldera-See, dessen Becken durch Einsturz des ursprünglich vorhandenen Vulkankegels entstanden ist (Hutchinson 1957). Auch die durch vulkanische Gase ausgesprengten trichterartigen Seebecken, die sogenannten Maare, besitzen

z. T. sehr hohe relative Tiefen (Tabelle 9). Ein im westlichen Teil Ugandas gelegener Kratersee, der Kanyangeye, erreicht mit einem Areal von nur 0,5 ha und einer Tiefe von 57 m den wohl von keinem anderen See der Welt erreichten Wert von $z_r = 71,5$ (Melack 1978). Hohe relative Tiefen erreichen auch einige Fjordseen Norwegens, bei deren Entstehung die Übertiefung der Täler durch Eiserosion – ähnlich wie bei der Entstehung des Königsseebeckens – eine große Rolle gespielt hat. Nach diesen weit ausholenden Vergleichen zur Seemorphologie ist es bei der Betrachtung der weiteren limnologischen Eigenschaften des Königssees jedoch nützlich, den Kreis wieder enger zu ziehen und dabei als besonderes Merkmal die große Tiefe und das kleine Oberflächenareal des Königssees herauszustellen, wie es durch die Abb. 11 anschaulich dargestellt wird. Auf weitere in Tabelle 6 zusammengestellte morphometrische und hydrographische Eigenschaften wird an anderer Stelle eingegangen werden.

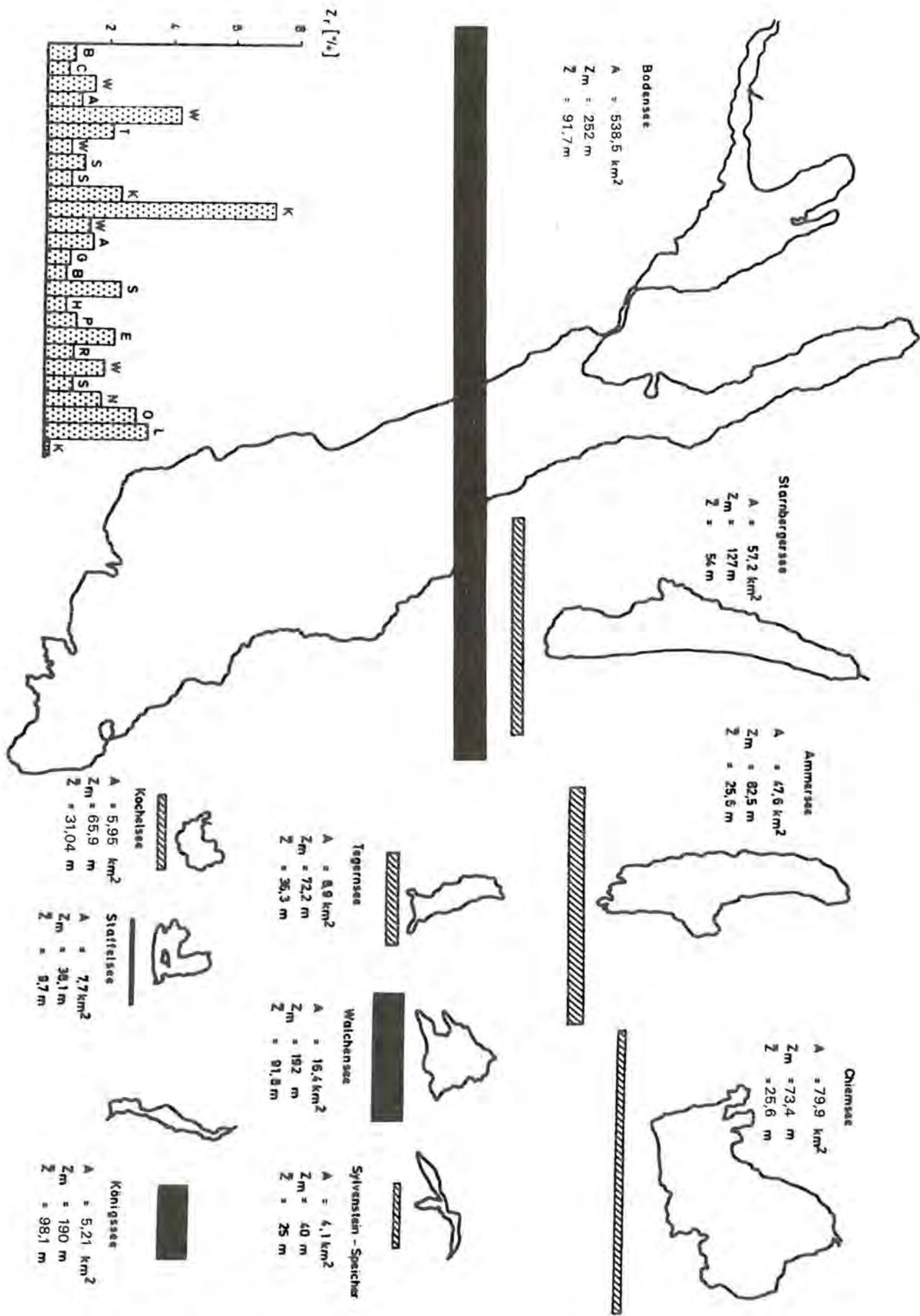


Abb. 11: Auswahl süddeutscher Seen mit wichtigen morphometrischen Kennzeichen. Das Seevolumen wird durch die horizontal orientierten Rechtecke dargestellt, wobei die lange Seite = Seearreal und die kurze Seite = mittlere Tiefe $\times 10$. Als See mit der kleinsten Oberfläche erreicht der Königssee fast die mittlere Tiefe des Bodensees. Hinsichtlich seiner relativen Tiefe steht er mit 7,4% an der Spitze aller süddeutschen Seen (vgl. Teilbild links). Die Bezeichnungen bedeuten von links nach rechts: B Bodensee, C Chiemsee, W Würmsee, A Ammersee, W Walchensee, T Tegernsee, W Waginger See, S Staffelsee, S Simssee, K Kochelsee, K Königssee, W Wörthsee, A Alpsee, G Grüntensee, B Bannwaldsee, P Pilsensee, E Eibsee, R Riegsee, W Weissensee, S Seehamer See, N Niedersonthofener See, O Ostersee, L Langbürgener See, K Klostersee/Seeon.

Tabelle 9

Morphometrische Seedaten aus dem mitteleuropäischen Raum (nach verschiedenen Autoren zusammengestellt)

*) im »OECD-Eutrophication Programme« untersucht

**) BMLF, Wien 1982

Name des Sees	E (km ²)	A _O (km ²)	V (x10 ⁶ m ³)	z _m (m)	\bar{z} (m)	z _r (%)	T _w (Jahre)	f _u
Österreich **) Neusiedler See	1000	300	180–250	1,8	1,1	0,009	ca. 1	2,3
Erlaufsee	10	0,58	12,4	38,0	21,2	4,4	1,5	16,2
Lunzer See*)	27	0,68	13,0	33,7	20	3,6	0,3	38,7
Plansee	45,5	2,85	129,48	76,5	45,4	4,0	0,57	14,9
Heiterwanger See	69	1,35	54,49	60,0	40,4	4,6	0,29	50,1
Piburger See*)	2,65	0,134	1,835	24,6	13,7	5,9	2,7	18,8
Achensee	218,1	6,8	481,0	133	66,8	4,5	1,6	31,1
Zeller See	54,7	4,55	178,2	68,4	39,2	2,8	4,1	11,0
Trumer Seen: Obertrumer See	45,9	4,8	86	35	14,1	1,4	1,3	8,6
Niedertrumer See	12,5	3,25	48	40	14,8	1,9	3,1	2,8
Grabensee	64,8	1,26	9	13	7,2	1,0	0,12	50,4
Wallersee	110	6,39	71	24	9,4	0,8	2	16,2
Mondsee	247	14,21	510,0	68,3	36,0	1,6	1,7	16,4
Attersee*)	463,5	45,6	3944,6	170,6	84,2	2,2	ca. 7	9,2
Fuschlsee	29,5	2,66	99,5	67,3	37,4	3,7	2,6	10,1

Irssee oder Zeller See	27,5	3,47	53,0	32	15,3	1,5	1,7	6,9
Traunsee	1417	25,6	2302,0	197	89,7	3,3	1	54,5
Wolfgangsee	123	13,15	619,0	114	47,1	2,8	3,6	8,4
Hallstätter See	646,5	8,58	557,0	125,2	64,9	3,8	0,5	74,3
Altausseer See	54,5	2,1	72,0	52,8	34,6	3,2	0,58	24,9
Grundlsee	125	4,14	170,0	63,8	32,2	2,8	0,92	29,2
Klopeiner See	4,4	1,106	24,975	46	22,6	3,9	11,5	2,9
Keutschacher See	28,6	1,327	14,03	15,6	10,6	1,2	1	20,6
Faaker See	35,6	2,20	32,71	29,5	14,9	1,8	1,2	15,2
Weissensee	50	6,53	238,1	99	36	3,4	11	6,7
Ossiacher See*)	154,8	10,79	215,088	52	19,93	1,4	2	13,3
Millstätter See	276	13,28	1176,6	141	89	3,4	7	19,8
Wörthersee	164	19,38	816,32	85,2	42,1	1,7	9,5	7,5
Schweiz Walensee	1061	24,23	2420	145	100	2,6	1,39	42,8
Greifensee	160	8,49	150	32,6	17,7	0,9	1,51	17,8
Hallwilersee	141,8	9,95	285	48	20,6	1,3	4,09	13,3
Sempachsee	62,6	14,4	624	87	46	2,0	17,0	3,3
Genfer See	7975,34	582,36	88900	309,7	152,7	1,1	11,78	12,7

Zürichsee: Obersee*)	1564,8	20,25	467	48,0	23,0	0,9	0,18	76,3
Untersee*)	1740,1	65,06	3300	136,0	51,0	1,5	1,4	25,8
Vierwaldstätter See: Urner See	924	26,825	3580	200	133	3,4	2,02	33,4
Gersauer See	567	25,44	3980	214	156	3,8	1,62	21,3
Kreuztrichter	340	56,98	4720	152	75	1,8		4,9
Frankreich								
Lac d'Annecy*)	278	27,04	1120	64,7	41,5	1,1	3,84	9,3
Lac de Nantua*)	50,3	1,42	40	42,8	28,4	3,2	0,69	34,4
Lac de Pavin*)	0,50	0,44	23	98	52,4	13,1	>4,9	0,1
Le Bourget	565	44,62	3620,3	145,4	81,1	1,9		11,7
Lac Sylans	30,7	0,497	4,772	22,2	9,6	2,8	0,11	60,8
Italien								
Lago Maggiore*)	6599	212,51	37 700	370	177,4	2,2	4,0	30,1
Lago Ceresio = Luganer See*)	615	48,9	6500	288	130	3,6	8,3	11,6
Lago del Segrino*)	3,63	0,33	1,2	8,6	2,6	1,3	0,27	9,2
Lago d'Alserio*)	18,4	1,44	6,55	8,1	5,4	0,6	0,41	11,8
Lago di Como	4572	145,9	22 500	410,0	153,0	3,008	4,5	30,3

Deutschland								
Feldsee*)	1,55	0,915	1,44	32	15,7	9,4	0,47	15,9
Chiemsee	1388,3	79,9	2047,8	73,4	25,6	0,7	1,26	17,4
Würmsee	312,0	57,2	3100,0	127,0	53,2	1,5	20,9	4,5
Ammersee	988,5	47,6	1775,0	82,5	37,8	1,1	2,5	19,8
Walchensee	770,0	16,3	1340,1	192,0	81,1	4,2		46,2
Forggensee	1319,9	15,8	149,0	40,0	8,8	0,9		82,5
Tegernsee	210,5	9,1	324,0	72,2	36,6	2,1	1,3	22,1
Waginger See	123,5	8,9	156,7	27,0	15,6	0,8		12,9
Staffelsee	25,7	7,7	74,9	38,1	9,7	1,2		2,3
Simssee	83,8	7,0	87,6	22,5	13,4	0,8		10,9
Sylvensteinspeicher	1129,7	6,2	105,0	24,0	16,9	0,9		181,2
Kochelsee	684,82	5,95	184,7	65,9	31,04	2,4	0,12	115,0
Königssee	131,13	5,21	511,785	190,0	98,1	7,4	2,3	25,2
Wörthsee	27,2	4,5	17,4	33,0	13,5	1,4		5,0
Alpsee								
Grüntensee		2,5	16,0	15,0	6,4	0,8		
Bannwaldsee	21,4	2,3	14,09	12,0	6,2	0,7	0,81	8,3
Schliersee	27,1	2,2	53,1	40,4	23,9	2,4		11,3
Hopfensee	32,4	1,94	8,98	10,4	4,6	0,7	0,35	15,7

Pilsensee	52,1	1,9	18,0	16,0	9,3	1,0		26,4
Eibsee	3,3	1,7		32,5	14,0	2,2		0,9
Riegsee	18,0	1,7	10,4	14,0	5,6	0,9		9,6
Weissensee	14,6	1,4	16,52	24,7	12,2	1,9	1,25	9,4
Seehamer See	9,3	1,3	5,0	12,0	3,8	0,9		6,2
Niedersonthofener See	15,0	1,2	13,8	22,7	10,6	1,8		11,5
Ostersee	30,6	1,2	14,0	29,8	11,7	2,4		24,5
Langenbürgener See	28,6	1,0	9,6	36,9	9,3	3,3		27,2
Bodensee*)	10900,0	538,5	48432,0	252,0	91,7	0,9	4,5	19,2
Klostersee		0,46	3,68	15,4	8	0,2		
Pulvermaar	0,8	0,35	11,77	70	33,6	10,5		1,3
Weinfelder Maar	0,35	0,156	4,31	52	27,6	11,7		1,2
Gemündener Maar	0,5	0,075	1,33	39	17,7	12,6		5,7
Ulmener Maar	4,74	0,063	0,85	35	13,5	12,4		74,3
Laacher See	12,21	3,315	106,3	54	32,1	2,6		2,7
Holzmaar	2,06	0,058	0,64	20	11,0	7,4		34,5
Schalkenmehrener Maar	1,3	0,219	2,46	21	11,2	3,9		4,94
Meerfelder Maar	1,52	0,248	2,27	18	9,2	3,2		5,13
Immerather Maar	0,64	0,050	0,08	2	1,6	0,8		11,8

5. Der Königssee als Lebensraum

5.1 Strukturelle Gliederung eines Sees

Innerhalb eines Seebeckens lassen sich mehrere Lebensräume mit ihren jeweils für sie typischen Lebensgemeinschaften voneinander unterscheiden. Erst durch ihre Wechselbeziehungen bilden sie ein System: das Ökosystem See. Wir können es als eine Funktionseinheit der Biosphäre bezeichnen, in welcher es von anderen Funktionseinheiten durch die Grenzen seines Nahrungsgewebes abgegliedert werden kann. Mit anderen Worten: innerhalb des Ökosystems See sind die Nahrungsbeziehungen zwischen seinen Bewohnern enger als zu den Bewohnern des benachbarten Landes.

Wenn der See durch Verlandungsprozesse kleiner wird, gestalten sich auch die Nahrungsbeziehungen zu seinem Umland enger. So wird z. B. der Import an organischem Material (z. B. Laub) immer größer. Er übertrifft schließlich die Eigenproduktion des Sees. Die früher durch den Wasserkörper begrenzte funktionelle Einheit weitet sich daher aus. Unter dem Einfluß des Menschen können aber bereits große und tiefe Seen die für sie charakteristische relative Autonomie ihres Stoffhaushaltes verlieren. Dieses Schicksal hat nahezu alle Seen mit dichtbesiedelten Einzugsgebieten ereilt. Unter dem Einfluß massiver Eingriffe (= zunehmender Materiefluß) ändern sich ihre Eigenschaften verhältnismäßig schnell.

Der Königssee blieb von dieser Entwicklung verschont. Viele Befunde sprechen für eine innerhalb relativ enger Grenzen gegebene Konstanz seiner Eigenschaften. Die Eigengesetzlichkeiten des von ihm gebildeten Lebensraumes stehen daher im Vordergrund.

Bei der Beschreibung der strukturellen Gliederung eines Sees (Abb. 12) wollen wir von den Grundtypen seiner Bewohner ausgehen und zunächst zwischen Organismen unterscheiden, die an das feste Substrat gebunden sind, und den anderen, die ohne ein solches auskommen und daher immer im freien Wasser angetroffen werden.

Die zuerst Genannten rechnet man zum Benthos. Ihr Lebensraum ist das Benthon. Die anderen Organismen, die den Lebensraum des Pelagials besiedeln, kann man nach ihrer Fähigkeit zur aktiven Ortsbewegung dem Plankton oder dem Nekton zuteilen. Beim Nekton überwiegt die aktive Ortsbewegung. So werden die zu ihm gehörenden Fische durch die im See vorkommenden Strömungen nicht ohne weiteres verdriftet. Sie können sich der Strömung entgegenstellen und gegen sie vorkommen. Beim Plankton spielt die passive Ortsbewegung eine dominierende, wenn nicht sogar die ausschließliche Rolle, nämlich dann, wenn die betreffenden Organismen (viele Phytoplankter) unbeweglich sind. Aber auch die anderen sind im allgemeinen nicht in der Lage, sich gegen die Strömungen fortzubewegen: sie werden verdriftet.

Nun können wir ein weiteres wichtiges Unterscheidungsmerkmal heranziehen: die Fähigkeit zur Photoautotrophie bzw. Heterotrophie. Für eine hinreichende photoautotrophe Nettoproduktion reicht das Strahlungsangebot nur bis zu einer gewissen Wassertiefe. Diesen Bereich nennt man die trophogene Zone; sie wird seitlich durch das Litoral begrenzt. Im Pelagial ist das der Lebensraum des Phytoplanktons, im Litoral der Lebensraum der festsitzenden Algen und der höheren Pflanzen. Unterhalb der trophogenen Zone liegt die tropholytische Zone, seitlich und in der Tiefe vom Profun-

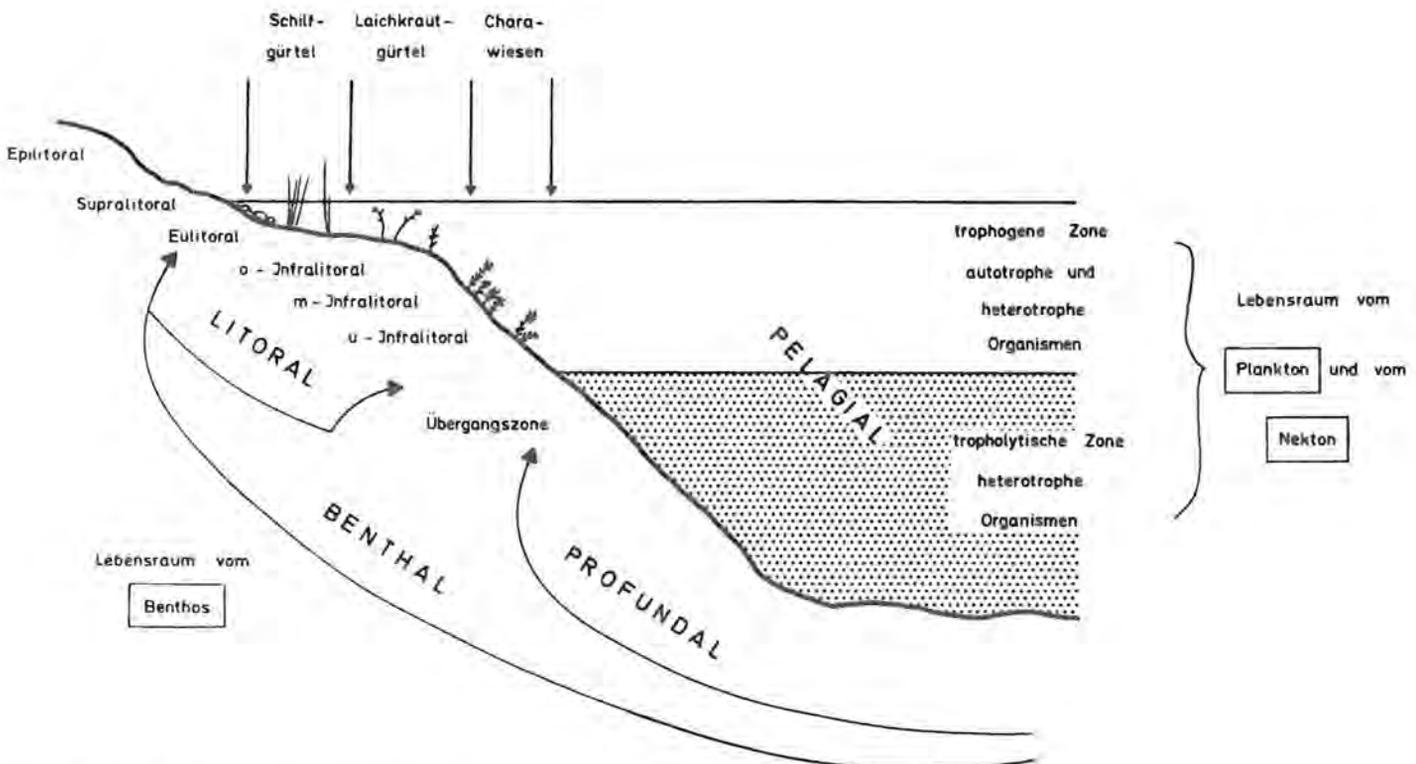


Abb. 12: Strukturelle Gliederung eines Sees

dal begrenzt. Von chemoautotrophen Organismen abgesehen, können hier nur heterotrophe Organismen existieren, die aber selbstverständlich auch die trophogene Zone besiedeln.

Da das Ufer des Königssees mit Ausnahme an seinem relativ schmalen Nord- und Südensteil abfällt, spielt sein Litoral eine verhältnismäßig untergeordnete, im Stoffhaushalt aber sicher nicht vernachlässigbare Rolle. Erste wichtige Hinweise werden sich aus den Untersuchungen über den Mageninhalt der Fische des Königssees ergeben (vgl. S. 116/117). Der Schwerpunkt unserer Untersuchungen lag im Bereich des Pelagials. In den folgenden Abschnitten wollen wir uns mit den physikalischen und chemischen Eigenschaften dieses Lebensraumes befassen.

5.2 Die Sonnenstrahlung als Energielieferant

Die Sonne liefert bekanntlich die gesamte Energie – sowohl für die Existenz des Lebens als auch für den globalen Zirkulationsmechanismus der Atmosphäre mit all seinen klimatologischen Erscheinungen. Die von ihr ausgehende Strahlung setzt sich aus verschiedenen Wellenlängen zusammen, von welchen das Spektrum zwischen 290 nm (UV) bis über 3000 nm (Infrarot) fast den gesamten Energiebetrag enthält. Von dem die Wasseroberfläche erreichenden und in das Wasser eingedrungenen Energiebetrag werden im Mittel 30% an der Wasseroberfläche (Spiegelung) bzw. aus dem Wasserkörper (Eigenfarbe des Gewässers) reflektiert. Etwa 70% stehen somit im Wasser als Strahlungsangebot zur Verfügung. Davon werden über 99% durch Absorption in Wärme transformiert. Sie verläßt den Wasserkörper als Wärmestrahlung, mit den verdunstenden Wasserteilchen und durch konvektive Wärmeleitung. Der minimale Rest der Strahlung von im Mittel weniger als 1% wird durch Photosynthese in chemische Energie umgewandelt und damit in das Nahrungsgewebe eingeschleust. Auch dieser Energieanteil wird in einem allerdings verzögerten Durchfluß zuletzt als Wärme freigesetzt. Während die Ausgangssubstanzen der stofflichen Komponenten in der Biosphäre in einem Kreislauf eingeschlossen sind, fungieren sie für die Energie gewissermaßen als Träger in einem Durchflußsystem.

Das Strahlungsenergieangebot Q_B ergibt sich aus der Strahlungsbilanzgleichung:

$$Q_B = Q_S + Q_H + Q_A - Q_R - Q_U - Q_W$$

wobei Q_S = Sonneneinstrahlung, Q_H = Himmelsstrahlung, Q_A = Temperaturstrahlung der Atmosphäre, Q_R = Reflexion, Q_U = Streustrahlung aus dem Wasserkörper, Q_W = Temperaturstrahlung aus dem Wasser.

Vernachlässigen wir den verhältnismäßig kleinen Anteil von Q_B , der durch Photosynthese chemisch gebunden wird, so steht Q_B für folgende Vorgänge zur Verfügung: für die Erhöhung des Wärmehalts (ΔB) des Gewässers, für die Verdunstung (Q_V) und für die konvektive Wärmeabgabe (Q_K). Es gilt daher:

$$Q_B - \Delta B - Q_V - Q_K = 0$$

In einem Voralpensee kommt man normalerweise mit einer Meßstelle aus, wenn man alle diese Größen zur Strahlungs- bzw. Wärmebilanz messen will. Im Königssee würde man aber mindestens zwei komplette Registrierstellen benötigen, weil die Einstrahlung durch das langgestreckte schmale und von hohen Gebirgszügen umgebene Becken an verschiedenen Orten z. T. sehr unterschiedlich ist. Da die vorgegebenen finanziellen Möglichkeiten für ihre Einrichtung und Wartung nicht ausreichen, beschränkten wir uns auf die Messung der photosynthetisch nutzbaren Strahlung während der Untersuchungen zur Primärproduktion.

5.3 Die Eigenschaften des Pelagials

5.3.1 Transmissionseigenschaften

Die in das Wasser eingedrungene Globalstrahlung nimmt mit zunehmender Tiefe durch Absorption (überwiegend Transformation in Wärme ΔB) und durch Streuung in die Atmosphäre (Q_U) mit exponentieller Charakteristik ab. Die Strahlungsextinktion (= Strahlungsverminderung durch Absorption und Streuung) bzw. ihr komplementärer Wert, die Strahlungstransmission, sind wellenlängenabhängig. Im destillierten Wasser liegt die Extinktion ab 760 nm bereits bei Werten von über 90% pro Meter Wasserschicht; bei 1400 nm endet die optische Durchlässigkeit (Schulze 1970). Bei Wellenlängen unter 760 nm nimmt die Strahlungsextinktion rasch ab, um bei 480 nm ein Minimum von ca. 0,5% pro Meter Wasserschicht zu erreichen. Bei noch kürzeren Wellenlängen nimmt die Extinktion dann wieder zu: bei 380 nm beträgt sie 2% pro Meter. Diese Eigenschaften sind offensichtlich an die Wassermoleküle gebunden. Durch die in den Gewässern immer vorhandenen gelösten und suspendierten Substanzen verändern sie sich erheblich. Dabei spielen die Humussubstanzen, die durch unvollständige Zersetzung von Pflanzenresten entstehen, eine besondere Rolle. Sie erhöhen die Extinktion vor allem im kurzwelligen Teil des Spektrums und verändern dementsprechend die spektrale Verteilung des Energieangebotes und selbstverständlich auch die Eigenfärbung des Gewässers.

Farbglastypen	Optischer Schwerpunkt des Meßbereiches (nm)
UG 1 + BG 12	365
BG 12	400
VG 9	525
OG 2 + BG 18	578
RG 630	650
RG 665	670

Die optische Charakterisierung eines Gewässers erfolgt daher am besten durch seine spektralen Extinktions- bzw. Transmissionseigenschaften, wobei letztere bevorzugt zur Darstellung gelangen. Unsere Messungen

wurden mit Hilfe der in Tabelle 10 angegebenen Filter in sechs verschiedenen Spektralbereichen durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen (Abb. 13), daß die maximale Transmission des Königssees mit fast 90% bei 520 nm liegt. Möglicherweise würde es bei Verwendung geringerer Filterbandbreiten noch etwas weiter in Richtung kürzerer Wellenlängen verschoben sein. Die Unterschiede gegenüber dem küstenfernen und daher besonders reinen Ozeanwasser einerseits und den anderen Gewässern sind jedoch evident. Zunächst fällt auf, daß die Transmissionskurve des Königssees jener des Ozeanwassers am meisten ähnelt. Größere Abweichungen sind auf den Wellenlängenbereich < 500 nm beschränkt, und es wurde bereits darauf hingewiesen, daß sich in diesem Bereich der Einfluß von Huminstoffen bemerkbar macht. Je höher deren Konzentration, desto stärker dieser Effekt, der beim Wasser eines Torftümpels extrem in Erscheinung tritt (Abb. 13).

Der Vergleich der Transmissionskurven zeigt somit, daß im Königssee eine relativ geringe Huminstoffkonzentration vorliegt. Es muß daher auch mit einer relativ geringen Produktion bzw. Zufuhr von organischer Substanz gerechnet werden. Mit dieser Eigenschaft nimmt der Königssee somit eine Sonderstellung ein, die nicht nur im Vergleich mit den in Abb. 13 dargestellten Beispielen gilt, sondern auch innerhalb einer größeren Gruppe österreichischer Seen (Tabelle 11). Hier steht der Königssee nach seiner optischen Kennzahl (Sauberer 1962) – sie ergibt sich als dreistellige Zahl, wenn der prozentuale Transmissionswert bei 400 nm, 500 nm und 600 nm jeweils auf die Zehnerzahl auf- bzw. abgerundet wird – mit dem Klopeiner See an 1. Stelle. Dabei sei hinzugefügt, daß die Daten der österreichischen Seen aus den 50er und 60er Jahren stammen, zu einer Zeit, in welcher gerade der Klopeiner See durch seine Nährstoff- und Planktonarmut als oligotropher See bekannt war.

Die spektralen Transmissionseigenschaften des Königssees erklären auch seine grünblaue Eigenfarbe. Da

Tabelle 11		Optische Kenndaten verschiedener Seen
Klopeiner See		798
Königssee		798
Achensee		797
Weißensee		788
Wörthersee		687
Faakersee		577
Millstätter See		477
Irrsee		476
Mondsee		476
Afritzer See		377
Feldsee		377
Turnersee		377
Ossiacher See		377
Krottensee		366
Zeller See		256

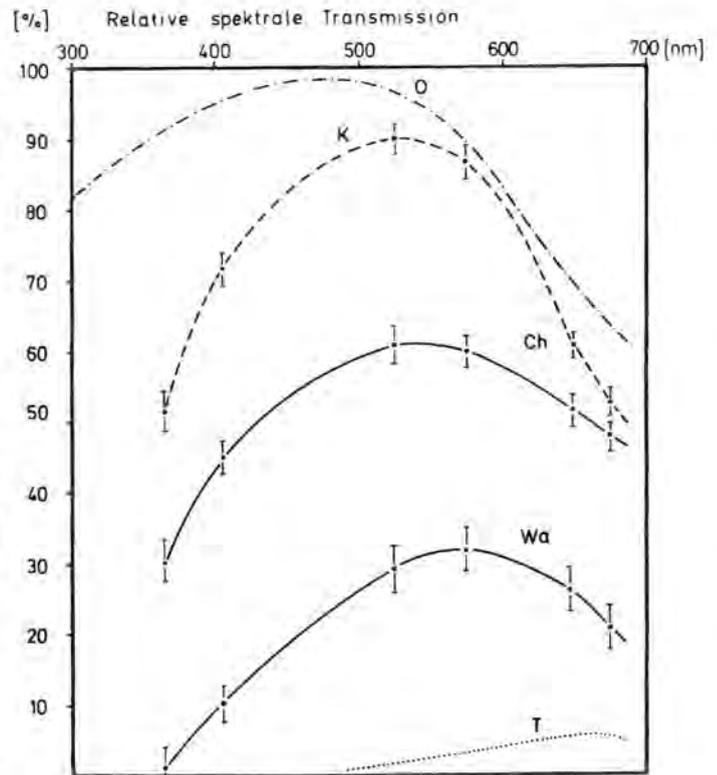


Abb. 13: Die relative spektrale Transmission informiert über die Durchlässigkeit des Wassers für verschiedene Wellenlängenbereiche, deren optischer Schwerpunkt in den Kurvenbildern jeweils eingezeichnet ist. Man beachte, daß der Königssee (K) in seinen Transmissionseigenschaften dem reinsten Ozeanwasser (O) relativ nahe kommt. Ch Chiemsee, Wa Waginger See, T Torftümpel bei Seon.

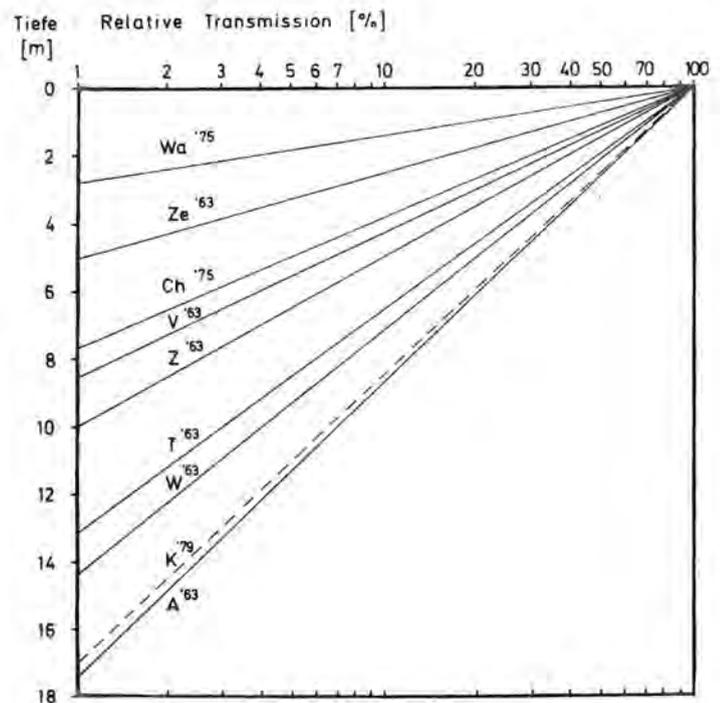


Abb. 14: Die relative Transmission in halblogarithmischer Darstellung für den Bereich des sichtbaren Lichtes (380–780 nm). Auf der Ordinate links läßt sich ablesen, in welcher Tiefe noch 1% des Lichtes an der Wasseroberfläche vorhanden sind. Wa Waginger See, Ze Zeller See, Ch Chiemsee, V Vierwaldstätter See, Z Züricher See, T Traunsee, W Wolfgangsee, K Königssee, A Attersee. Die Zahlen bedeuten Jahreszahlen der Messungen (Schweizer und österreichische Seen nach Findenegg 1965).

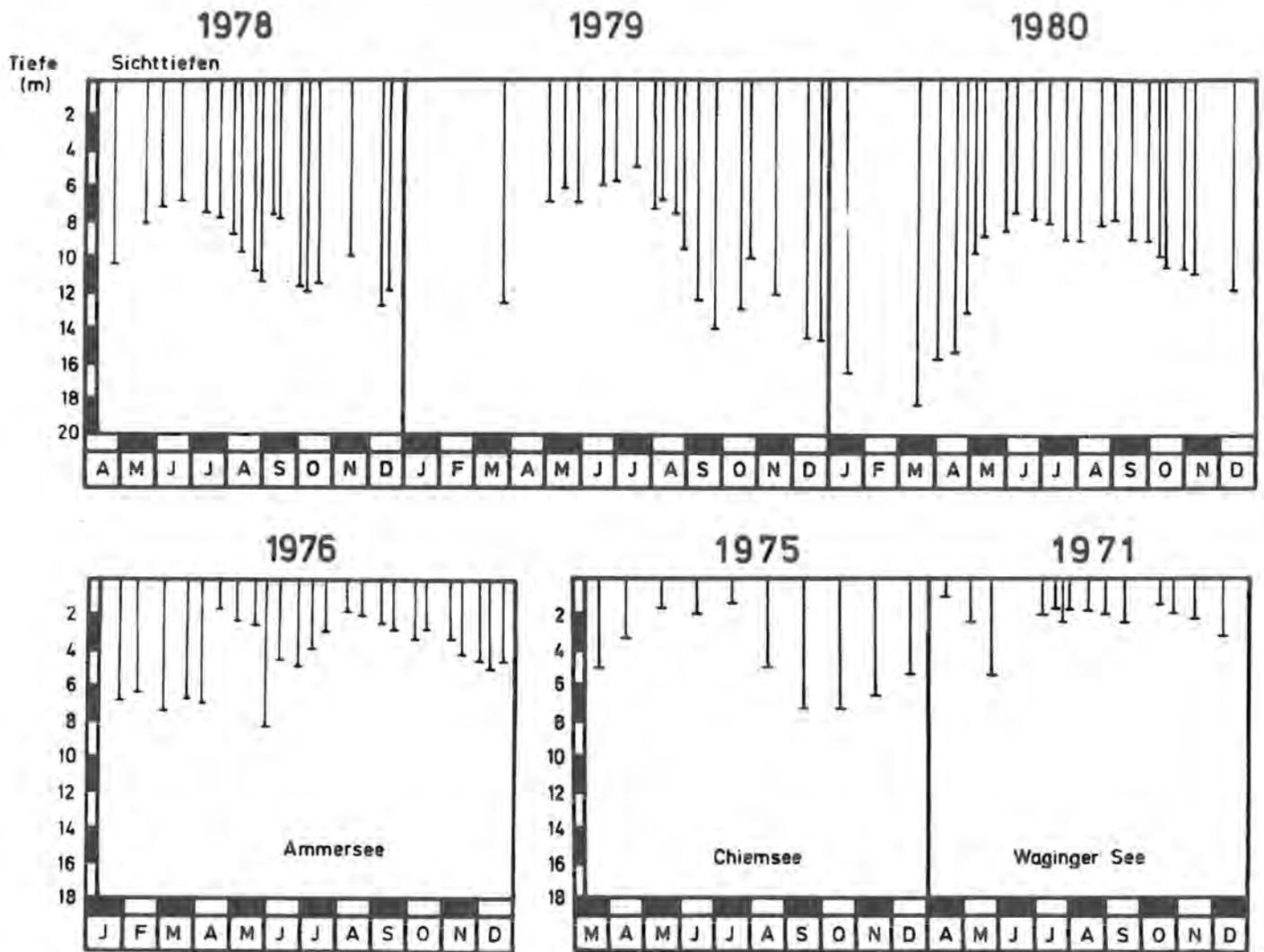


Abb. 15: Sichtttiefen (mit der Secchi-Scheibe gemessen). Im Königssee kommt es sehr regelmäßig zwischen Mai–September zu den niedrigsten Sichtttiefen infolge relativ hoher Algendichten. Im Vergleich mit den drei anderen Seen finden wir im Königssee im Mittel jedoch die höchsten Sichtttiefen.

die Intensität des Streulichtes im Wasser der 4. Potenz der Frequenz proportional ist, besitzt reinstes Wasser in hinreichend tiefer Schicht eine blaue Farbe. Wenn die Konzentration an Huminstoffen zunimmt, kommen zunächst blaugrüne, dann grüne, olivgrüne und schließlich braune Färbungen zustande. Die blaugrüne Eigenfarbe des Königssees ist somit ein Indiz für den geringen Gehalt an organischen Substanzen, der in der Reihenfolge Chiemsee, Waginger See und Torftümpel (Abb. 13) immer mehr ins Gewicht fällt. In dieser Reihung verstärkt sich auch der Trübungseffekt durch suspendierte Partikelchen.

Nicht weniger eindrucksvoll bestätigt sich die besondere Klarheit des Königsseewassers, wenn man die relative Transmission des gesamten sichtbaren Strahlungsbereichs als Vergleichskriterium heranzieht. Das ist in Abb. 14 mit Hilfe einer halblogarithmischen Darstellungsweise geschehen.

Es zeigt sich, daß der Königssee mit dem Attersee der 60er Jahre die höchste Transmission erreicht. Die Klarheit seines Wassers wird anschaulich, wenn man bedenkt, daß in einer hellen Vollmondnacht bei geringer Bewölkung eine Beleuchtungsstärke von etwa 0,5 lux

vorhanden ist. Diese Beleuchtungsstärke würde im Juni gegen Mittag in einer Tiefe zwischen 40–50 m anzu-treffen sein, im Waginger See aber schon zwischen 5–10 m. Die Farbqualität wäre ebenfalls verschieden: im Königssee würde es sich um ein blaugrünes, im Waginger See um ein olivgrünes bis braunes Dämmerungslicht handeln.

In der limnologischen Praxis ist zur Prüfung der Lichtdurchlässigkeit auch noch ein anderes Verfahren üblich: Die Bestimmung der Sichttiefe mit einer weißen sogenannten Secchi-Scheibe (\varnothing 25 cm), die bis zum Ende ihrer Sichtbarkeit im See versenkt wird. Dieses Verfahren ist sehr grob, weil die Sichtbarkeit der Scheibe nicht nur von der Lichtdurchlässigkeit im Wasser, sondern auch vom Kontrast der Scheibe zur Umgebung abhängig ist.

Im Falle der in Abb. 15 berücksichtigten Seen unterstützen die Sichtttiefenbestimmungen die Ergebnisse der Transmissionsmessungen. Der Königssee stellt sich als der See mit der höchsten Sichttiefe dar, die im Untersuchungszeitraum maximal 18 m erreichte und sich die meiste Zeit des Jahres zwischen 6–12 m bewegte. Im Ammersee (1976) und im Chiemsee (1975) liegen die

Maximalwerte bei 8 m. In beiden Seen können Sichttiefen von weniger als 3 m vorkommen. Noch geringer sind die Sichttiefen im Waginger See. Sie liegen fast immer zwischen 2–3 m und erreichen nur unter besonderen Bedingungen auch Werte über 5 m. Obgleich von den anderen bayerischen Seen weder Sichttiefenbestimmungen noch Transmissionsmessungen in hinreichender Zahl vorhanden sind, besteht kein Zweifel, daß der Königssee einer der klarsten Seen Bayerns ist und hinsichtlich dieser Eigenschaft auch im mitteleuropäischen Raum eine Spitzenstellung einnimmt.

Es ist jedoch nicht auszuschließen, daß die Sichttiefe bzw. Transmission ohne anthropogene Einflüsse noch größere Werte erreichen würde. So wurden während des Untersuchungszeitraumes im Bereich von St. Bartholomä im Zuge von Ausbesserungsarbeiten an den Ufermauern erhebliche Trübungen erzeugt, die sich unter Abschwächung in Richtung Seemitte bewegten. Eine entsprechende Wirkung geht von den Schiffschrauben aus, wenn sich die Fahrgastschiffe im flacheren Seeteil, vor allem im Bereich der Landungsstege bei St. Bartholomä und Sallet bewegen. Taucher berichten (vgl. Melzer 1981), daß man die Spuren der Schraubenbewegungen in den Seekreidebänken am Salletufer sehen kann. Es wird somit auch hier feinstes Material aufgewirbelt, das z. T. nur sehr langsam sedimentiert und daher weit in den See hinaus treibt.

5.3.2. Thermik

5.3.2.1 Schichtung und Zirkulation

Da das Strahlungsangebot von der Jahreszeit abhängt und im Wasser im allgemeinen über 99% in Wärme umgewandelt werden, ist der Wärmeinhalt eines Sees von seiner geographischen Lage und der Jahreszeit abhängig. Das trifft auch für die vertikale Verteilung des Wärmeinhalts zu. Unter alleiniger Berücksichtigung des exponentiellen Strahlungsabfalls im Wasser wäre eine entsprechende Wärmeverteilung zu erwarten. Unter dem Einfluß von Ausstrahlung, Verdunstung und konvektiver Wärmeleitung, ganz besonders aber unter dem Einfluß der Windarbeit, kommt es jedoch zu erheblichen Wärmeumverteilungen. Dabei können einerseits stabile Schichtungen entstehen und andererseits bei hinreichender Verminderung der Dichteunterschiede auch mehr oder weniger weit bis zum Seegrund reichende Durchmischungen. In Abhängigkeit von der geographischen Breite lassen sich amiktische, kaltmonomiktische, dimiktische, warmmonomiktische sowie oligo- und polymiktische Seen unterscheiden. Aus Abb. 16 wird ersichtlich, daß die zwischen dem 40.–60. Breitengrad liegenden Seen dem dimiktischen Durchmischungstyp angehören, sofern sie bestimmte Höhenlagen nicht überschreiten. Dazu gehören auch alle oberbayerischen Seen (~ 48° N.).

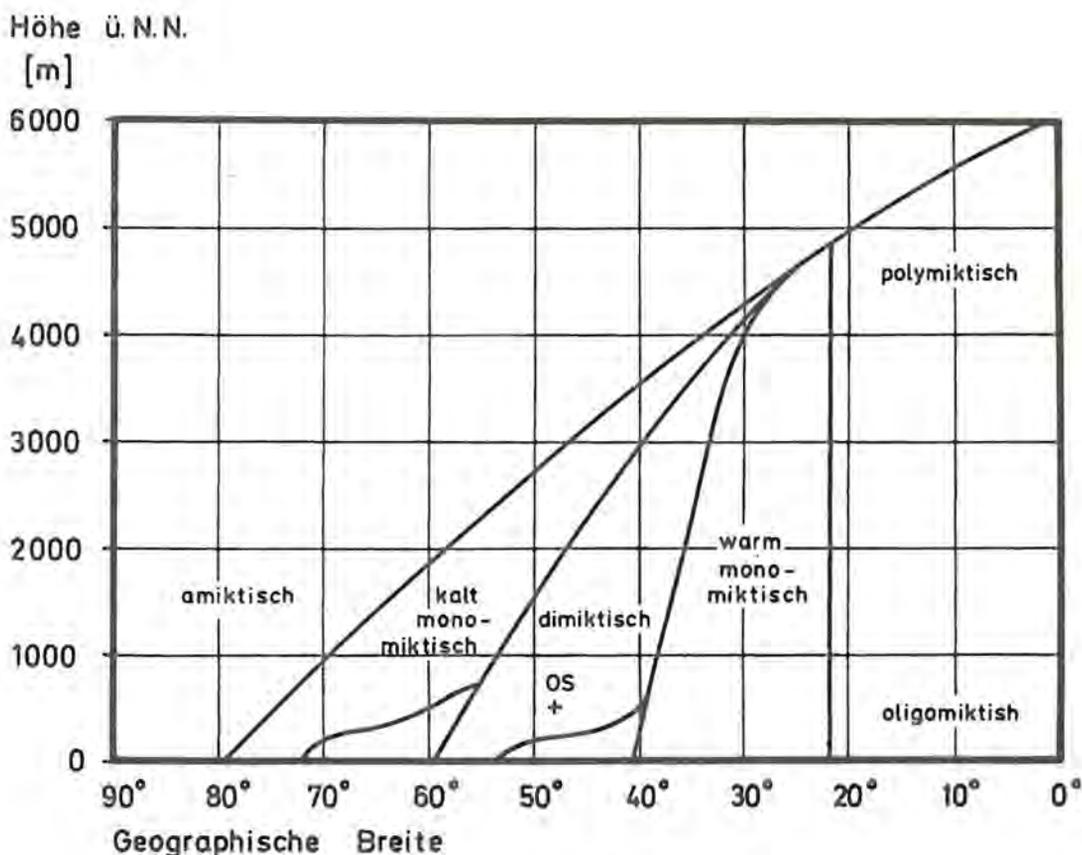


Abb. 16: Abhängigkeit des Zirkulationstyps von der geographischen Lage und der Höhe üNN. OS = Position der oberbayerischen Seen.

°C Temperatur - Monatsmittel

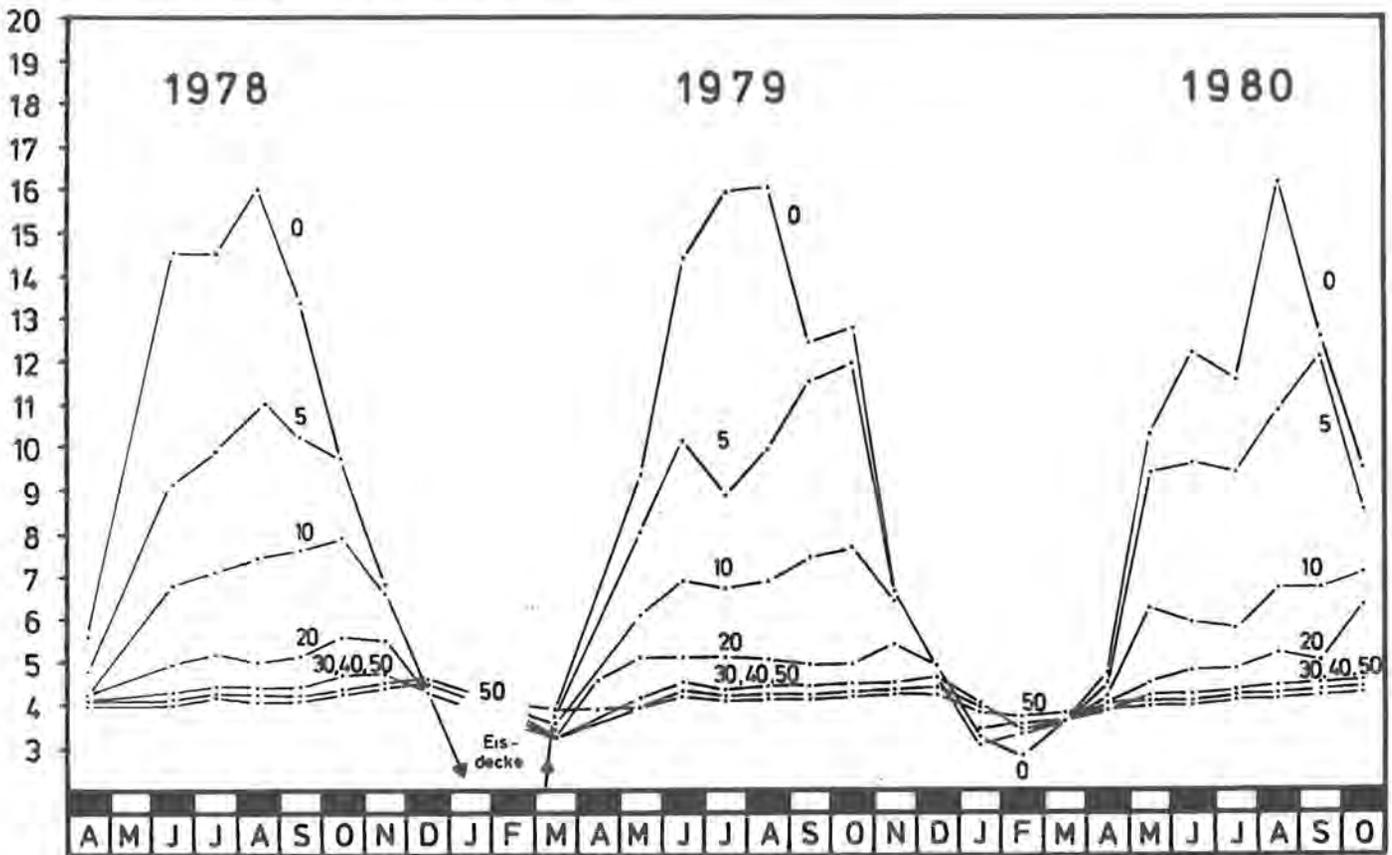


Abb. 17: Temperaturmonatsmittel im Königssee für verschiedene Wassertiefen. Näheres im Text.

Ein dimiktischer See tritt zweimal pro Jahr (Frühjahr und Herbst) in die Zirkulationsphase, während er im Sommer und Winter stabil geschichtet ist (Sommer- bzw. Winterstagnation). Während der Stagnationsphasen läßt sich der Wasserkörper im typischen Fall und vereinfachend formuliert in drei übereinander liegende Wasserschichten aufteilen: die an die Wasseroberfläche angrenzende Schicht, das Epilimnion, welches vom Wind immer wieder durchmischt wird, so daß die durch Einstrahlung entstehende Wärmeverteilung stets mehr oder weniger aufgehoben und die Wärme gleichmäßig verteilt wird, die unterhalb dieser Zone liegende Sprungschicht (Metalimnion), die durch einen starken Temperaturabfall zur Tiefe gekennzeichnet ist und das Hypolimnion als letzte Schicht, das von den Durchmischungsprozessen im Epilimnion unbeeinflusst bleibt und sich daher durch Temperaturen auszeichnet, die der See am Ende der vorausgegangenen Durchmischungsperiode besaß.

Die Zirkulationsphasen schließen grundsätzlich zwei in ihrem Ausmaß unterschiedliche Fälle ein: entweder werden die Wassermassen bis zum Grund in die Zirkulation einbezogen – in diesem Fall wird der See voll durchmischt (holomiktischer See) – oder, die Zirkulation reicht nicht bis zum Grund (meromiktischer See). Im Falle des meromiktischen Sees bleiben nach Aufhebung der Temperaturunterschiede Konzentrationsbedingte Dichteunterschiede bestehen. Es bleibt somit eine gewisse Stabilität erhalten, die auch während der Zirkulationsphase weder durch Konvektionsströmungen

noch durch Windarbeit aufgehoben wird. Es liegt auf der Hand, daß ein tiefer See mit kleiner Seeoberfläche die Entwicklung zur Meromixie begünstigt, auf welche Weise sie auch immer entsteht.

5.3.2.2 Wärmeinhalt

Durch das Überwiegen der Einstrahlung an relativ vielen Tagen zwischen Frühjahr und Herbst wächst der Wärmeinhalt (ΔB) eines Sees, bis schließlich der maximale Jahreswert erreicht ist. Das ist in der Regel im Spätsommer (August) der Fall. Im Herbst nimmt die Einstrahlung ab, so daß schließlich die Ausstrahlung überwiegt. Der Wärmeinhalt des Sees schrumpft, seine Temperaturen nehmen daher ab. Von der abgegebenen Wärme profitiert die Umgebung: In Landschaften mit großen Seen ist das winterliche Klima bekanntlich besonders mild. In diesem Zusammenhang ist folgende Betrachtung aufschlußreich: Um 1 ml Wasser um 1°C zu erwärmen, ist etwa 1 cal erforderlich. Das ist ungefähr das 3333fache derjenigen Wärmemenge, die man benötigt, um 1 ml Luft um 1°C zu erwärmen. Daraus ergibt sich nun Folgendes: Wenn unter 1 cm^2 Wasseroberfläche 1 ml Wasser durch Wärmeabgabe von 1 cal um etwa 1°C abkühlt, so reicht die betreffende Wärmemenge aus, um über diesem cm^2 Wasseroberfläche eine Luftsäule von 32,25 m Höhe um etwa 1°C zu erwärmen.

Bei der Berechnung des Wärmeinhalts unterscheidet man im wesentlichen drei Größen: 1) den sommerlichen

°C Temperatur - Monatsmittel

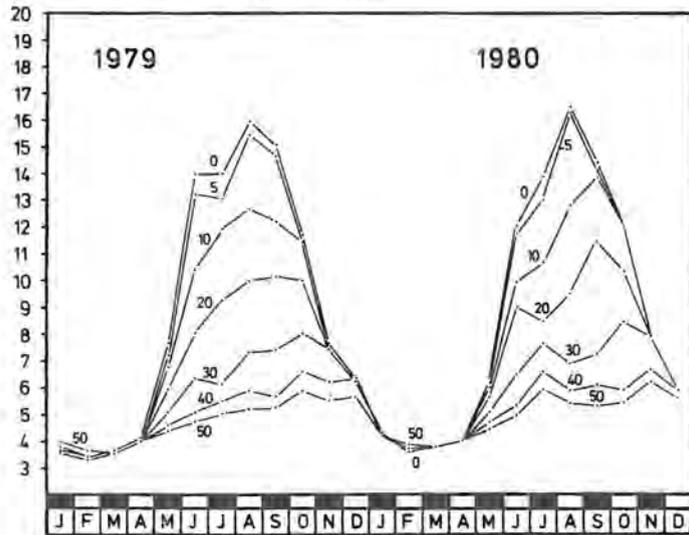


Abb. 18: Temperaturmonatsmittel im Walchensee für verschiedene Wassertiefen (nach Angaben von Dr. C. Steinberg, Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft, gezeichnet).

°C Temperatur - Monatsmittel

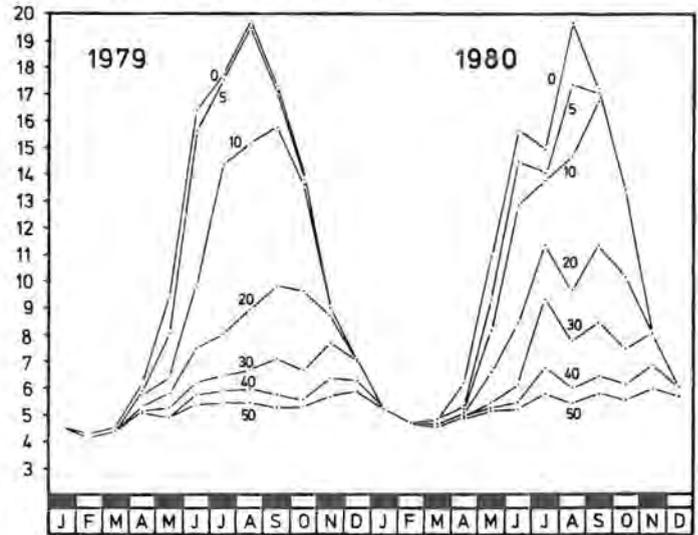


Abb. 19: Temperaturmonatsmittel im Bodensee für verschiedene Wassertiefen (nach Angaben von Dr. U. Einsle, Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg, gezeichnet).

Wärmegewinn, 2) den winterlichen Wärmegewinn und 3) die Jahreswärmebilanz. Als sommerlichen Wärmegewinn bezeichnet man den Wärmezuwachs zwischen einer Ausgangslage – z. B. Homothermie bei 4°C z. Zt. der Frühjahrsvollzirkulation – und dem maximalen Wärmeinhalt. Als winterlichen Wärmegewinn bezeichnet man den Wärmezuwachs zwischen einer Ausgangslage, die durch die niedrigsten Jahrestemperaturen über alle Wasserschichten gekennzeichnet ist, und dem Wärmeinhalt, der bei 4°C Homothermie vorliegt. Um nun den gesamten Wärmegewinn zu berechnen, der im Verlaufe des Jahres zustande gekommen ist, müssen winterlicher und sommerlicher Wärmegewinn addiert werden.

Bei einer ersten Abschätzung dieser Größen für den Königssee sind wir davon ausgegangen, daß die Temperaturen in den Tiefen über 50 m keine wesentlichen vom Jahresrhythmus geprägte Veränderungen zeigen. Unsere Berechnungen wurden daher auf die Wasserschicht zwischen 0–50 m beschränkt. Als winterlicher Wärmegewinn zwischen Februar und April 1980 ergibt sich ein Betrag von $12\,417 \times 10^8$ cal ($2\,379$ cal/cm²).

Berücksichtigt man, daß im gleichen Zeitraum eine auf das Südbecken beschränkte Eisdecke (ca. 1,482 km²) von im Mittel ca. 30 cm Dicke aufgetaut worden ist, so muß ein zusätzlicher Wärmeimport von mindestens $3\,544 \times 10^8$ cal erfolgt sein (um 1 cm³ Eis aufzutauen, bedarf es einer Zufuhr von 79,72 cal), der aber nicht zur Erhöhung des Wärmeinhaltes beigetragen hat. Der sommerliche Wärmegewinn (April bis August) beträgt $48\,843 \times 10^8$ cal ($9\,360$ cal/m²). Als Gesamtwärmegewinn (Jahreswärmebilanz) ergibt sich ein Betrag von $61\,260 \times 10^8$ cal ($11\,739$ cal/cm²). Ein Blick auf Tabelle 12 zeigt, daß der Königssee mit diesem im Jahre 1980 erzielten Wärmegewinn pro cm² zu den Seen gehört, die im Verlauf des Sommers den geringsten Wärmezuwachs erfahren.

5.3.2.3 Jahreszeitlicher Temperaturverlauf

Der Verlauf der Temperaturmonatsmittel ist in Abb. 17 für sieben verschiedene Tiefen dargestellt. Es fällt auf – besonders im Vergleich mit dem Walchensee (Abb. 18) und Bodensee (Abb. 19) –, daß die relativ großen jahreszeitlichen Temperaturänderungen im Königssee auf die obere 30-m-Schicht beschränkt sind.

Tiefe [m] Temperatur [°C] - Isoplethen

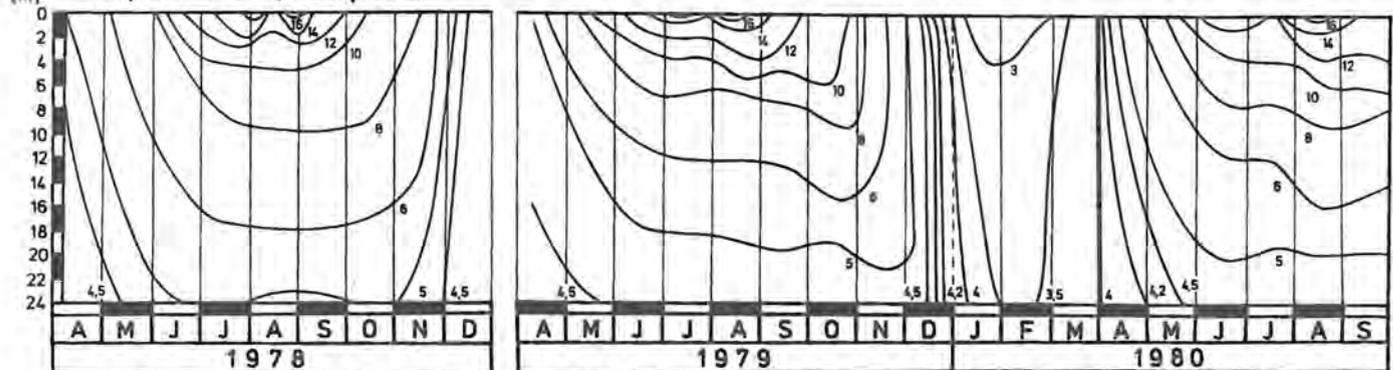


Abb. 20: Temperatur-Isoplethen in der 0–24-m-Schicht des Königssees.

Tabelle 12

Jahreswärmegewinn verschiedener Seen
(ausgenommen Chiemsee und Königssee, alle Daten aus Hutchinson 1957)

See	Geographische Lage	Meereshöhe m ü. NN.	Fläche km ²	Jahreswärmegewinn cal · cm ⁻²
Bodensee	47° 39'	395	538,5	29 000
Zürichsee	47° 15'	409	88,66	21 700
Chiemsee*)	47° 53'	518	82,2	20 473
Attersee	47° 52'	469	46,7	27 600
Zugersee	47° 04'	416	38,2	29 500
Traunsee	47° 53'	422	25,7	33 400
Walensee	47° 09'	423	24,2	36 000
Tegernsee	47° 45'	725	9,12	25 400
Hallstätter See	47° 35'	508	8,58	26 600
Greifensee	47° 23'	439	8,56	16 000
Staffelsee	47° 42'	648	7,65	15 200
Kochelsee	47° 39'	599	5,86	20 900
Königssee*)	47° 33'	603	5,20	11 800
Schliersee	47° 44'	778	2,19	14 700
Lunzer Untersee	47° 57'	607	0,68	13 700
*) Chiemsee 1981; Königssee 1980				

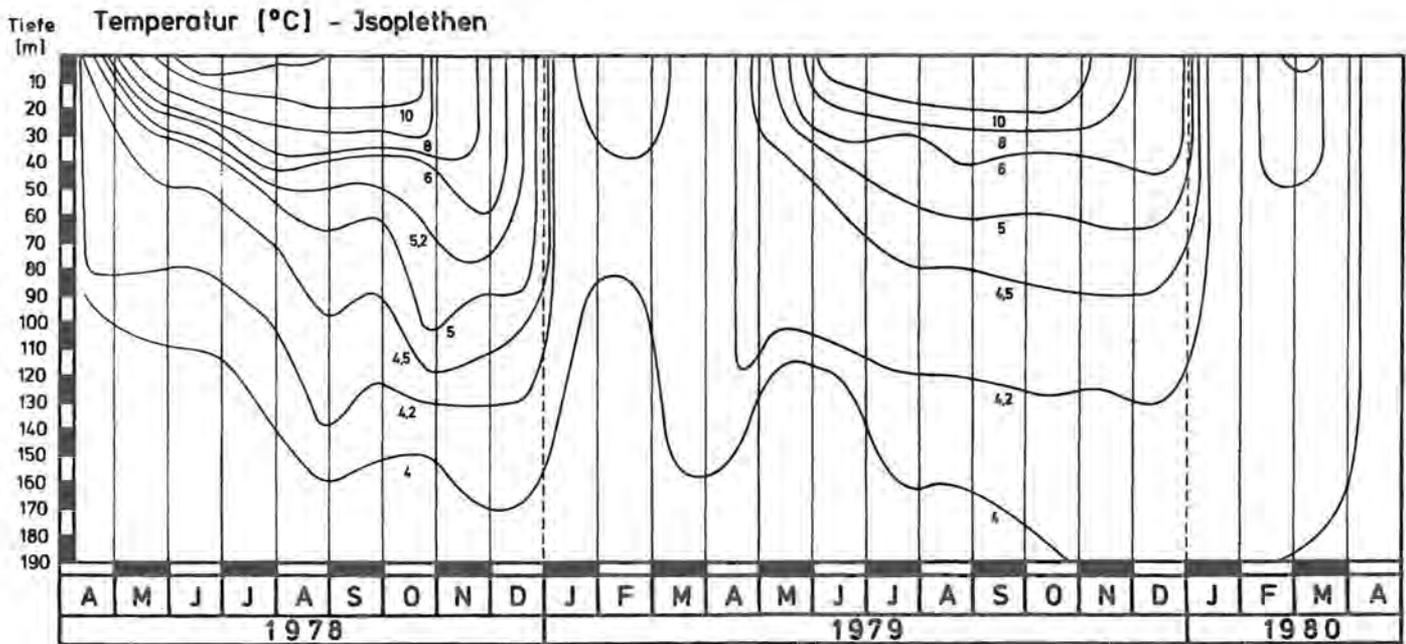


Abb. 21: Temperatur-Isoplethen des Walchensees (nach Angaben von Dr. C. Steinberg, Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft, gezeichnet).

Mit zunehmender Tiefe werden die Temperaturamplituden im Königssee besonders rasch kleiner. Der maximale Oberflächenwert liegt bei 16°C , in 5 m Tiefe bei $11\text{--}12^{\circ}\text{C}$ und in 10 m Tiefe bereits unter 8°C . Die jahreszeitlichen Temperaturunterschiede sind im Bodensee und Walchensee daher auch in erheblich größerer Tiefe noch nachweisbar: So variieren die Königssee-Temperaturen in 50 m Tiefe nur noch im Bereich weniger Zehntelgrade, in den beiden anderen Seen liegt die Temperaturspanne bei 2°C . Weitere Informationen ergeben sich aus der Isoplethendarstellung (Abb. 20). So liegen die Temperaturen im Königssee während der höchsten sommerlichen Erwärmung (August) schon in 6 m Tiefe unter 10°C . Eine entsprechend niedrige Temperatur beobachtet man im Walchensee (Abb. 21) erst in etwa 20 m Tiefe.

Aus diesen Vergleichen folgt, daß die Dynamik der jährlichen Temperaturänderungen im Königssee auf eine Oberflächenschicht von verhältnismäßig geringer Mächtigkeit beschränkt ist.

5.3.2.4 Vertikale Temperaturschichtung

Aus den großen Unterschieden der Monatsmittel zwischen Oberflächentemperatur und der 5-m-Temperatur (Abb. 17) folgt bereits, daß es im Königssee – wiederum in auffälligem Gegensatz zu Walchensee und Bodensee (Abb. 18 und 19) – kein mächtiges Epilimnion geben kann. Betrachtet man den Temperaturabfall in kleineren Tiefenabständen, so zeigt sich, daß es im Königssee über längere Zeitabschnitte während der Sommerstagnation überhaupt kein nennenswertes Epilimnion gibt. Das für die windexponierten Voralpenseen typische Epilimnion wird im Königssee nur vor der sommerlichen Erwärmung und während der herbstlichen Abkühlung beobachtet. Im Sommer findet man es nur

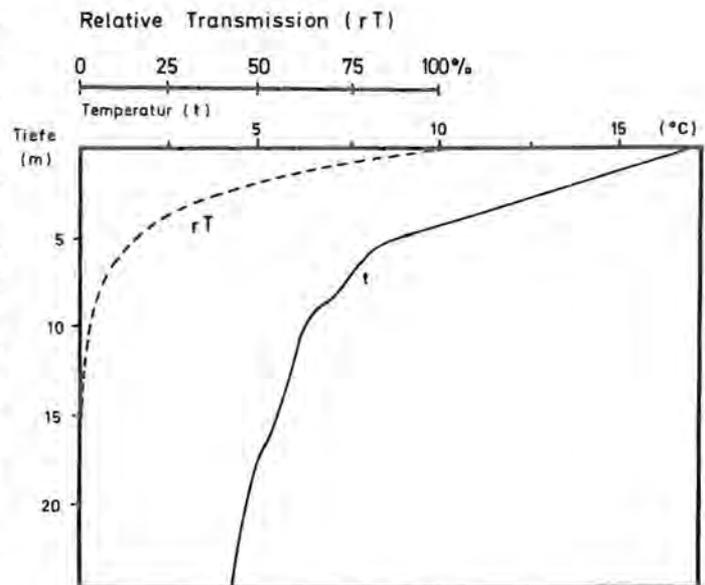


Abb. 22: Beispiel für den sommerlichen Temperaturverlauf und die relative Transmission innerhalb der trophogenen Zone des Königssees.

nach starker Windtätigkeit für einen bis einige wenige Tage, und dann meist nur in einer Mächtigkeit von 1–4 m. Im allgemeinen beginnt der für das Metalimnion typische Temperatursprung somit schon nahe an der Wasseroberfläche, und so zeigt der vertikale Temperaturverlauf eine verhältnismäßig große Ähnlichkeit mit dem exponentiellen Strahlungsabfall (Abb. 22). Wenn diese gesetzmäßig gegebene Beziehung im Königssee besonders gut sichtbar ist, so heißt das, daß der Wind einfluß von untergeordneter Bedeutung ist. Mit anderen Worten: Es fehlt der enorme Wärmetransport in die Tiefe, der nur durch Windeinwirkung möglich und daher für alle windexponierten Seen typisch ist.

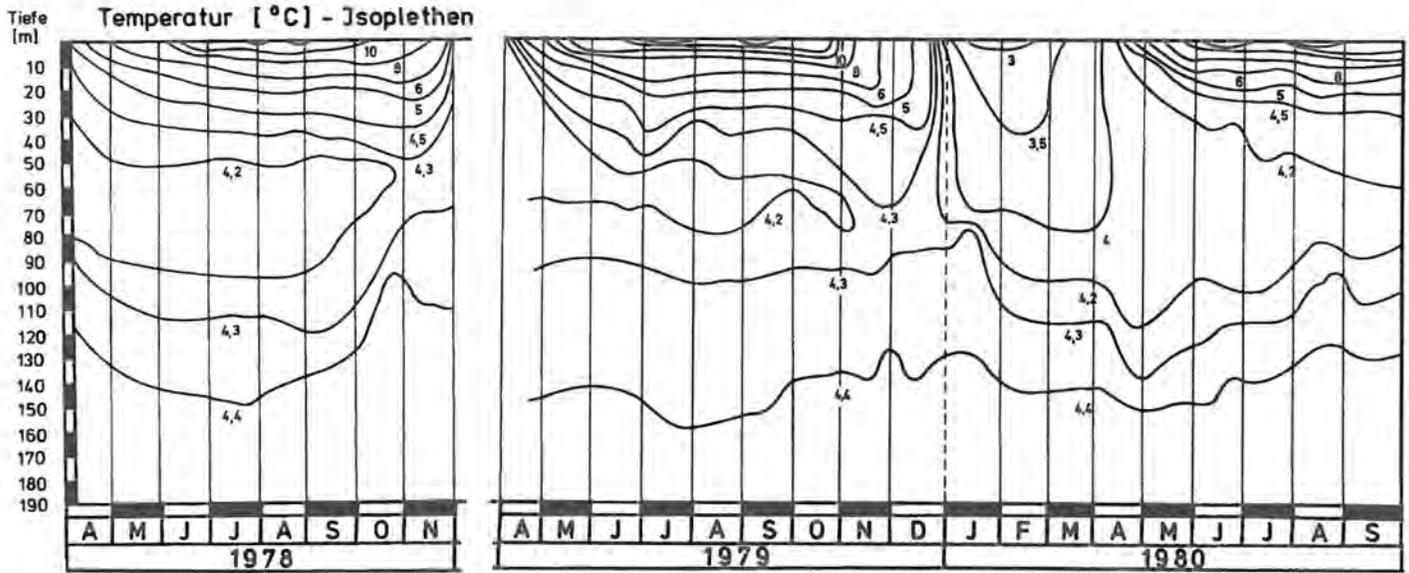


Abb. 23: Temperatur-Isoplethen des Königssees.

Eine weitere Besonderheit in der vertikalen Temperaturverteilung ergibt sich aus Abb. 23. Es handelt sich um eine Temperaturinversion, die zwischen 75–100 m zustandekommt. In den darüber liegenden Schichten sinken die Temperaturen von der jeweiligen Oberflächentemperatur bis auf 4,2°C, um in dem genannten Tiefenabschnitt wieder auf 4,3°C anzusteigen. In Grundnähe (175 m) wurden mitunter Temperaturen bis zu 4,5°C gemessen.

Trotz dieses Temperaturverlaufes ist die vertikale Dichteschichtung stabil (Abb. 24). Leitfähigkeitsmessungen zeigen nämlich, daß die Elektrolytkonzentration mit zunehmender Tiefe ansteigt. Dementsprechend steigt die konzentrationsbedingte Dichte an, und zwar so stark, daß die mit der Temperaturinversion gekoppelte Dichteannahme überkompensiert wird. Die Datenzusammenstellung in Tabelle 13 zeigt, daß die Dichtezunahme in der Tiefe für lange Zeiträume erhalten bleibt, wenn sie nicht sogar eine bleibende Eigenschaft ist.

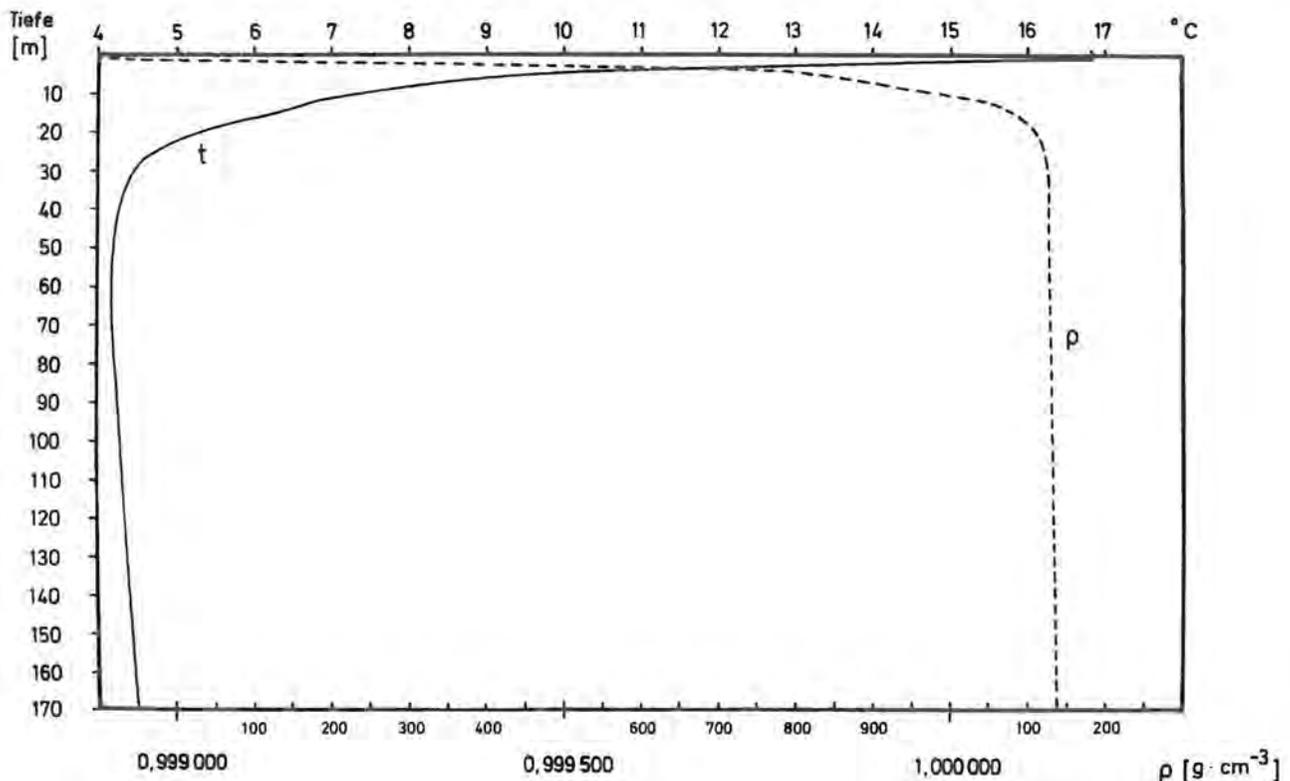


Abb. 24: Verlauf der Temperatur (t) und der Dichte (p). Die Dichte wurde aufgrund der vorgefundenen Temperatur- und Leitfähigkeitswerte berechnet. Durch die Leitfähigkeitswerte kann der Einfluß der unterschiedlichen Elektrolytkonzentrationen auf die Dichte des Wassers berücksichtigt werden.

Tabelle 13

Vertikale Dichteverteilung in der tropholytischen Zone ($10^6 + \sigma$) $\times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
 σ -Werte

Tiefe (m)	Datum													
	3. 5. 79	30. 5.	23. 6.	29. 6.	1. 8.	23. 8.	13. 9.	30. 9.	18. 10.	30. 11.	21. 12.	15. 1. 80	10. 2.	19. 3.
20	124,5	120,9	116,5	113,6	115,0	116,6	111,4	109,4	116,1	95,8	110,2	116,5	123,9	120,6
25	126,9	125,0	123,4	122,1	122,1	123,6	116,6	115,3	121,9	117,4	110,2	116,3	122,9	121,3
30	127,5	125,8	124,3	125,5	124,8	126,8	119,0	117,0	123,4	119,4	109,4	116,2	122,4	121,3
40	129,1	126,7	125,7	127,7	129,8	128,1	121,6	121,0	126,9	120,7	109,4	115,8	122,4	121,1
50	129,1	128,1	126,6	130,1	130,4	132,0	125,5	123,1	127,8	122,5	115,2	115,7	121,2	121,5
70	131,3	129,1								124,9	122,5	119,6	122,8	123,3
75			129,3	132,2	131,4	133,4	127,2	126,7	130,0			120,6		
100	133,2	130,4	132,8	133,4	133,7	133,6	130,1	129,5	130,1	129,3	127,5	125,8	127,3	126,3
120	133,9	134,1								130,6	129,1	128,3	129,5	128,6
125			134,2	134,0	134,1	134,0	130,5	129,9	133,3					
150	134,0	135,4	133,8	134,0	134,1	135,0	131,6	131,2		132,5	130,2	131,4	132,1	130,6
170	135,4	135,8		135,1	135,2	136,0	132,7	132,9	135,3			133,0	132,5	131,7

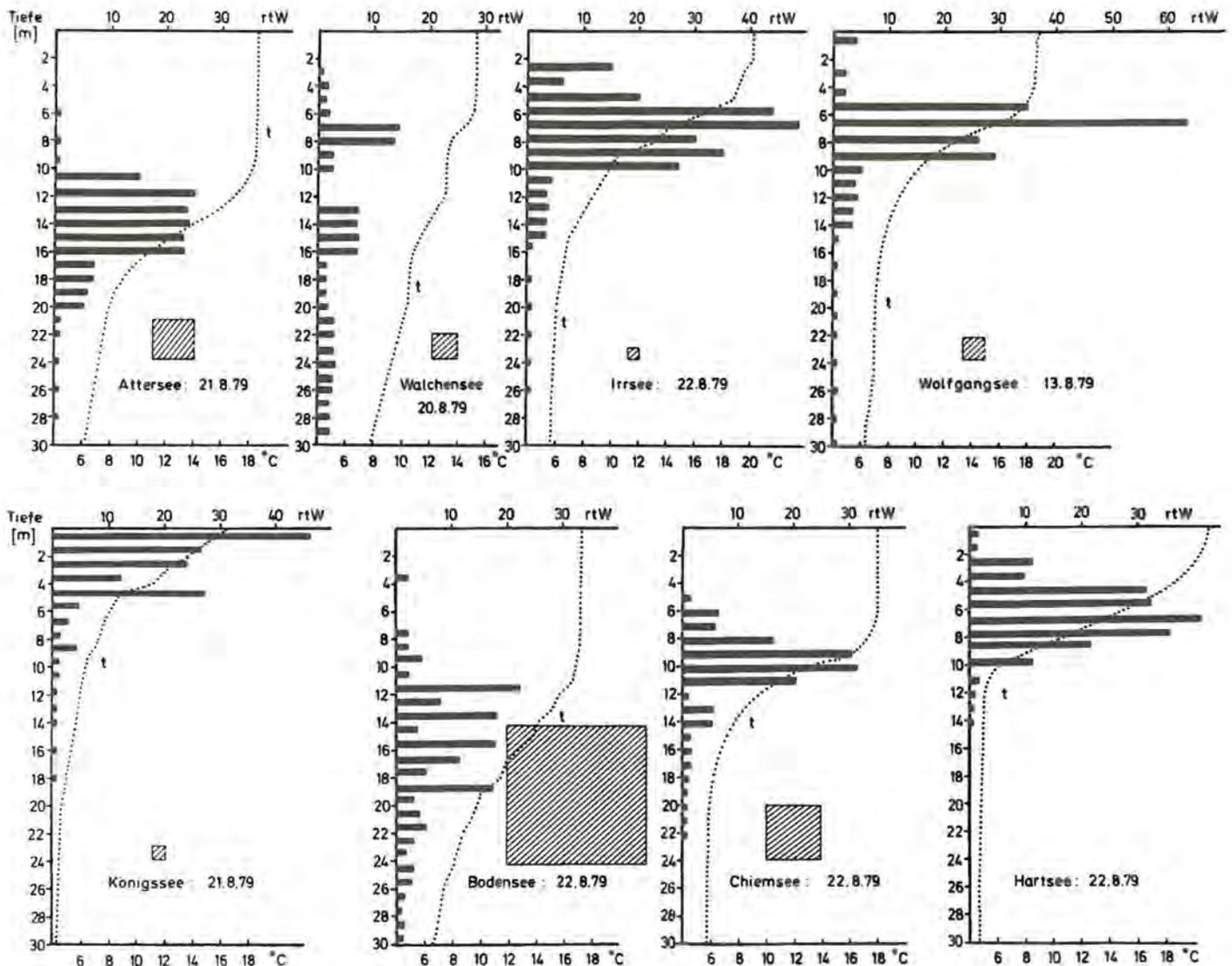


Abb. 25: Vertikaler Temperaturverlauf im Spätsommer in verschiedenen Seen. Die horizontalen Balken geben die Werte des relativen thermischen Widerstandes an. Der Seitenlänge (im Maßstab 1:464 200 gezeichnet) der Quadrate entspricht die Quadratwurzel aus dem Seearéal. Man beachte, daß die Sprungschicht bei großem Seearéal im allgemeinen tiefer liegt als bei kleinem Seearéal.

5.3.2.5 Zirkulationsverhalten

Die zuletzt formulierte Aussage bedeutet konsequenterweise, daß eine Vollzirkulation im Königssee auch bei einheitlicher Wassertemperatur nicht ohne weiteres möglich ist. Wir wollen daher nun anhand der Isoplethendarstellung (Abb. 23) prüfen, ob es im Untersuchungszeitraum überhaupt jemals zu einer einheitlichen Temperatur gekommen ist. Sie würde durch den vertikal orientierten Verlauf der entsprechenden Isoplethen zu erkennen sein. Ein solcher liegt aber (im Gegensatz zum Walchensee in Abb. 21, vgl. März 1980) nicht vor. Die größte Ausdehnung einer homothermen Wasserschicht ist im April 1980 zu beobachten. Sie reicht bei einer Temperatur zwischen $>4^{\circ}\text{C}$ und $<4,2^{\circ}\text{C}$ bis zu einer Tiefe von höchstens 120 m. Unterhalb dieser Tiefe nimmt die Temperatur zu. Im Dezember 1979 gibt es ebenfalls eine verhältnismäßig homotherme Schicht, die aber nur bis zu einer Tiefe von 90 m reicht. Zwei besonders wichtige Informationen verdienen somit festgehalten zu werden: 1) Die im allgemeinen als Herbst- bzw. Frühjahrszirkulation bezeichneten Durchmischungsphasen beginnen im Königssee verhältnis-

mäßig spät: 1978 nicht vor Ende November, 1979 nicht vor Mitte Dezember bzw. nicht vor März 1980. So bleibt wenig Zeit bis zur Winter- bzw. Sommerstagnation. 2) Die Zirkulation reicht nicht bis zum Grund – jedenfalls weder 1979/80 noch im Frühjahr 1980, ohne daß dafür außergewöhnliche Witterungsverhältnisse verantwortlich gemacht werden könnten.

Das Studium der Sauerstoffverteilung wird zur Frage der Zirkulation weitere Informationen liefern. Wir werden daher auf dieses Thema nochmals zurückkommen (vgl. Seite 70 und 76).

5.3.2.6 Relativer thermischer Widerstand und Stabilität

Wenn man bedenkt, daß bei der Durchmischung von thermisch geschichtetem Wasser jeweils das wärmere in die Tiefe und das kältere nach oben verfrachtet wird, so ist einzusehen, daß diese Prozedur nicht ohne Arbeitsaufwand möglich ist. Der Widerstand, den das Wasser der durchmischenden Kraft entgegensetzt, hängt in erster Näherung von den gegebenen Dichteunterschieden ab: Je größer der Dichteunterschied

zwischen den übereinanderliegenden Wasserschichten, desto größer der Widerstand. Dieser kann formal durch die Größe der Dichteunterschiede ausgedrückt werden. Bezieht man sie auf den Dichteunterschied zwischen 4° – 5°C , der gleich 1 gesetzt wird, so erhält man den relativen thermischen Widerstand (Vallentyne 1957).

Der relative thermische Widerstand ist besonders gut geeignet, um die Tiefenposition und die Ausprägung einer Sprungschicht darzustellen. Vergleicht man verschiedene Seen während der sommerlichen Schich-

tung nach diesem Kriterium, so ergibt sich, daß der Königssee der einzige See ist (Abb. 25), in welchem die höchsten Werte in der Nähe der Seeoberfläche liegen. Die Frage, über welchen Zeitraum diese besondere Eigenschaft des Königssees erhalten bleibt, beantwortet die Abb. 26, in welcher die Isoplethen des relativen thermischen Widerstandes eingetragen sind. Es ergibt sich, daß die besonders hohen Werte von über 20 Einheiten im Juni entstehen und in den folgenden Monaten innerhalb einer Wasserschicht zwischen 0–6 m verbleiben. Die Tendenz einer allmählichen Tiefenverlagerung ist unverkennbar. Dieses im Königssee aber nur ange-

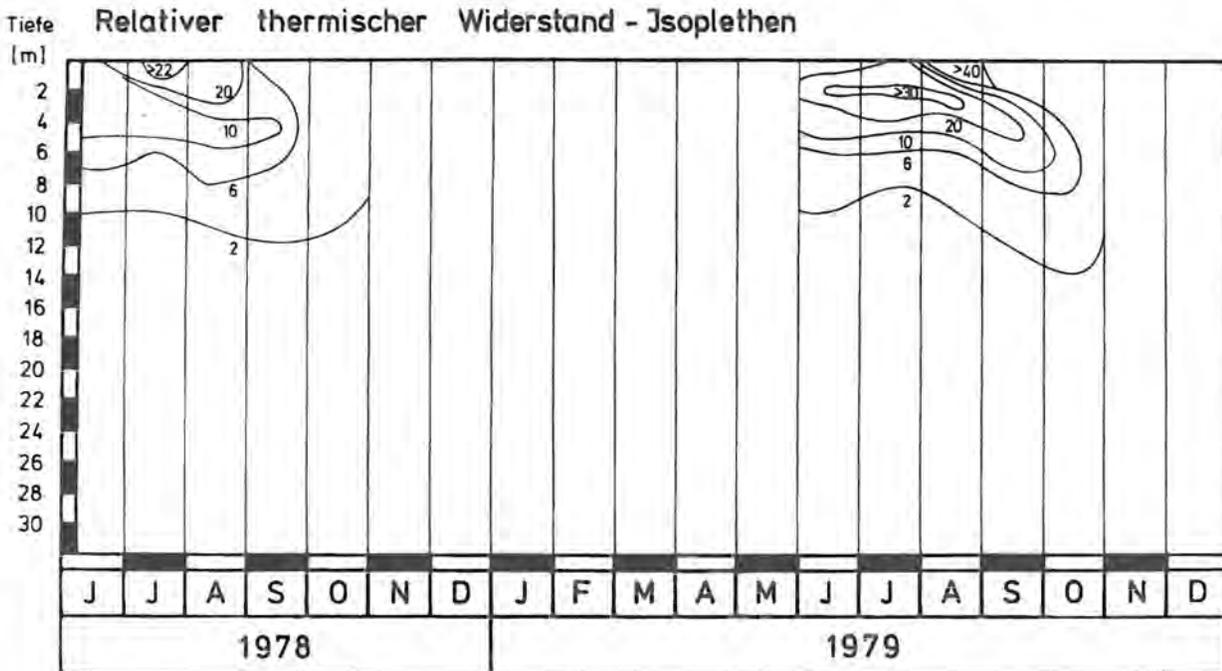


Abb. 26: Isoplethen des relativen thermischen Widerstandes im Königssee. Man beachte, daß eine allmähliche Verlagerung in die Tiefe nur angedeutet ist.

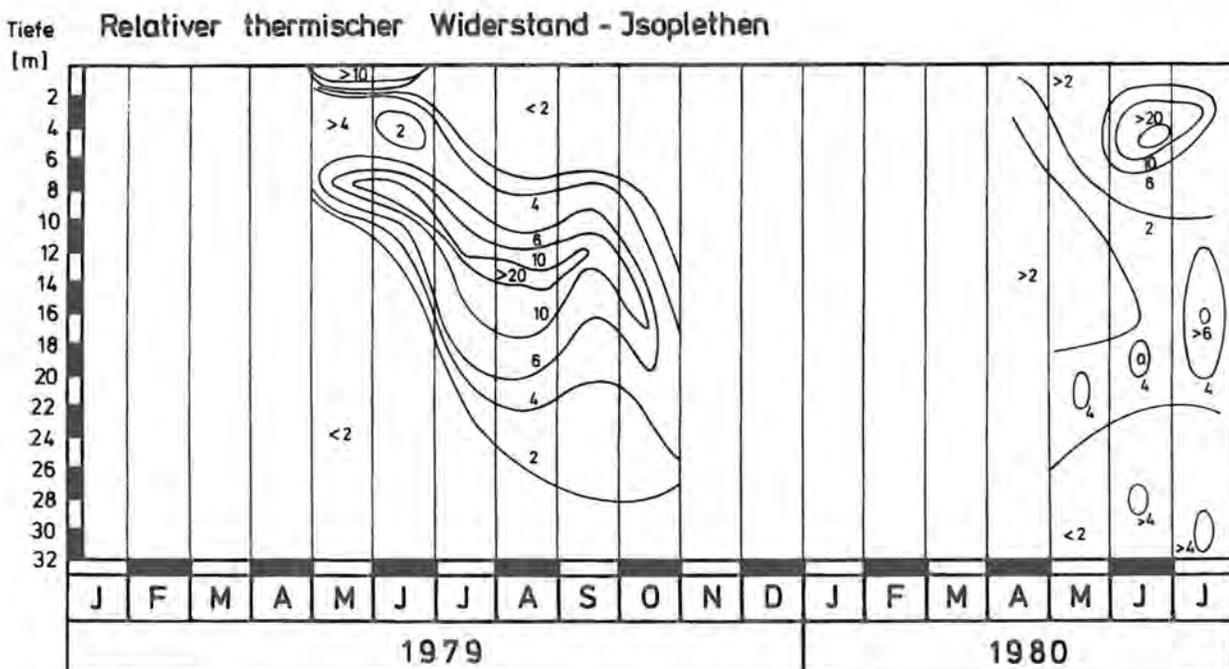


Abb. 27: Isoplethen des relativen thermischen Widerstandes im Bodensee. Man beachte die Tiefenverlagerung der Isoplethen (nach Angaben von Dr. U. Einsle, Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg, gezeichnet).

deutete Phänomen ist in anderen Seen durch das Anwachsen der epilimnischen Schicht meist sehr auffällig. Das wird am Beispiel des Bodensees (Abb. 27) gezeigt. Hier wandert das Maximum des relativen thermischen Widerstandes (> 20) zwischen Mai und August von ca. 7 m auf ca. 14 m Tiefe.

Die für den Königssee typische hohe Lage der Sprungschicht kann auf eine im Vergleich zu den anderen genannten Seen geringe Windtätigkeit zurückgeführt werden. Nydegger (1957) fand eine gute Korrelation zwischen der 7°C -Tiefenposition (die in Seen unserer geographischen Breite in der Regel in die Sprungschicht fällt) und der 3,5ten Wurzel aus dem Seeareal. Es ist einleuchtend, daß durch gleiche Windstärken in Seen mit verschieden großem Seeareal ungleiche Wirkungen ausgehen. Je größer das Seeareal, desto größer die Angriffsfläche für den Wind, desto größer die Wasserschicht, die durchmischt wird und desto tiefer die Lage der Sprungschicht. Diese Beziehung zwischen Seeoberfläche und Lage der Maximalwerte des relativen thermischen Widerstandes kommt auch in Abb. 25 zum Ausdruck, in welcher die Seeareale durch maßstäblich vergleichbare Quadrate dargestellt sind.

Die Fläche des Königssees ist aber ca. um den Faktor 6 größer als die Fläche des Hartsees, und dennoch liegt seine Sprungschicht höher. Dieser Sachverhalt dürfte im wesentlichen wohl darauf zurückgeführt werden, daß der Königssee durch die hohen umliegenden Gebirgszüge besonders windgeschützt ist, wobei vor allem Windrichtungen, die mit der Längsachse des

Sees zusammenfallen, eine untergeordnete Rolle spielen.

Die Stabilität der thermischen Schichtung eines Sees kann als Arbeit aufgefaßt werden, die vom Wind bis zur völligen Wasserdurchmischung aufgebracht werden muß. Diese Arbeit läßt sich berechnen. Besonders anschaulich ist in diesem Zusammenhang folgende Vorstellung: Der Schwerpunkt des thermisch geschichteten Sees liegt in größerer Tiefe als der Schwerpunkt des völlig durchmischten (= homothermen) Sees. Die vom Wind aufzubringende Durchmischungsarbeit entspricht somit formal jener Arbeit, die notwendig ist, um den Schwerpunkt des geschichteten Sees auf das Niveau des Schwerpunktes im ungeschichteten Zustand zu heben.

In Anwendung eines Berechnungsverfahrens, das von Idso (1973) ausgearbeitet worden ist, wurde die Stabilität der thermischen Schichtung des Königssees und des Chiemsees berechnet. Dabei wurde eine hochsommerliche Situation ausgewählt (Königssee: 13. 9. 1979, Chiemsee: 22. 8. 1979), womit gewährleistet ist, daß in beiden Seen jeweils besonders hohe Stabilitäten vorliegen. Für den Chiemsee ergibt sich eine Stabilität von $2139,7 \text{ g} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2$, für den Königssee eine Stabilität von $1703,4 \text{ g} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2$. Dieser Unterschied kommt weniger durch die Dichtedifferenzen zwischen den unterschiedlich temperierten Wasserschichten zustande, als vielmehr durch die unterschiedliche Lage der Sprungschicht. Das Ergebnis besagt, daß zur Aufhebung der Sprungschicht im Königssee ein wesentlich geringerer

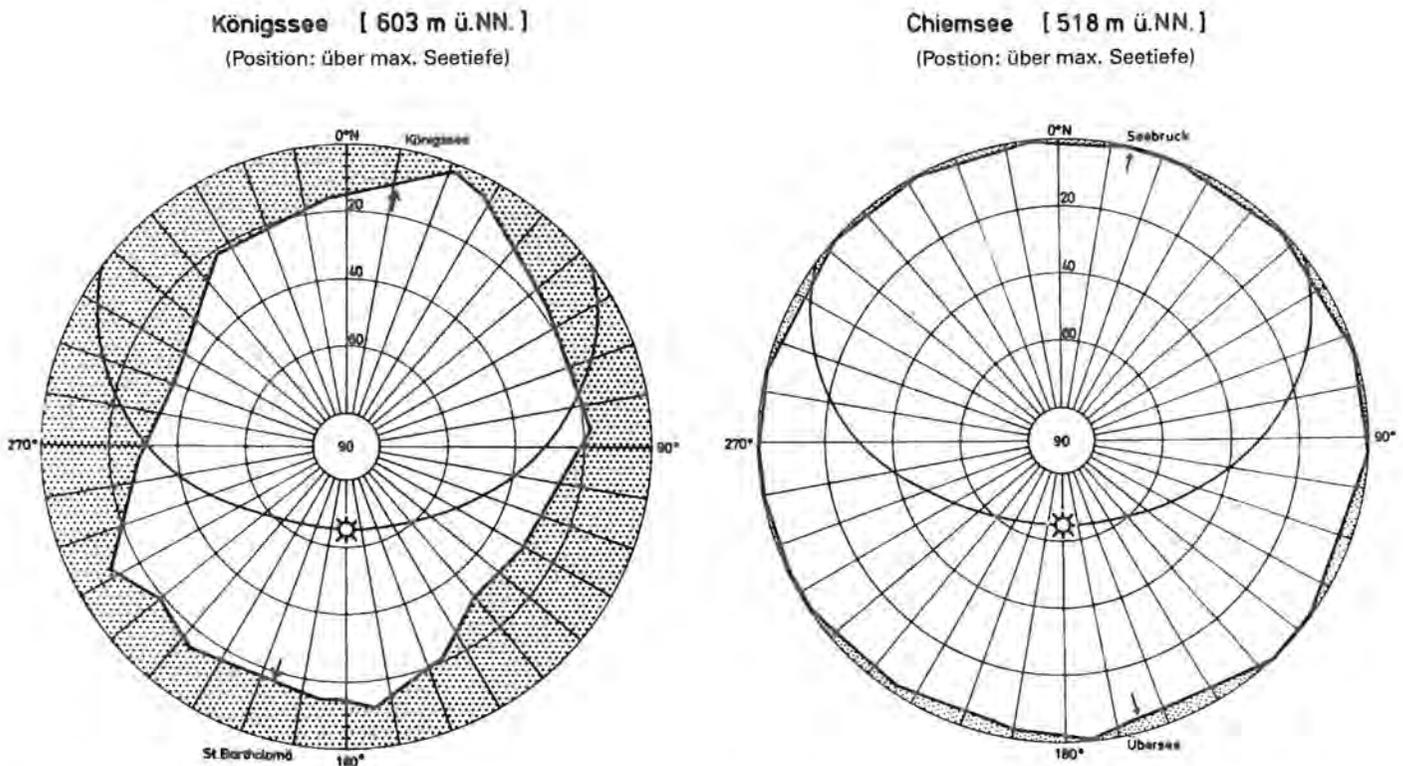


Abb. 28: Einfluß der Horizontabschirmung auf die Sonnenscheindauer, dargestellt für den 15. Juni und gültig für einen Punkt, der etwa in Seemitte liegt. Durch die Horizontabschirmung verringert sich die Sonnenscheindauer am Königssee gegenüber dem Chiemsee um ca. fünf Stunden.

Arbeitsaufwand erforderlich ist als im Chiemsee. So ist es auch nicht verwunderlich, daß zumindest die oberen Bereiche der Sprungschicht nach relativ kurzer Windtätigkeit durchmischt werden können. Da Windstille vorherrscht, wird sie bei hinreichender Einstrahlung jedoch schnell wieder aufgebaut.

Im Rückblick auf die Ergebnisse in den Abschnitten 5.3.2.2 bis 5.3.2.6 ergibt sich zusammenfassend somit folgendes:

- 1) Die Jahreswärmebilanz des Königssees zeigt einen auffallend niedrigen Wert, der vor allem auf die topographisch bedingte Abschirmung der Globalstrahlung (Abb. 28) und auf die meteorologisch bedingte Reduktion der Einstrahlung durch den im Vergleich zum Voralpengebiet länger anhaltenden Wolkenstau nach Schlechtwetterlagen zurückzuführen ist.
- 2) Die thermische Sprungschicht beginnt im Sommer bereits nahe der Oberfläche, so daß ein Epilimnion meist fehlt.
- 3) Zwischen 75–100 m wird eine Temperaturinversion beobachtet, wobei die Temperatur um 0,2–0,3°C zunimmt, ohne jedoch die konzentrationsbedingte Dichtezunahme aufzuheben.
- 4) Während der jahreszeitlich bedingten Zirkulationsphasen wird die Tiefenschicht ab 130–140 m anscheinend nicht in den Durchmischungsprozeß einbezogen.

5.3.3 Die chemischen Eigenschaften

5.3.3.1 Prinzipielle Vorbemerkungen

5.3.3.1.1 Pflanzennährstoffe, Herkunft und Bedarf

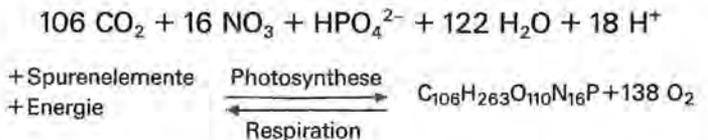
Die im See gelösten und suspendierten Substanzen können auf verschiedenem Wege dorthin gelangt sein. Sie werden z. B. mit dem Regen oder durch den Wind direkt eingeführt. Sie werden vom Regenwasser im Verlauf der Versickerung im Einzugsgebiet aus den Steinen und Böden gelöst und über Zuflüsse zum Gewässer transportiert. Sie können aber auch durch Organismen (z. B. Exkremate von landlebenden Tieren) importiert werden.

Unterschiedlich sind auch die Komponenten des Nährstoffexports: Die Substanzen können z. B. durch windbedingte Wasserzerstäubung in die Atmosphäre geraten und wegtransportiert werden. Normalerweise ist aber nur der Export über den Seeabfluß von Bedeutung. Soweit die betreffenden Substanzen am Seegrund sedimentieren und nicht mehr zum Nährstoffkreislauf im See zurückfinden, kann man sie ebenfalls zum Export rechnen oder als akkumulierenden Vorrat gesondert bezeichnen. Ein Teil dieser Substanzen kann jedoch durch veränderte Bedingungen an der Grenzfläche Sediment–Wasser zu einem späteren Zeitpunkt wieder in den Wasserkörper zurückgelangen („interne Düngung“). Schließlich erfolgt ein Nährstoffexport auch

durch die Entnahme von Wasserorganismen durch landlebende Tiere und durch den Menschen (Fischfang).

Die im Wasser vorhandenen Nährstoffe lassen sich nach Wetzel (1975) zwei Gruppen zuteilen. Zu den sogenannten konservativen Substanzen zählt man diejenigen, die in ihrer Konzentration vom Stoffwechselgeschehen wenig beeinflusst werden. Zu ihnen zählen: Mg, Na, K und Cl. Zu den sogenannten dynamischen Substanzen zählt man jene, deren Konzentration vom Stoffwechselgeschehen sehr erheblich beeinflusst wird. Dazu gehören der Sauerstoff, die anorganischen Kohlenstoffverbindungen (CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-}), die Stickstoffverbindungen (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+), Phosphat, Kieselsäure und – weil zu den anorganischen Kohlenstoffverbindungen in enger Beziehung stehend – das Calcium.

Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphat spielen als Nährstoffe mengenmäßig eine besondere Rolle, wie sich aus der stöchiometrischen Photosynthesegleichung ergibt:



Hinsichtlich der durchschnittlichen Gewichtsanteile im Protoplasma (nicht in etwaigen Skelettsubstanzen!) bilden somit die Elemente C, O, H, N und P die Spitzengruppe.

Ein geringer Anteil im Protoplasma bedeutet selbstverständlich nicht, daß das betreffende Element eine entsprechend geringe Bedeutung hat oder sogar entbehrlich ist. Die stöchiometrische Zusammensetzung des Protoplasmas besagt lediglich, daß das gegebene Verhältnis der genannten Substanzen Bedingung ist. Das heißt u. a., daß das jeweils im Minimum vorhandene Element die Menge des aufzubauenden Protoplasmas regelt. Insofern führt die stöchiometrische Formulierung in der Photosynthesegleichung zu dem im Jahre 1840 von Justus Liebig formulierten Gesetz vom Minimum, auf dessen Einschränkungen einzugehen hier kein Anlaß besteht.

Vergleicht man den relativen Anteil der verschiedenen Elemente, die zum Wachstum benötigt werden, in bezug auf ihren relativen Anteil im Wasser, so läßt sich aus dem Verhältnis beider Größen abschätzen, welche Anreicherung erforderlich ist, um den bekannten Anteil im Gewebe zu erreichen (Tabelle 14). Wir sehen, daß C, Si, N, ganz besonders aber P in diesem Zusammenhang eine besondere Stellung erhalten (Vallentyne 1974).

Der im Vergleich zum Angebot enorme P-Bedarf zeigt, daß dem Phosphat im allgemeinen die Rolle des wachstumsbegrenzenden Faktors zukommt. Daraus ergibt sich u. a. auch seine besondere Rolle bei der Eutrophierung unserer Gewässer.

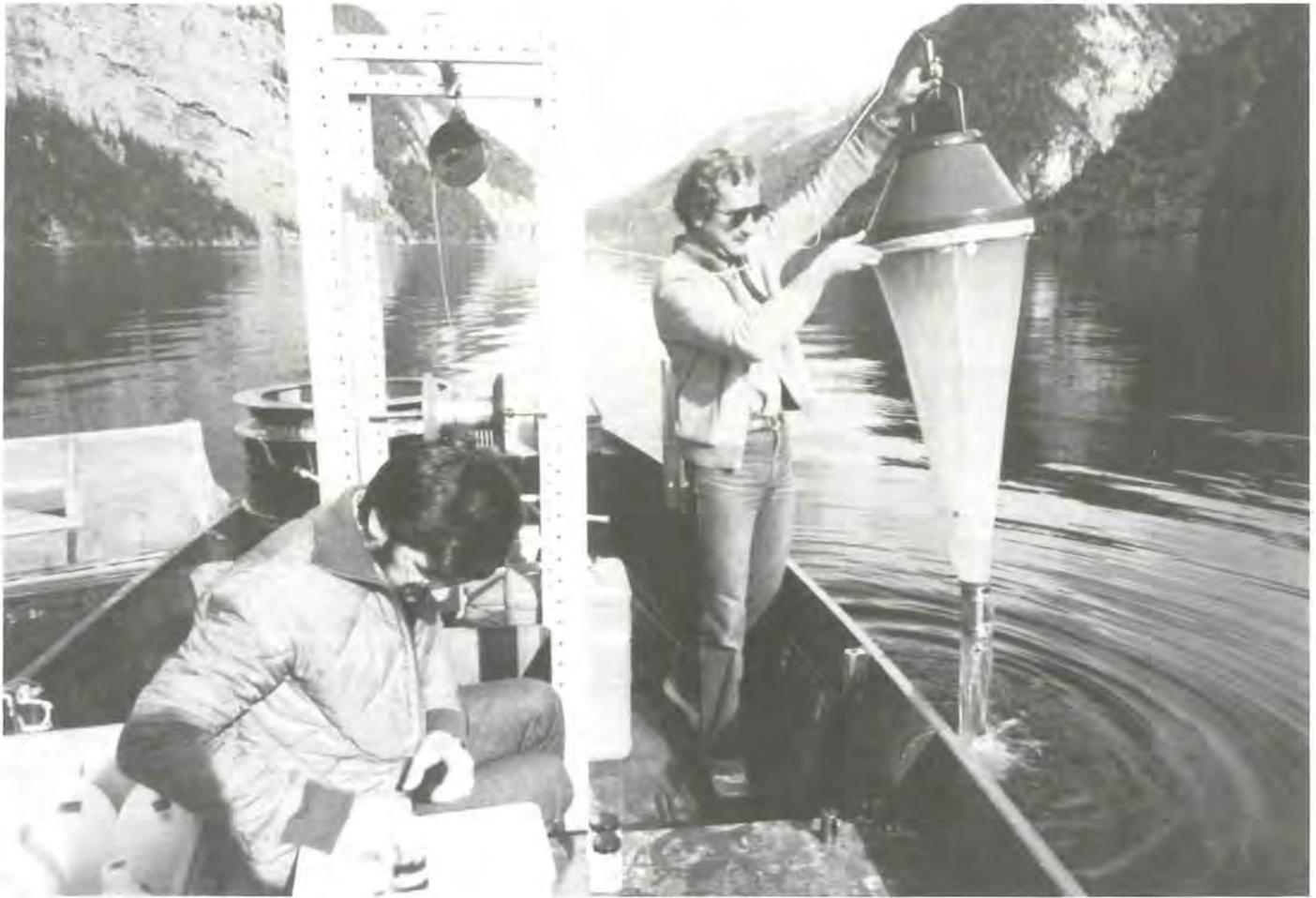


Tabelle 14 Prozentualer Anteil der für das Wachstum von Wasserpflanzen wichtigen Elemente im Gewebe (a) bzw. in Fließgewässern (b) (weltweite Durchschnittsdaten) und deren Verhältnis (c) als Maß für die erfolgte Anreicherung (nach Vallentyne 1974).

Element	Anteil im Pflanzengewebe (%) = a	Anteil im Wasser (%) = b	$\frac{a}{b} = c$
Sauerstoff	80,5	89	~ 1
Wasserstoff	9,7	11	~ 1
Kohlenstoff	6,5	0,0012	~ 5000
Silicium	1,3	0,00065	~ 2000
Stickstoff	0,7	0,000023	~ 30000
Calcium	0,4	0,0015	< 1000
Natrium	0,3	0,00023	~ 1300
Phosphor	0,08	0,000001	~ 80000
Magnesium	0,07	0,0004	< 1000
Schwefel	0,06	0,0004	< 1000
Chlorid	0,06	0,0008	< 1000
Kalium	0,04	0,0006	< 1000
Eisen	0,02	0,00007	< 1000
Bor	0,001	0,00001	< 1000
Mangan	0,0007	0,0000015	< 1000
Zink	0,0003	0,000001	< 1000
Kupfer	0,0001	0,000001	< 1000
Molybdän	0,00005	0,0000003	< 1000
Cobalt	0,000002	0,000000005	< 1000

5.3.3.1.2 Chemische Schichtungen in Abhängigkeit vom Trophiegrad

Aus einer ersten Annäherung an die Beziehung zwischen Nährstoffangebot und Organismendichte folgt: je höher die Nährstoffkonzentration, desto höher die Organismendichte. Nährstoffarme (oligotrophe) Seen besitzen somit eine geringere Individuendichte als nährstoffreiche (eutrophe) Seen. Die Folgen des photoautotrophen, lithoautotrophen und des heterotrophen Stoffwechsels für den Chemismus des Sees werden mit wachsender Individuendichte daher immer auffälliger. Das gilt in zeitlicher wie in räumlicher Hinsicht. Was die zum gleichen Zeitpunkt in verschiedener Tiefe bestehenden Unterschiede betrifft, so muß eine für tiefere Gewässer typische Eigenschaft gerade in diesem Zusammenhang besonders herausgestellt werden: die Gliederung des Wasserkörpers in eine trophogene und tropholytische Zone, die sich m. E. durch antagonistische Stoffwechselprozesse (vorherrschend Aufbau organischer Substanz in der trophogenen Zone und fast nur Abbau organischer Substanz in der tropholytischen Zone) auszeichnen und dementsprechend unterschiedliche Eigenschaften annehmen.

Diese Vorgänge erhalten ihr besonderes Gewicht, weil es während der Stagnationsphasen im See keine durchgreifende vertikale Wasserzirkulation gibt und somit auch keinen Ausgleich der entstandenen chemischen Unterschiede. Innerhalb des Lebensraumes See gibt es somit zwei grundsätzlich verschiedene Bereiche, die übereinander angeordnet sind.

Durch diese besondere Eigenschaft unterscheiden sich hinreichend tiefe Gewässer von allen übrigen aquatischen und sämtlichen terrestrischen Lebensräumen (Abb. 29).

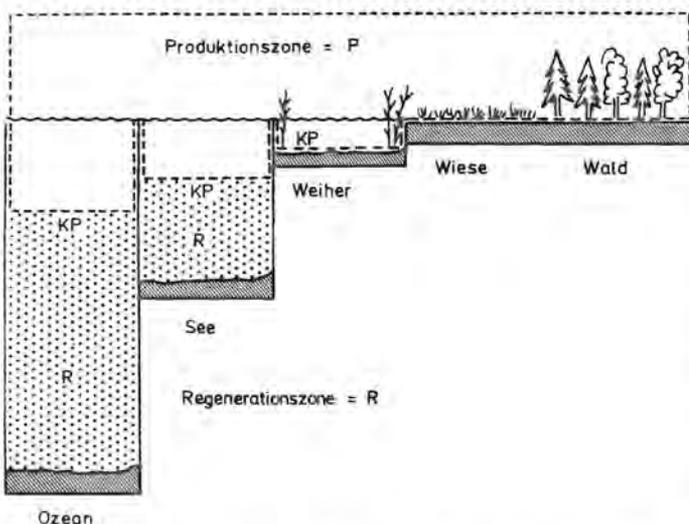


Abb. 29: In terrestrischen und flachen aquatischen Biotopen endet die photoautotrophe Produktionszone an der Grenze Luft- bzw. Wasser-Substrat (Boden bzw. Gewässergrund). In tiefen aquatischen Biotopen endet die photoautotrophe Produktionszone (= trophogene Zone) bereits innerhalb des Mediums Wasser. Mit dieser Eigenschaft unterscheiden sich hinreichend tiefe aquatische Biotop von allen übrigen Biotopen der Biosphäre. KP = Kompensationsebene: Photosynthese und Respiration kompensieren ihre antagonistischen Wirkungen.

Während der Stagnationsphase müssen sich oligotrophe und eutrophe Seen daher besonders stark voneinander unterscheiden. Das wird in Abbildung 30 anhand der folgenden Nährstoffkomponenten gezeigt: anorganische Kohlenstoffverbindungen (ΣCO_2), pH, O_2 , NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} und SiO_2 .

Im oligotrophen See sind die chemischen Unterschiede in Abhängigkeit von der Tiefe infolge der geringen Individuendichte der Organismen verhältnismäßig gering. Der Antagonismus zwischen trophogener und tropholytischer Zone kommt somit kaum zum Tragen, obgleich die beiden Wasserkörper – wie in allen Teilabbildungen angedeutet – während der Stagnationsphase durch die thermische Sprungschicht voneinander getrennt sind.

Von den für oligotrophe Seen charakteristischen Eigenschaften führen alle denkbaren Übergänge zum eutrophen See. In diesem Seetyp gibt es dann besonders große Unterschiede zwischen der trophogenen und der tropholytischen Zone. In der trophogenen Zone macht sich die hohe Primärproduktion durch ein Ansteigen der Sauerstoffkonzentration bzw. durch eine Abnahme der anorganischen Kohlenstoffverbindungen bemerkbar, wobei CO_2 -Verminderung zu einem Anstieg des pH-Wertes führt. Das beim Abbau organischer Substanz freigesetzte Ammonium wird in der trophogenen Zone vor allem durch heterotrophe Bakterien (vgl. Gode und Overbeck 1972) zu Nitrat oxidiert, so daß dessen Konzentration zunimmt. In der Tiefe des sauerstoffarmen bis sauerstofffreien Milieus kommt es hingegen zu einer Anreicherung des Ammoniums. In der Tiefe nehmen aber auch die P- und Si-Komponenten zu, weil sie beim Abbau der absinkenden und abgesunkenen organischen Substanz frei werden. Unter anaeroben Bedingungen wird Sulfat reduziert, sodaß es zugunsten von Schwefelwasserstoff abnimmt.

Diese Beispiele mögen genügen, um zu zeigen, daß das vertikale Verteilungsbild der am Stoffwechselgeschehen beteiligten Substanzen für den Zustand des Sees von außerordentlicher Bedeutung ist.

5.3.3.2 Salinität und Ionenzusammensetzung

Aus den Mittelwerten der vorherrschenden Ionen ergibt sich für den Königssee ein Gesamtsalzgehalt von ca. 156 mg/l. Die Kationen dominieren in der Reihenfolge $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Na}$; die Anionen in der Reihenfolge $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$. Das durchschnittliche Äquivalenzverhältnis von Ca/Mg beträgt 9:1 und ist somit gegenüber dem im allgemeinen für Calciumkarbonatgewässer angegebenen mittleren Verhältnis von 4:1 erheblich zugunsten des Calciumanteils verschoben. Dieser Unterschied dürfte auf das Vorherrschen von Dachsteinkalk im Einzugsgebiet des Königssees zurückzuführen sein, insbesondere im süd-südöstlichen Teil, aus welchem der Hauptanteil der Zuflüsse stammt. Die Calcium- bzw. Magnesiumkonzentrationen sind im Vergleich zu den anderen Seen (Tabelle 15) niedriger und infolgedessen auch die Härte. Sie liegt im Königssee zwischen 4,3–6,1° dH (= 1,5–2,2 mval/l) und ordnet ihn

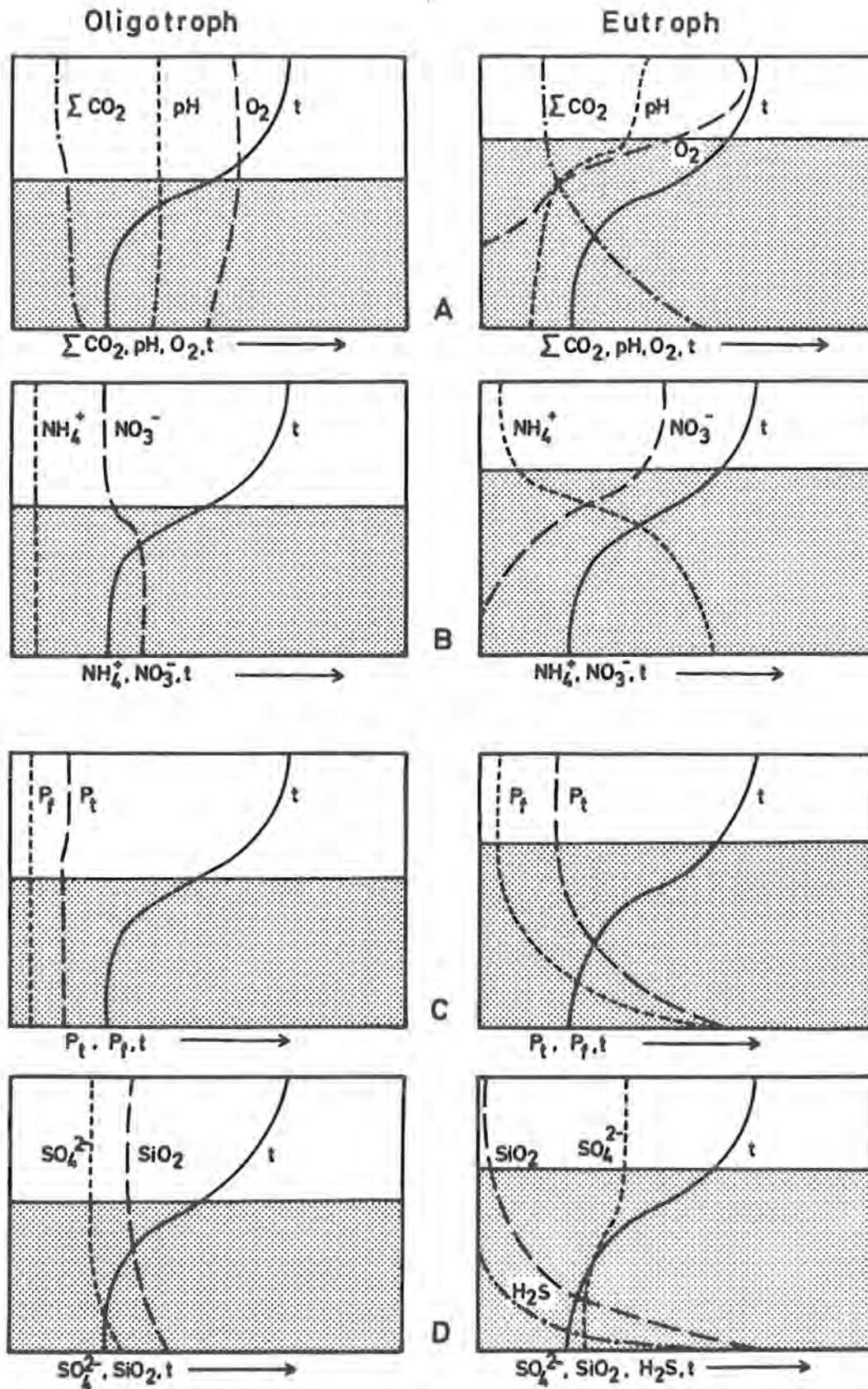


Abb. 30: Vertikalverteilung einiger chemischer Größen z. Zt. der sommerlichen Temperaturschichtung (t = Temperaturverlauf) in der trophogenen (hell) und tropholytischen Zone (punktiert) zur Charakterisierung oligotropher bzw. eutropher Seen (P_f = lösliches, P_t = Gesamtphosphat (nach Wetzel 1975, verändert)).

Tabelle 15

Salinität und Ionenzusammensetzung (nach versch. Autoren zusammengestellt)

See	Kationen												
	Ca ²⁺			Mg ²⁺			Na ⁺			K ⁺			
	mg/l	mval/l	mval %	mg/l	mval/l	mval %	mg/l	mval/l	mval %	mg/l	mval/l	mval %	
Münchner Regenwasser*)	3,5	0,17	17,35	1,0	0,08	8,16	0,5	0,02	2,04	0,8	0,02	2,04	
Bodensee	48,09	2,40	36,14	8,63	0,71	10,69	4,2	0,18	2,71	1,3	0,03	0,45	
Königssee	33,89	1,69	42,82	3,64	0,29	7,35	0,1	0,004	0,10	0,1	0,003	0,08	
Lago di Garda	32,24	1,61	32,53	8,46	0,69	13,94	3,01	0,13	2,63	0,98	0,03	0,49	
Lago d'Iseo	44,85	2,24	36,96	8,52	0,70	11,55	2,16	0,09	1,49	1,21	0,03	0,49	
Lago di Como	26,29	1,31	34,56	5,70	0,47	12,40	2,44	0,11	2,90	1,17	0,03	0,79	
Lago Lugano	37,27	1,86	33,39	9,44	0,78	14,00	2,37	0,10	1,79	1,33	0,03	0,54	
Lago Maggiore	22,12	1,10	36,07	3,83	0,32	10,49	2,14	0,09	2,95	1,41	0,04	1,31	
See	Anionen												
	HCO ₃ ⁻			SO ₄ ²⁻			Cl ⁻			NO ₃ ⁻			Salinität
	mg/l	mval/l	mval %	mg/l	mval/l	mval %	mg/l	mval/l	mval %	mg/l	mval/l	mval %	mg/l
Münchner Regenwasser	18	0,29	29,59	9,5	0,19	19,39	0,9	0,03	3,06	2,5	0,04	4,08	39,3
Bodensee	148,89	2,44	36,75	34,4	0,72	10,84	5,45	0,15	2,26	0,88	0,01	0,15	251,84
Königssee	113,0	1,85	46,87	4,62	0,09	2,28	0,43	0,01	0,25	0,47	0,01	0,25	156,25
Lago di Garda	128,75	2,11	42,63	10,90	0,23	4,65	4,75	0,13	2,63	1,49	0,02	0,40	190,58
Lago d'Iseo	114,84	1,88	31,02	46,97	0,98	16,17	3,16	0,09	1,49	2,98	0,05	0,83	224,69
Lago di Como	75,73	1,24	32,72	24,88	0,52	13,72	2,16	0,06	1,58	3,22	0,05	1,32	141,59
Lago Lugano	148,22	2,43	43,63	12,58	0,26	4,67	3,16	0,09	1,62	1,05	0,02	0,36	215,42
Lago Maggiore	47,84	0,78	25,57	28,72	0,59	19,34	2,30	0,07	2,29	3,41	0,06	1,97	111,77

*) NH₄⁺ 2,6 mg/l 0,14 mval/l 14,29 mval %

Tabelle 16

Chemische Meßdaten I

Meßgrößen	1) Regenwasser München	1) Grundwasser Harlaching VII	1) Leitungswasser München	Königssee	Fasanerisee	2) Kochelsee	2) Walchensee
Gesamthärte mval/l				1,5–2,2		3,2–3,5	2,5–2,8
Leitfähigkeit $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$				117–174		180–255	185–215
pH	5,6	7,6	7,5	7,3–8,5		6,6–8,6	
Alkalinität mval/l				1,4–2,1		2,8–3,4	2,4–2,8
Ca ²⁺ mg/l	3,5	92,0	83,9	25–36,5	91,7		40–48
Mg ²⁺ mg/l	1,0	19,5	22	1,9–6,9	21,2		10,5–11,5
Na ⁺ mg/l	0,5	16	2,45	0,04–0,22	16,2		ca. 0,8
K ⁺ mg/l	0,8	1,5	1,5	0,10–0,12	4,9		0,1–0,16
Fe _{ges.} mg/l						< 0,01–0,2	10–80
sCO ₂ mg/l	18,0	298	328,7	58–90			105,6–127,6
NO ₃ -N mg/l	2,5	22	5,1	0,3–0,6	4,7	2–10	0,3–0,54
NO ₂ -N mg/l				< 0,02			0–0,005
NH ₄ -N mg/l	2,6	< 0,01	< 0,01	< 0,02	n. n.		0–0,016
SiO ₂ mg/l				0,2–5,3		0,1–2,3	< 0,03–2,1
PO ₄ -P _{total} $\mu\text{g/l}$				1–11	38	20 – < 400	8–60
PO ₄ -P _{ortho} $\mu\text{g/l}$				n. n. – (2,0)*	< 1–20	n. n. – < 400	0–45
Cl ⁻ mg/l	0,9	30	6,11	0,1–0,7	25,6	0,2–2,1	1,1–1,4
SO ₄ ²⁻ mg/l	9,5	47	18,8	2,0–6,5	43,5	10–20	13–15

1) Dr. Frimmel, persönliche Mitteilung

2) Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft bzw. Dr. Steinberg, persönliche Mitteilung

3) Dr. Hamm, persönliche Mitteilung

*) 2,0 nur am Grund, St. Bartholomä und Sallet bis 7 $\mu\text{g/l}$

Tabelle 17

Chemische Meßdaten II

Meßgrößen	4) Tegernsee- ausfluß	2) Ammersee	5) Bodensee- Obersee	6) Attersee	2) Starnberger See	2) Großer Alpsee
Gesamthärte mval/l	3,5–3,9	3,9–4,2			2,8–3,2	2,6–4,2
Leitfähigkeit κ_{20} $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	288–320	275–430	242–313	206–251	190–270	227–266
pH	7,82–8,56	7,4–8,8	6,4–8,9	7,4–8,3	7,5–8,9	
Alkalinität mval/l		2,8–4,2	2,0–2,58	2,2–2,62	2,4–2,8	
Ca ²⁺ mg/l		47–62	41,1–50	30,9–37,3	35–50	35–65
Mg ²⁺ mg/l		ca. 16	6,1–9,7			9,3–16,5
Na ⁺ mg/l		3,3–4,2	3,3–4,6			
K ⁺ mg/l	0,4–0,6	ca. 1,6	1,1–1,5			
Fe _{ges.} mg/l			0,001–0,07		0,01–0,067	
Σ CO ₂ mg/l		123,2–198,0			105,6–132,0	
NO ₃ -N mg/l	0,5–0,61	< 0,17–1,03	0,1–1,3	0,3–0,6	0,01–0,53	0,05–0,5
NO ₂ -N mg/l		n.n.–0,06	< 0,001–0,043	n.n.–0,0127	n.n.–0,008	n.n.–0,04
NH ₄ -N mg/l		n.n.–0,28	< 0,01–0,22	n.n.–0,185	0,001–0,07	0,02–1,3
SiO ₂ mg/l		0,14–5,0	0,2–5,0	0,2–1,2	0,1–5,4	0,5–5,0
PO ₄ -P _{total} $\mu\text{g/l}$		< 10–200	22–123	4,5–12,5	7–125	1–380
PO ₄ -P _{ortho} $\mu\text{g/l}$		n.n.–175	< 110	n.n.–2,0	n.n.–72	n.n.–30
Cl ⁻ mg/l	2,5–3,9	ca. 9,0	3,6–5,2	1,6–2,4	5,1–8,6	4–5
SO ₄ ²⁻ mg/l		19–24	31–35			n.n.–9,6

4) Dr. Alexander, Städtische Wasserwerke München, persönliche Mitteilung

5) Internationale Gewässerschutzkommission 1978

6) Neuhuber et al. 1980

daher nach den Klut-Olszewski-Härtestufen (vgl. Hölting 1980) den weichen Gewässern zu. Auch im Vergleich zu verschiedenen Seen (Tabelle 16) und Fließgewässern des Voralpenraumes sind die Härtegrade des Königssees niedrig. Dafür bieten sich verschiedene Erklärungsmöglichkeiten an. So könnte die wegen der steilen Zuflüsse zu fordernde kurze Fließzeit durch das Einzugsgebiet Ursache für eine relativ geringe Kalkaufnahme sein. Da in großen Teilen des Einzugsgebietes und auch im Oberlauf der Zuflüsse die Humusdecke verhältnismäßig spärlich ausgebildet ist, wäre es aber auch denkbar, daß das versickernde Regenwasser verhältnismäßig wenig CO_2 aufnimmt. Die Löslichkeit des Kalkes wäre dann entsprechend gering. Schließlich ist zu bedenken, daß eine Kalkausfällung nicht nur unter den veränderten physikalischen Bedingungen während des oberirdischen Zuflusses erfolgt, sondern auch unter dem Einfluß verschiedener Krustenalgen und – was den Zufluß über den Obersee betrifft – durch die biogene Entkalkung durch das Phytoplankton. Der Stellenwert dieser verschiedenen Vorgänge läßt sich ohne spezielle Untersuchungen jedoch nicht abschätzen.

Im Vergleich mit den anderen in Tabelle 16 und 17 aufgeführten Seen sind die Konzentration von Eisen, Natrium, Kalium, Sulfat und Chlorid z. T. ebenfalls niedrig. Sie sind sogar niedriger als die betreffenden Konzentrationen im Münchner Trinkwasser und z. T. sogar niedriger als im Regenwasser aus dem Münchner Raum. Nicht weniger auffällig sind die niedrigen Konzentrationen der von den Pflanzen in verhältnismäßig großer Menge benötigten Pflanzennährstoffe, allen voran die Stickstoffverbindungen und das Phosphat. Eine Ausnahme besteht hinsichtlich des SiO_2 -Gehalts. Er liegt in der Größenordnung der auch in den anderen Seen gefundenen Konzentrationen.

So stellt sich der Königssee anhand des hier durchgeführten Vergleichs als nährstoffarmer See dar, den wir in des Begriffes ursprünglicher Bedeutung daher als oligotrophen See bezeichnen dürfen. In den folgenden Abschnitten wird zu prüfen sein, inwieweit die weiteren chemisch beschreibbaren Kennzeichen der Oligotrophie (vgl. Abb. 30) auf den Königssee zutreffen.

5.3.3.3 Karbonate, Leitfähigkeit und pH

In diesem Abschnitt behandeln wir die am Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht beteiligten Komponenten, soweit sie analytisch erfaßt worden sind: Ca^{2+} , Mg^{2+} , ΣCO_2 und H^+ . Die vorherrschenden Kationen Ca^{2+} (Maximalwerte 36–37 mg/l) und Mg^{2+} (maximal 6–7 mg/l) zeigen in ihrer vertikalen Verteilung eine Jahresrhythmik, die in der trophogenen Zone (0–20 m) im Gegensatz zur tropholytischen Zone – wo sie nur angedeutet ist – klar erkannt werden kann. Diese Jahresrhythmik besteht im Wechsel von Konzentrationen, die im Falle des Calciums zu den größten Unterschieden führt: Während im Winter und im zeitigen Frühjahr zwischen 0–20 m Wassertiefe etwa 36–37 mg/l gemessen werden, sind es im Sommer oft nur noch 25 mg. Im gleichen Zeitraum wird in der Tiefenzone eine geringfügige Konzentrationszunahme beobachtet, die sich jedoch

über ein Vielfaches der Wassersäule erstreckt, die von der trophogenen Zone eingenommen wird.

Für das Magnesium trifft im Prinzip dasselbe zu, nur sind die Konzentrationsunterschiede erheblich geringer. Im Frühjahr findet man im Oberflächenbereich 3–4 mg/l, im Sommer nur noch 1–2 mg/l. Ein entsprechendes Verhalten ergibt sich auch aus den Konzentrationsänderungen der „Gesamtkohlensäure“ ($\Sigma \text{CO}_2 = \text{CO}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) (wobei sich aus der pH-Amplitude von 7,3 – 8,5 ergibt, daß das Hydrogenkarbonat [HCO_3^-] dominiert). Im Winter–Frühjahr liegt die Konzentration der ΣCO_2 an der Oberfläche bei 90 mg/l, im Sommer bei 60 mg/l. Diesem Wechsel entsprechend steigt der pH-Wert im Sommer (an Schönwettertagen) bis auf 8,5, während er in den Wintermonaten niedriger bleibt und im wesentlichen um 7,5 pendelt.

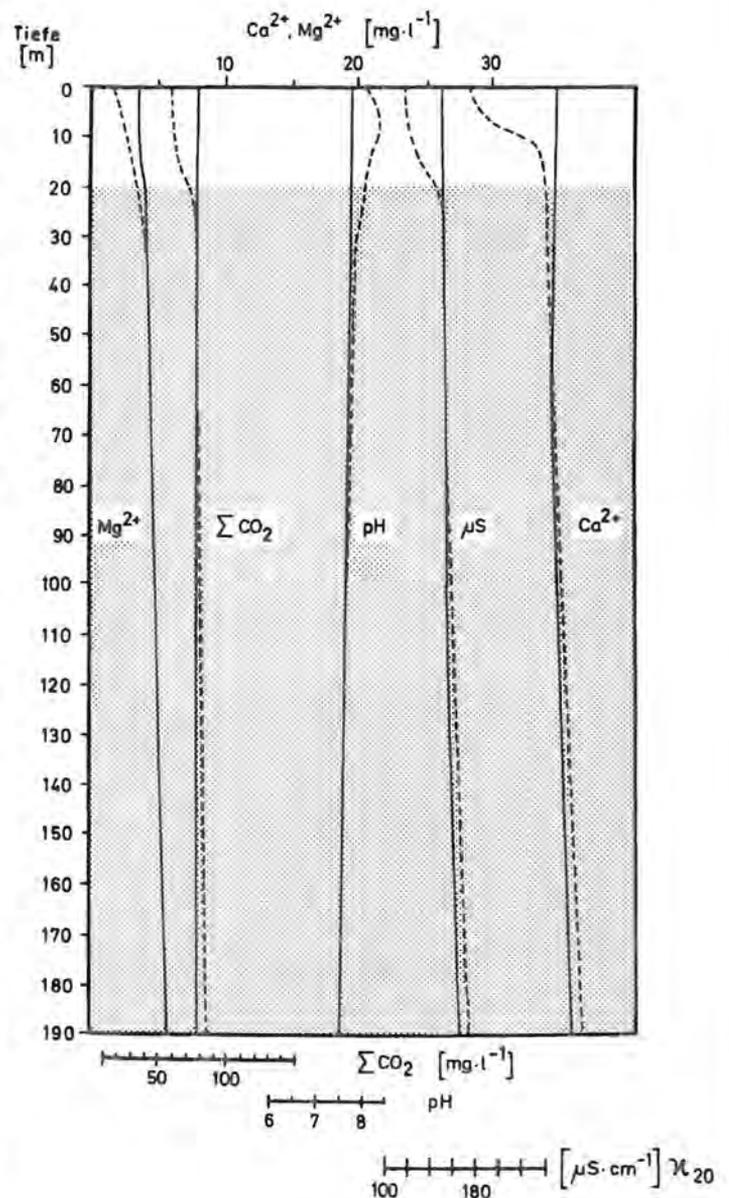


Abb. 31: Vertikale Verteilung der am Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht beteiligten Ionen und der elektrolytischen Leitfähigkeit während der sommerlichen Temperaturschichtung (strichliert) und im Spätherbst–Winter (ausgezogene Linie). Zur Charakterisierung der Sommersituation wurden Verteilungen ausgewählt, die sich extrem von den typischen Verteilungen während des Winters unterscheiden (trophogene Zone weiß, tropholytische Zone punktiert).

Die hiermit aufgezeigten von der Jahreszeit abhängigen Konzentrationsänderungen (Abb. 31) lassen sich auch durch Leitfähigkeitsmessungen nachweisen, da es sich bei den betreffenden Substanzen ausschließlich um Ionen handelt: Während der Winter- und Frühlingsmonate können bis zu $174 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ (μS_{20}) gemessen werden – in den Sommermonaten in den oberflächennahen Schichten nur noch $117 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$. In der Tiefe nimmt die Leitfähigkeit innerhalb einer Wassersäule von ca. 100 m (90 m – Grund) in der gleichen Zeit um einige Einheiten zu.

In diesem jahreszeitlichen Wechsel manifestiert sich innerhalb der trophogenen Zone die Photosyntheseaktivität der Primärproduzenten (Phytoplanktonorganismen). Ihr Einfluß auf den Chemismus des Seewassers ergibt sich aus der Prinzipgleichung der Photosynthese: $6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O} + \text{Energie} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2$. Dem Wasser wird demnach CO_2 entzogen, welches mit den übrigen Komponenten des Kalk-Kohlensäure-Systems in einem vom pH-Wert abhängigen Gleichgewicht steht.

Vereinfachend formuliert ergibt sich aus der CO_2 -Entnahme folgendes: ab pH-Werten über 8,3 steigt die Konzentration des CO_3^{2-} rasch an. Sobald das Löslichkeitsprodukt des CaCO_3 überschritten wird, fällt CaCO_3 aus und sinkt als feinstes Calcit in die Tiefe. Auf diese Weise kommt es zu einer Elektrolytverarmung innerhalb der Wasserschicht, die mit photosynthetisch nutzbarer Strahlung in hinreichender Menge versorgt wird. Die allmählich gegenüber den Winterwerten erfolgende Zunahme des Elektrolytgehalts in der Tiefe muß auf die Lösung des absinkenden CaCO_3 zurückgeführt werden. Sie erfolgt, wenn in der Tiefe freie Kohlensäure vorhanden ist.

Was für das Calcium bzw. für CaCO_3 gilt, trifft im Grundsatz auch für das Magnesium bzw. MgCO_3 zu, jedoch mit dem Unterschied, daß MgCO_3 erheblich leichter löslich ist als CaCO_3 und daher erst bei stärkerer Verschiebung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts in Richtung höherer pH-Werte (nach Wetzel 1975: pH 10) auszufallen beginnt. Derartige hohe pH-Werte werden

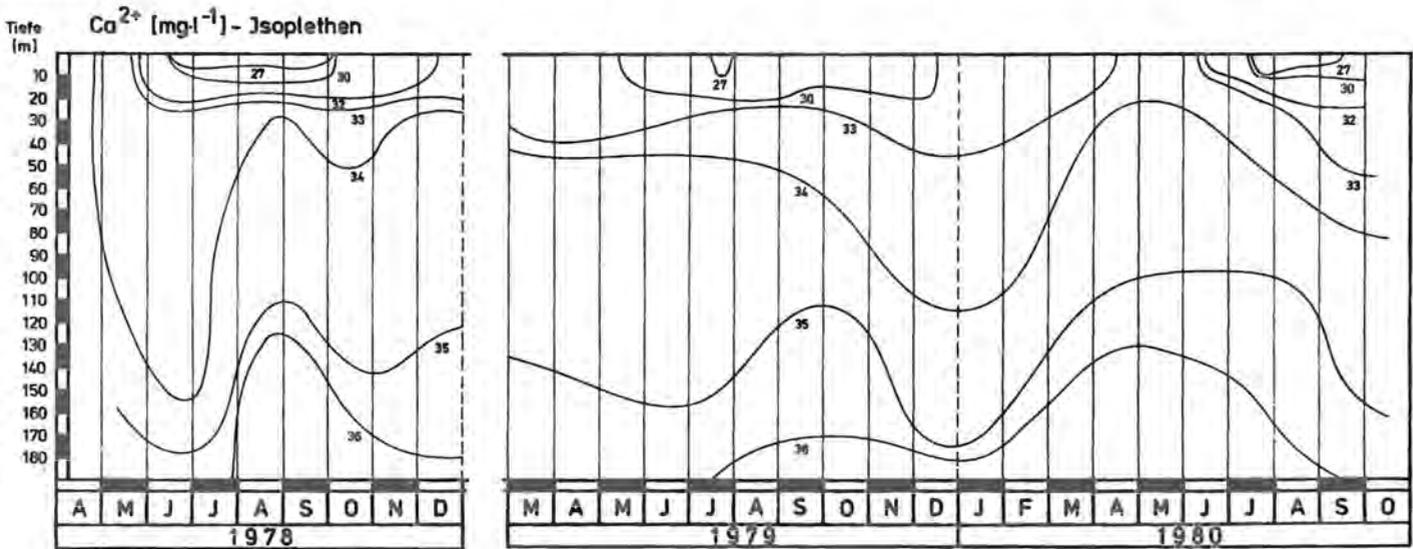


Abb. 32: Calcium-Isoplethen des Königssees. Man beachte, daß die höchsten Calcium-Konzentrationen auch während der Zirkulationsphasen (1979–1980) immer in der Tiefe festzustellen sind.

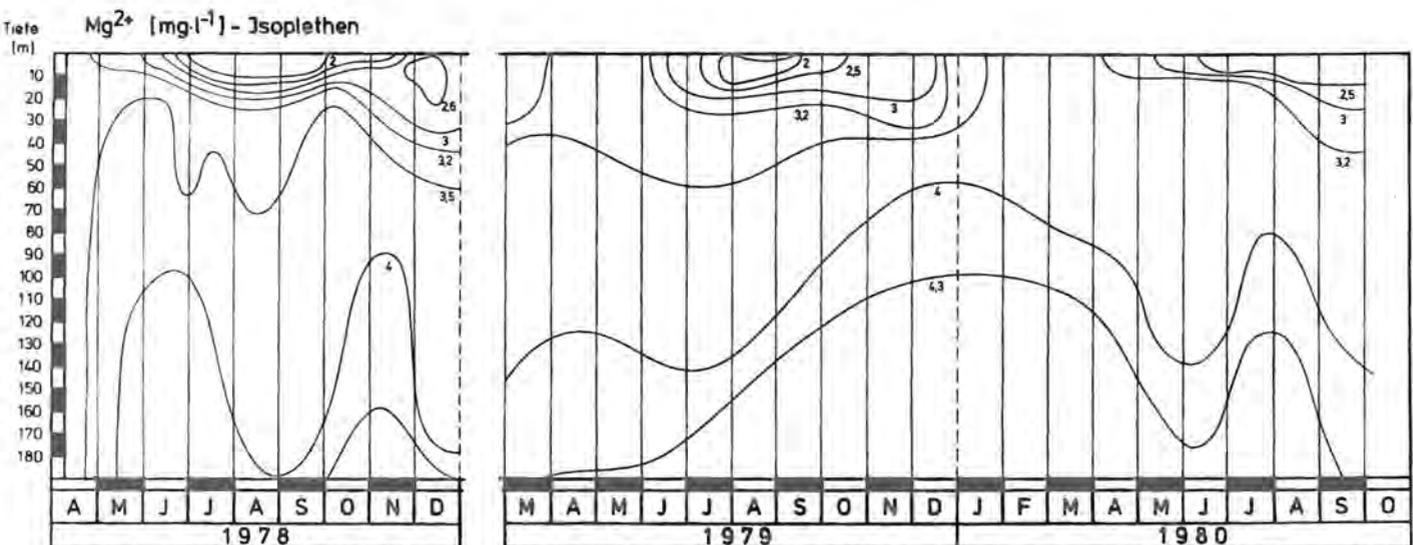


Abb. 33: Magnesium-Isoplethen des Königssees. Man beachte, daß die höchsten Magnesium-Konzentrationen auch während der Zirkulationsphasen (1979–1980) immer in der Tiefe anzutreffen sind.

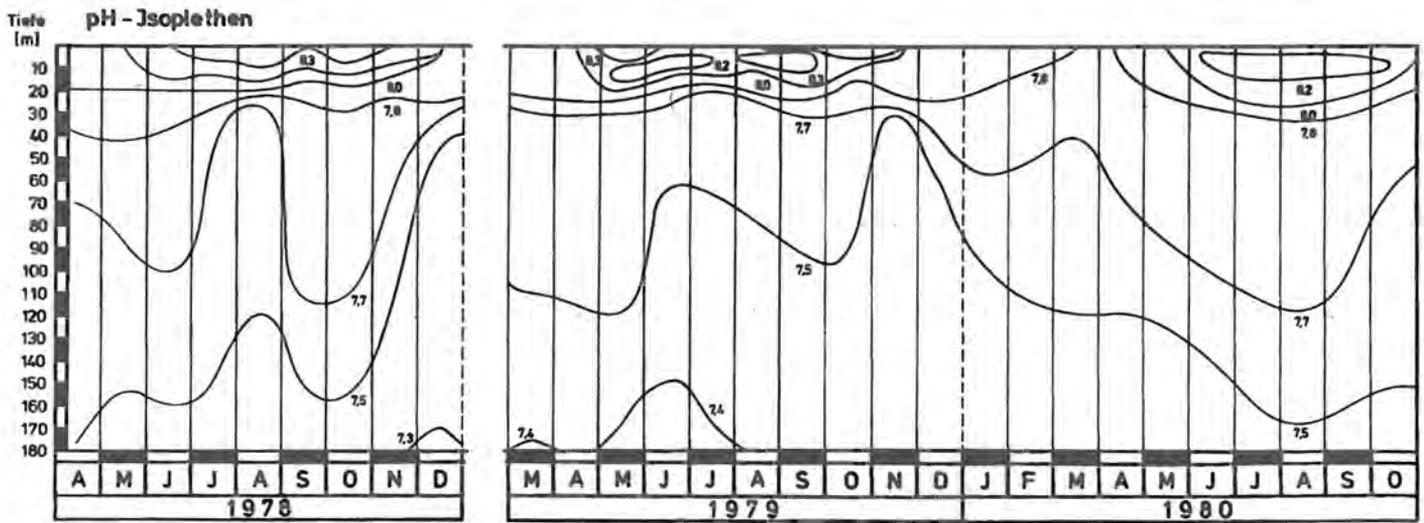


Abb. 34: pH-Isoplethen des Königssees

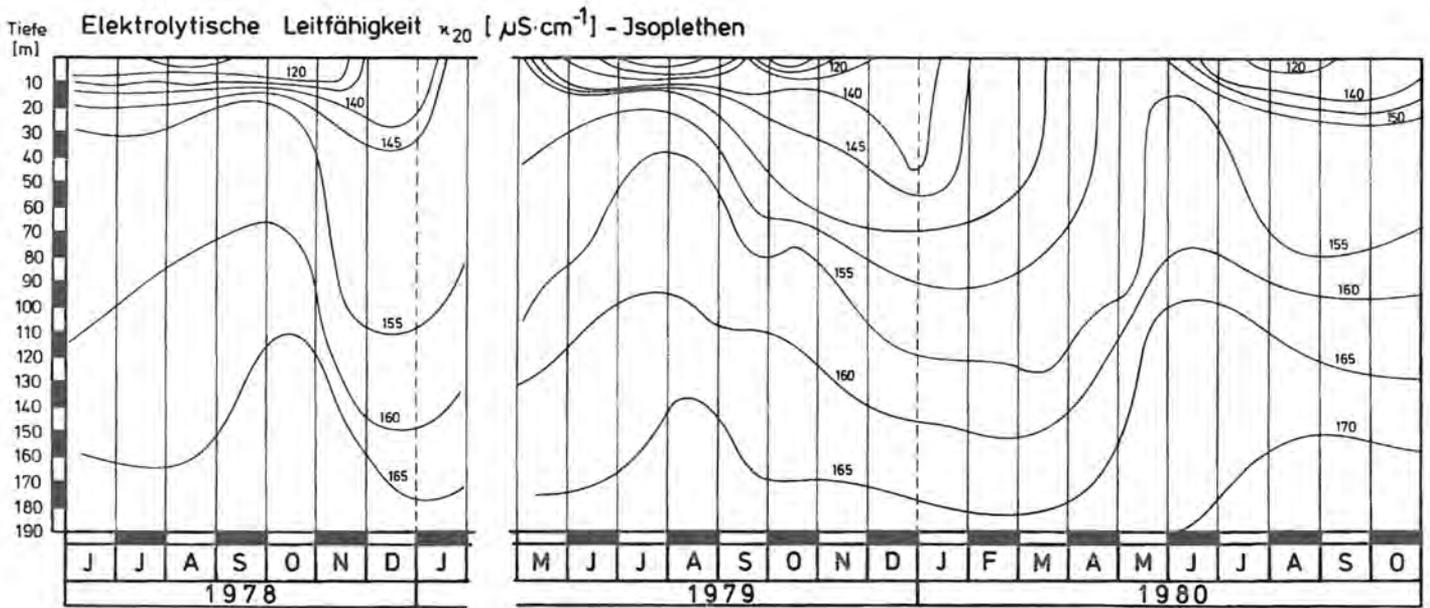


Abb. 35: Elektrolytische Leitfähigkeit Isoplethen des Königssees. Man beachte, daß die höchsten Leitfähigkeitswerte im Zeitraum 1979–1980 auch während der Zirkulationsphasen auf die Tiefe beschränkt sind.

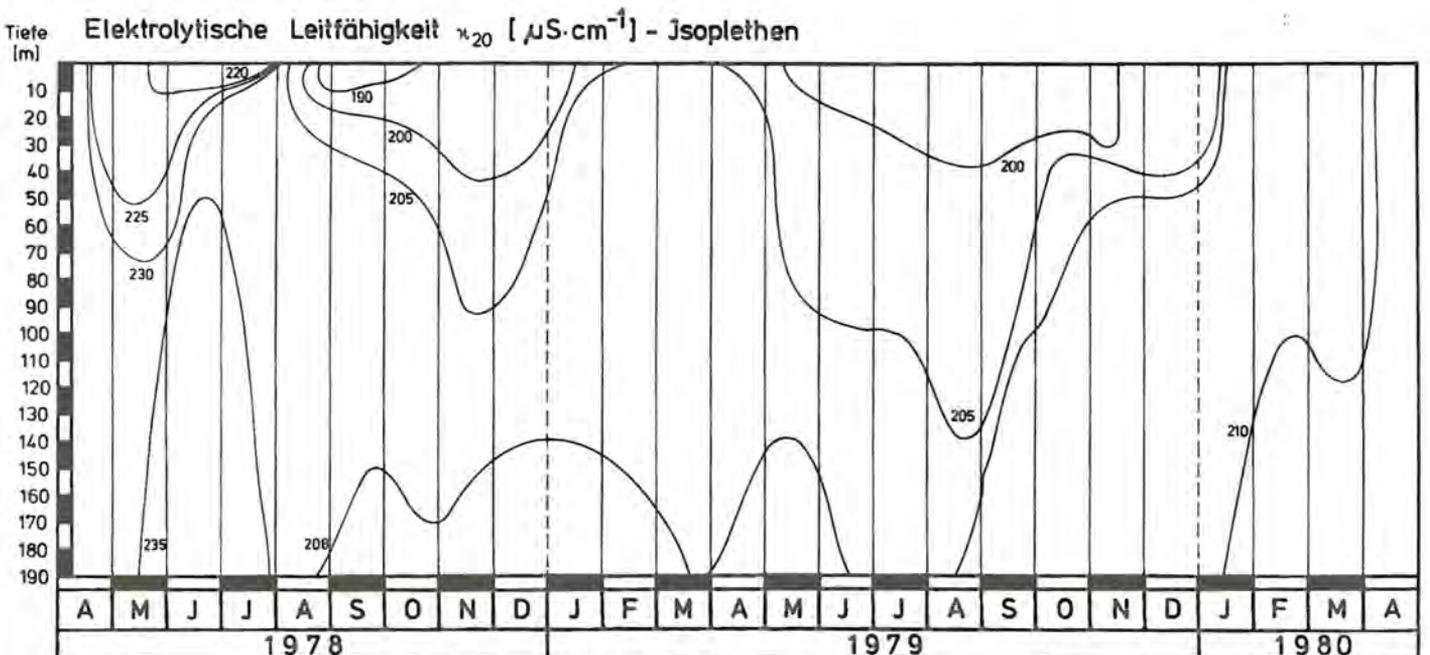


Abb. 36: Elektrolytische Leitfähigkeits-Isoplethen des Walchensees. Man vergleiche das Verhalten der Isoplethen höchster Leitfähigkeit ($208 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ bzw. $210 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) während der Zeit durchgreifender Zirkulation (März 1979, Januar 1980) (nach Angaben von Dr. C. Steinberg, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, gezeichnet).

im Königssee jedoch nicht erreicht. Es ist daher erstaunlich, daß im Falle des Magnesiums eine jahreszeitliche Rhythmik nachweisbar ist.

Die Entwicklung der geschilderten und in Abb. 31 dargestellten jahreszeitlichen Konzentrationsunterschiede kann anhand der Abb. 32, 33 und 34 durch Isoplethendarstellungen verfolgt werden. Wir sehen, daß die jeweiligen Konzentrationsabnahmen in der trophogenen Zone ab Ende Mai bis Anfang Juni nachweisbar sind. Spätestens im Dezember sind die Konzentrationsunterschiede zwischen der Sommer- bzw. Wintersituation dann wieder aufgehoben.

Wichtig ist, daß die höchsten Konzentrationen aller beteiligten Komponenten über das ganze Jahr hinweg in der Tiefe beobachtet werden. Diese Beobachtung unterstützt den Befund, daß in den Zirkulationsmonaten während des Untersuchungszeitraumes 1979–1980 keine Durchmischung bis zum Seegrund stattgefunden hat.

Vergleicht man die Isoplethendarstellung der Leitfähigkeit im Königssee (Abb. 35) mit der eines anderen Sees, z. B. des Walchensees (Abb. 36), so wird deutlich, wie sich das unterschiedliche Zirkulationsverhalten auf die Leitfähigkeit auswirkt.

5.3.3.4 Nitrat

Neben Kohlenstoff und Sauerstoff gehört auch Stickstoff zu den Elementen, die in der organischen Substanz in einem relativ hohen Anteil vertreten sind. Das Gewichtsverhältnis C:N liegt im allgemeinen zwischen 6:1 bis 10:1.

Im Wasser kommt Stickstoff in mehreren Verbindungen vor, als gasförmig gelöstes N_2 , das mit dem riesigen Vorrat an Stickstoff in der Luft (78%) im Gleichgewicht steht, und als Ion in verschiedenen Oxidationsstufen: NH_4^+ , NH_3 , NH_2^- , NO_2^- und NO_3^- . Unter diesen spielen NO_2^- und ganz besonders NH_2^- als Zwischenprodukte eine untergeordnete Rolle. Da die meisten Organismen nicht in der Lage sind, den molekularen Stickstoff zu verwerten, haben sie von dem gewaltigen Stickstoffvorrat in der Luft und im Wasser keinen unmittelbaren Gewinn. Nur gewisse heterotrophe Bakterien und Blaualgen sind in der Lage, auch diese Verbindung aufzunehmen und sie damit in eine auch den anderen Organismen verfügbare Form umzuwandeln. In nährstoffarmen Seen spielt der auf diese Weise mögliche Stickstoff-Import jedoch eine untergeordnete Rolle. So sind Ammonium, vor allem aber Nitrat die wichtigsten anorganischen Stickstoffquellen, die beide von den pflanzlichen Organismen aufgenommen werden.

Ammonium (NH_4^+) entsteht als eines der Endprodukte des bakteriellen Abbaues organischer Substanz im Zuge der Ammonifikation. In gut durchlüftetem Wasser wird das Ammonium von chemolithoautotrophen Bakterien über instabile Zwischenstufen (z. B. Nitrit) zu Nitrat (Nitrifikation) oxidiert. In dieser Form wird es von den pflanzlichen Organismen gegenüber Ammonium

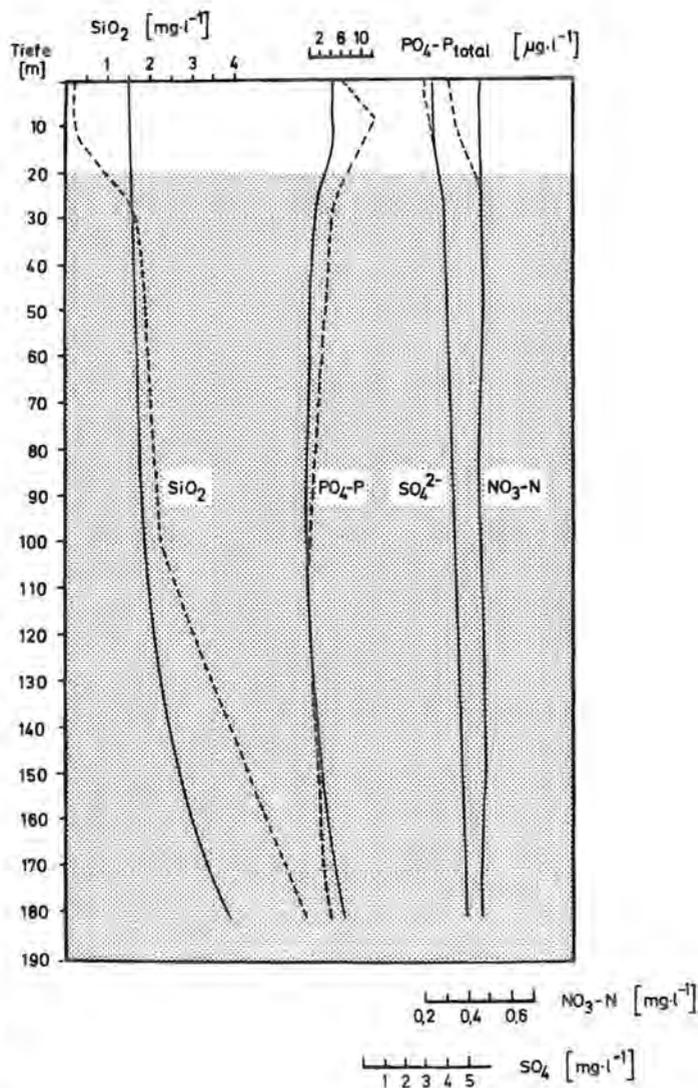


Abb. 37: Vertikalverteilung der Pflanzennährstoffe PO_4 -P, NO_3 -N, SiO_2 und SO_4^{2-} im Sommer (strichliert) und im Spätherbst (ausgezogen).

bevorzugt, obgleich es in der Pflanzenzelle wieder reduziert wird (assimilatorische Nitratreduktion). Nitrat kann aber auch von gewissen Bakterien über Zwischenstufen zu molekularem Stickstoff reduziert werden (dissimilatorische Nitratreduktion), so daß – allerdings nur in sehr eutrophen Seen – u. U. erhebliche Stickstoffverluste entstehen können.

In den Böden finden im Prinzip die gleichen Vorgänge statt wie im Wasser. Das entstandene Nitrat wird relativ leicht ausgewaschen und gelangt dann über die Zuflüsse in den See. Der Hauptanteil des Stickstoff-Imports über die Zuflüsse besteht jedoch aus Stickstoff, der in organischer Substanz festgelegt ist, die erst im See nach erfolgtem Abbau Ammonium bzw. Nitrat liefert. Stickstoff gelangt aber auch über die Atmosphäre durch Niederschläge auf die Erde bzw. direkt in die Gewässer, und zwar in Form von Stickoxyden, die durch elektrische Entladungen in der Atmosphäre entstehen. In der Bundesrepublik rechnet man im Durchschnitt mit ca. 10 kg N/ha·Jahr, in Industriegebieten kann es die 10fache Menge sein (Scheffer-Schachtschabel 1979).

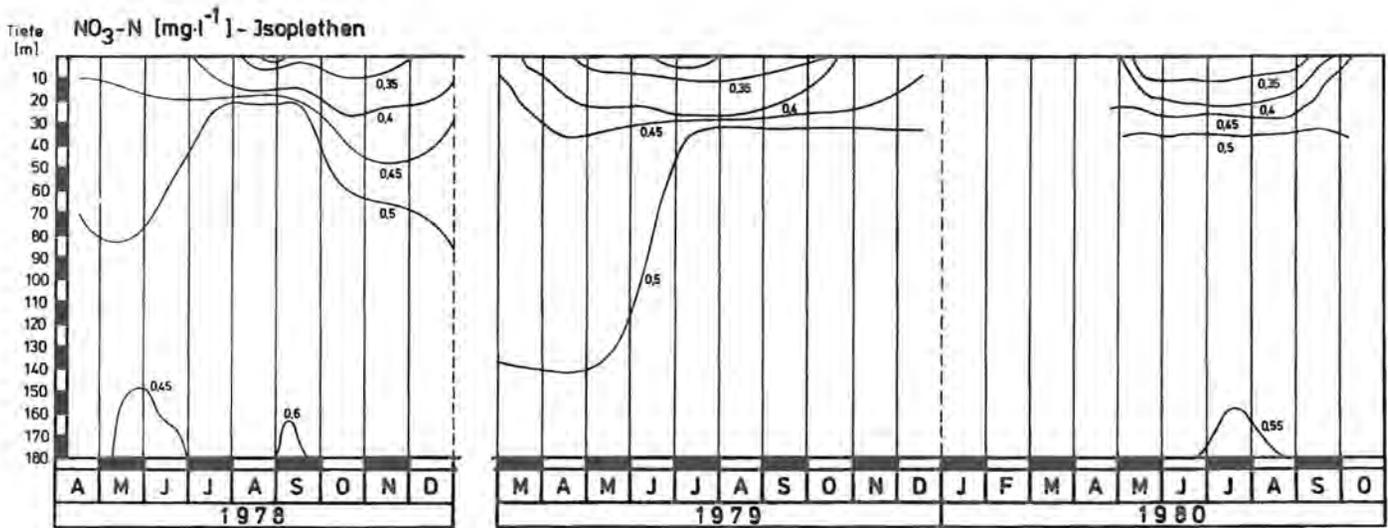


Abb. 38: $\text{NO}_3\text{-N}$ -Isoplethen im Königssee. Man beachte, daß sich die wesentlichen, wenn auch relativ geringen jahresperiodischen Unterschiede auf die Schicht zwischen 0–20 m beschränken. Unterhalb dieser Schicht wird ein bis zum Grund fortschreitender Anstieg der Konzentration beobachtet.

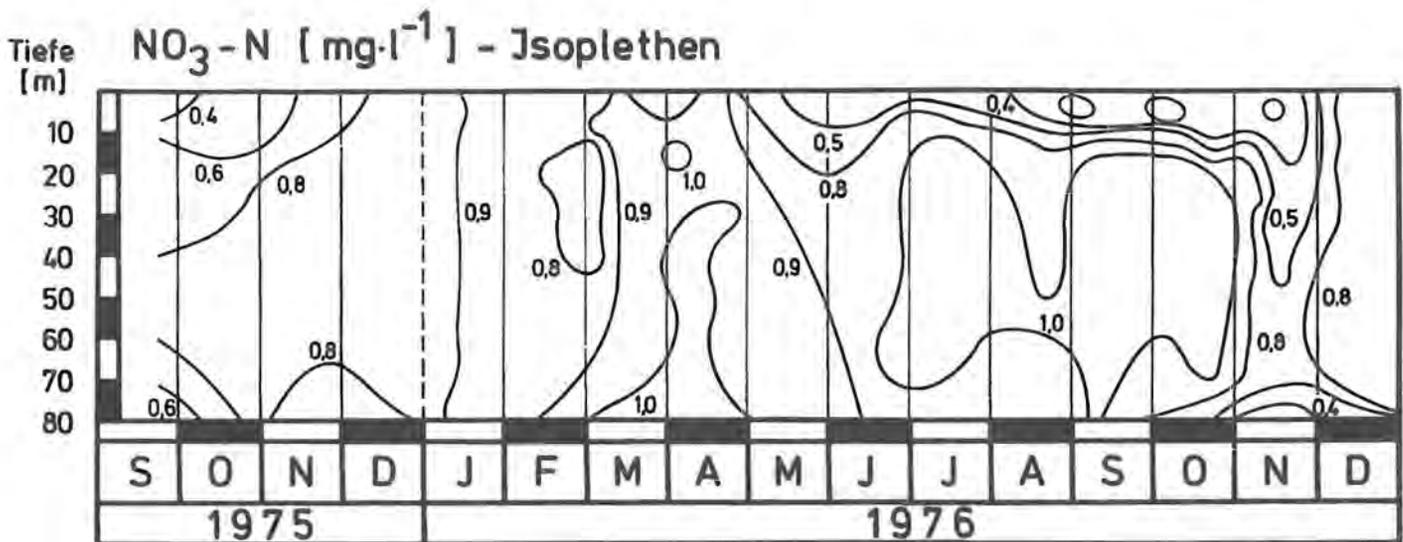


Abb. 39: $\text{NO}_3\text{-N}$ -Isoplethen im Ammersee. Man beachte die gegenüber dem Königssee wesentlich größeren Unterschiede im Raum und in der Zeit (aus Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 1978).

Wie sich aus Tabelle 16 ergibt, liegen die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen des Königssees im allgemeinen zwischen 0,3–0,6 mg/l. Die unter dem Einfluß der Stoffwechselaktivität der Organismen zu erwartenden jahresrhythmischen Veränderungen (vgl. Abb. 30) können durch eine auf die oberen 20 m begrenzte Konzentrationsabnahme bis auf 300 $\mu\text{g/l}$ in den Sommermonaten und eine Zunahme im Herbst bzw. Frühjahr bis zu maximal 600 $\mu\text{g/l}$ charakterisiert werden. Konzentrationserhöhungen zwischen April und Mai/Juni werden ebenfalls beobachtet. Sie dürften auf die in den höheren Gebirgsregionen um diese Zeit verstärkt stattfindende Schneeschmelze zurückzuführen sein.

Auch die vertikalen Konzentrationsunterschiede sind entsprechend gering (Abb. 37). Schon in 20–30 m Wassertiefe werden nie weniger als 400–500 $\mu\text{g/l}$ gefunden. Die Konzentrationszunahme bis zum Grund beträgt maximal 150 $\mu\text{g/l}$.

Aus dem Vergleich der Isoplethendarstellungen von Königssee (Abb. 38) und Ammersee (Abb. 39) ergibt

sich neben den höheren $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen im Ammersee auch ein höherer vertikaler Gradient, der hier zwischen Oberfläche und 15 m Wassertiefe (Oktober 1976) bereits zu Konzentrationsunterschieden von ca. 800 $\mu\text{g NO}_3\text{-N/l}$ führt. Derartige Unterschiede wurden im Königssee nie beobachtet. Sie betragen über die gleiche vertikale Distanz höchstens 150 $\mu\text{g/l}$.

Die wichtigsten anderen Stickstoffverbindungen, das Ammonium und das Nitrit, waren mit den von uns angewendeten Methoden im freien Wasser nicht nachweisbar.

5.3.3.5 Silikat

Silicium ist nach dem Sauerstoff das zweithäufigste Element der Erdoberfläche. Es ist in der uns zugänglichen Erdkruste mit ca. 25% vertreten. In den Urgesteinen liegt es vor allem als Quarz (SiO_2) und in aluminiumsilikathaltigen Mineralien vor. Durch Verwitterung der Urgesteine haben sich Tone, quarzhaltige Sande und bei Wiederbefestigung Sand- und Kalksteine sowie

Schiefer gebildet, die bekanntlich zu den Sedimentgesteinen gerechnet werden. Die hierin enthaltenen Mineralien können sich neben einer Auflösung im Wasser auch durch eine chemische Reaktion mit H^+ - und OH^- -Ionen des Wassers zersetzen (Hydrolyse). Das gilt grundsätzlich für alle Verbindungen, die aus einer schwachen Säure und/oder einer schwachen Base bestehen. Die Hydrolyse ist die wichtigste Reaktion der chemischen Verwitterung. Als Endprodukte entstehen beispielsweise aus den Kalifeldspäten neben dem Aluminiumhydroxyd auch Kieselsäure (H_4SiO_4). Diese Umbildung kann im Boden am Ort der chemischen Verwitterung oder nach dem Transport in den Tönen oder in kolloiddisperser Form an anderer Stelle erfolgen, z. B. in einem See. Wir finden die Kieselsäure als sogenannte gelöste reaktive Kieselsäure und als partikuläres Silikat. Was Letzteres betrifft, so sind nach Wetzel (1975) zwei Gruppen zu unterscheiden. Zur einen gehören diejenigen Organismen, die Silikate in relativ großen Mengen anreichern und zum Bau ihrer Kieselschalen verwenden.

Das sind die Diatomeen. Silicium wird aber auch in vielen anderen aquatischen Organismen gefunden, doch steht es, soweit es im Protoplasma vorkommt, mengenmäßig immer an untergeordneter Stelle; seine Rolle im Stoffwechsel ist unbekannt. Partikuläres Silikat entsteht aber auch dadurch, daß gewisse anorganische und organische Partikelchen die Eigenschaft haben, Kieselsäure zu adsorbieren.

Wie sich aus Tabelle 16 ergibt, kommt die reaktive Kieselsäure, die im allgemeinen als SiO_2 angegeben wird, im Königssee in den Grenzen zwischen 0,2–5,3 mg/l vor. Da bei hinreichendem Silikat-Gehalt im Wasser die Existenz von Diatomeen gesichert ist, müssen jahresperiodische, vom Populationswachstum abhängige Konzentrationsänderungen erwartet werden. Das ist im Königssee auch der Fall, zumal hier die Diatomeen unter den Phytoplanktern vorherrschen. Während in den Winter- bis Frühjahrsmonaten an der Wasseroberfläche bis zu 1500 $\mu g/l$ SiO_2 gemessen werden, tritt im

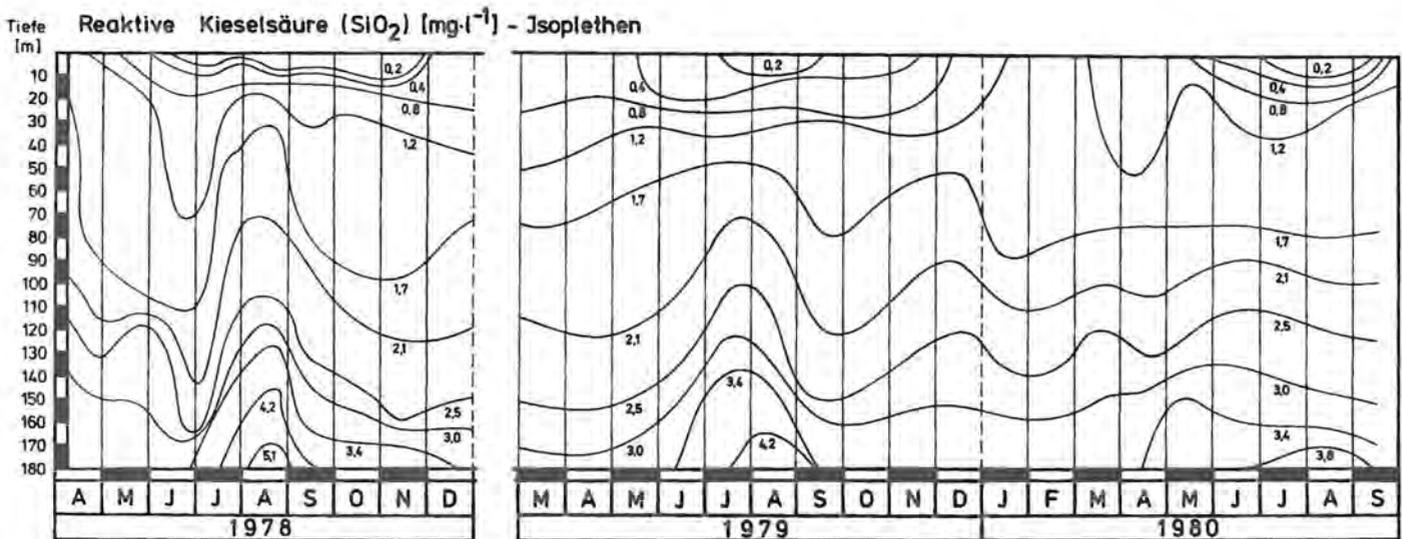


Abb. 40: SiO_2 -Isoplethen des Königssees. Man beachte, daß es in der tropholytischen Zone in den Sommermonaten zu einer Konzentrationszunahme kommt. In den Herbst- und Wintermonaten sind die Tiefenmaxima aufgelöst, doch bleibt auch während der Zirkulationsphase ein deutlicher Konzentrationsgradient erhalten, der gegen eine durchgreifende Vollzirkulation spricht.

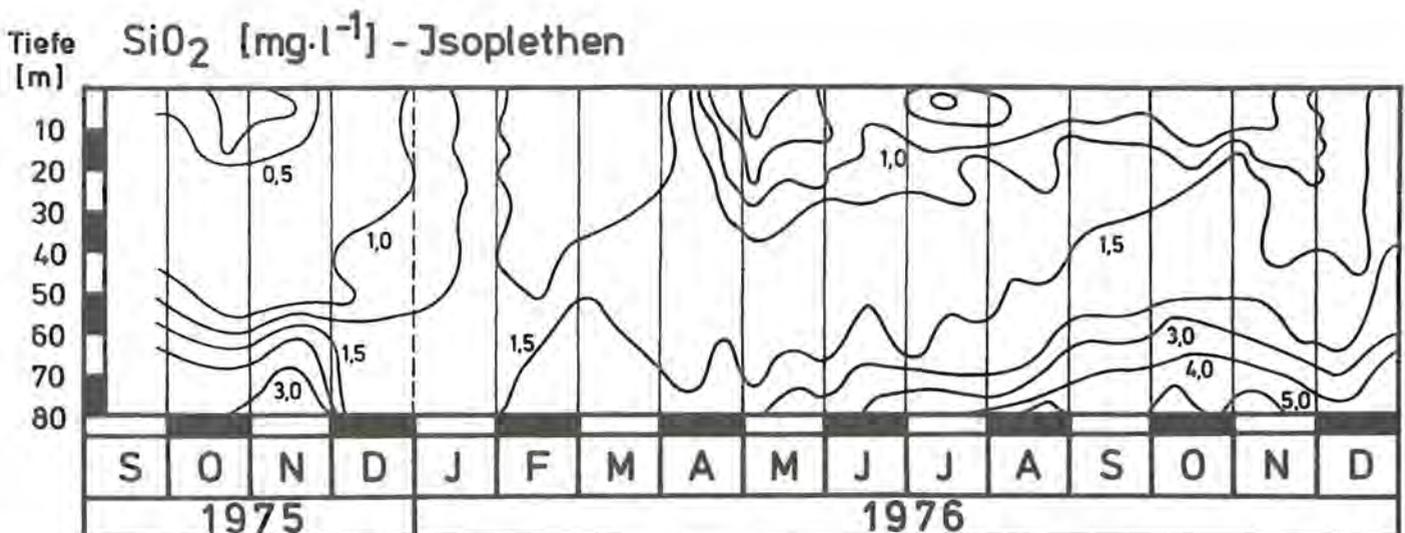


Abb. 41: SiO_2 -Isoplethen des Ammersees. Man beachte den vertikalen Konzentrationsausgleich im Januar 1976, der sich ab Anfang Dezember rasch zu entwickeln beginnt (aus Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 1978).

Verlauf der folgenden Zeit innerhalb der oberen 20-m-Wasserschicht eine SiO_2 -Verarmung ein, die im August mit etwa $214 \mu\text{g/l SiO}_2$ ihren niedrigsten Wert erreicht (Abb. 37). Im Winter wird diese Entwicklung wieder rückgängig gemacht. Erwartungsgemäß antagonistisch hierzu verhält sich die Konzentration des partikulären Silikats. Dieses Geschehen entspricht dem Anwachsen bzw. dem Abbau der Diatomeenpopulation in der trophogenen Zone.

In der tropholytischen Zone beobachten wir über das ganze Jahr hinweg einen kräftigen Anstieg der Silikat-Konzentration mit zunehmender Tiefe. In Grundnähe wurden maximale Konzentrationen mit Werten um $5000 \mu\text{g/l SiO}_2$ gefunden.

Betrachten wir die Isoplethen-Darstellung (Abb. 40), so läßt sich die Konzentrationsabnahme innerhalb der trophogenen Zone ab März/April beobachten. Im Dezember–Januar ist die ursprüngliche Konzentration dann wieder erreicht. Es fällt jedoch auf, daß auch während dieser Zeit wachsender Zirkulation ein vertikaler Konzentrationsgradient bis zum Grund erhalten bleibt. Es ergibt sich somit, daß auch die Silikat-Verteilung in Raum und Zeit gegen die Annahme einer durchgreifenden Vollzirkulation in den Herbst-Frühjahrs-Monaten spricht. Immerhin ist eine gewisse Konzentrationsabnahme in der Tiefe zu beobachten, denn die im Jahre 1978 im Sommer wenig über dem Grund gefundene Konzentration von ca. $5,3 \text{ mg/l SiO}_2$ wurde im folgenden Jahr nicht mehr gefunden. Nun betrug die maximale Konzentration ca. $4,2 \text{ mg/l}$, und im folgenden Jahr war sie mit $3,8 \text{ mg/l}$ noch etwas niedriger. Wir wollen diesen Befund als Hinweis auf einen gewissen vertikalen Austausch trotz fehlender Vollzirkulation werten.

Vergleichen wir nun die geschilderten Verhältnisse des Königssees mit jenen des Ammersees (Abb. 41), so finden wir hinsichtlich des jahreszeitlichen Ablaufs und sogar hinsichtlich der beobachteten Konzentrationen eine weitgehende Übereinstimmung. Der vertikale Konzentrationsgradient ist im Ammersee jedoch erheblich größer. Besonders auffällig und wichtig ist jedoch ein weiterer Unterschied: Im Ammersee werden die bestehenden vertikalen Konzentrationsunterschiede zeitweise ausgeglichen, z. B. im Januar 1976. Das ist zweifellos eine Folge der durchgreifenden Zirkulation (Volldurchmischung), die im Königssee offensichtlich fehlt.

5.3.3.6 Sulfat

Die Sulfate (z. B. CaSO_4 , MgSO_4) gehören neben den Sulfiden (z. B. FeS_2 , ZnS) zu den wichtigsten Schwefelverbindungen, die in der Natur vorkommen. Schwefel ist aber auch ein wichtiger Bestandteil des pflanzlichen und tierischen Eiweißes. Er ist daher für beide Organismengruppen unentbehrlich, obgleich er in verhältnismäßig geringer Menge benötigt wird. Im humiden Klimabereich enthalten die Böden im allgemeinen 0,02 bis 0,2% S, der hier aber zu 60–95% in organischen Verbindungen (z. B. Cystein, Cystin u. a.) vorliegt (Scheffer-Schachtschabel 1979). Die bei der Mineralisation freiwerdenden Sulfide sind nur unter anaeroben Bedingungen beständig. In durchlüfteten Böden wer-

den sie ebenso wie im sauerstoffhaltigen Wasser von chemoautotrophen Bakterien zu Sulfat oxidiert. Sulfat ist daher die wesentliche Schwefelverbindung in nährstoffarmen Gewässern. Unter anaeroben Verhältnissen bleiben nicht nur die beim Abbau organischer Substanzen freiwerdenden Sulfide erhalten, sondern es wird auch das vorhandene Sulfat bis zum Schwefelwasserstoff reduziert. Er reichert sich bei pH-Werten < 7 in der Tiefe an, sofern er nicht durch zweiwertige Eisenionen als schwer lösliches Eisensulfid (FeS) ausfällt, das ein charakteristischer Bestandteil des Faulschlammes ist. Auf diese Verhältnisse einzugehen, die bei hohem Nährstoffgehalt mit folgender Eutrophierung beobachtet werden, erübrigt sich jedoch, weil der Königssee als nährstoffarmer See bis zum Seegrund reichlich mit Sauerstoff versorgt ist. Wir können uns daher auf das Sulfat beschränken, das als leicht auswaschbare Schwefelverbindung vor allem auch in dieser Form in die Gewässer gelangt. Ausgenommen den Fall, daß im Einzugsgebiet ausgedehnte Gipslager und schwefelhaltiges Gestein vorliegen, ist die Sulfatzufuhr aus den Einzugsgebieten im allgemeinen gering, die Sulfatkonzentration in anthropogen nicht beeinflussten Seen dementsprechend niedrig. Bei anthropogener Belastung kann sie jedoch erheblich ansteigen, nicht zuletzt, weil Sulfat Bestandteil von häuslichen Abwässern und Kunstdüngern ist. Unter dem Einfluß industrieller Produktionsmethoden erhalten aber auch die Schwefelimporte über das Regenwasser immer mehr Gewicht. So wurden in Deutschland schon 1969/70 pro Jahr ca. 3,4 Millionen Tonnen Schwefeldioxyd in die Luft emittiert, die größtenteils mit den Niederschlägen als H_2SO_3 und H_2SO_4 in die Böden und in das Wasser gelangt sind.

Wie sich aus Tabelle 16 ergibt, sind die Sulfatkonzentrationen im Königssee mit Werten zwischen 2–6,5 mg/l sehr niedrig. Sie sind sogar niedriger als die durchschnittliche Sulfatkonzentration im Münchner Regenwasser, in welchem immerhin 9,5 mg/l gemessen werden (Frimmel 1979).

Aus Abb. 30 folgt, daß in nährstoffarmen Seen weder auffällige Unterschiede in der vertikalen Verteilung des Sulfat-Gehalts noch im jahreszeitlichen Verlauf zu erwarten sind. Das ist auch der Fall (Abb. 37). Es wurden zwar mehrmals während des Sommers in der trophogenen Zone um etwa 1 mg niedrigere Werte gefunden als im Spätherbst und Winter, doch reicht die Zahl der Untersuchungen nicht aus, um eine Jahresrhythmik nachzuweisen oder auszuschließen.

5.3.3.7 Phosphat

Ökologisch gesehen ist der Phosphor eines der interessantesten Elemente, weil er einerseits für alle Lebewesen unentbehrlich ist, mengenmäßig zur Spitzengruppe Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff gehört, im Gegensatz zu diesen jedoch nur in geringer Menge verfügbar ist (Tabelle 14). Phosphor kommt zwar zu einem erheblichen Anteil als Calciumphosphat in Knochen und Zähnen vor, seine besondere Bedeutung erhält er jedoch als Bestandteil der Nucleinsäuren und ihrer Derivate.

Das wichtigste phosphorhaltige Material der Erdkruste ist der Apatit, der im Urgestein und in marinen Sedimenten vorkommt, wobei es sich in beiden Fällen überwiegend um Fluor-Apatit ($\text{Ca}_{10}[\text{PO}_4]_6\text{F}_2$) handelt. Dieses Mineral ist nur äußerst schwer löslich, sein Phosphatbestandteil daher nicht ohne weiteres verfügbar. Der in den Böden vorkommende Phosphor läßt sich im wesentlichen drei Gruppen zuordnen: 1) dem Ca-, Fe- und Al-Phosphat, 2) den organischen Verbindungen, unter welchen sich bis zu 60% die Salze der Inosithexaphosphorsäure befinden, und 3) das an AlOH -, $\text{Al}(\text{OH})_2$ -, FeOH - und $\text{Fe}(\text{OH})_2$ -Gruppen adsorbierte Phosphat.

Phosphor liegt immer als Phosphat vor und als solches finden wir es auch im Wasser, wobei man folgende Unterscheidungen trifft: 1) das partikuläre Phosphat, das meist > 95% des Gesamtphosphats im Wasser enthält, 2) das reaktive gelöste Phosphat (Orthophosphat), das die für Pflanzen verfügbare Form darstellt, 3) organische Phosphor-Verbindungen mit einem Molekulargewicht < 250 (vom Phytoplankton an die Umgebung abgegeben) und 4) organische Phosphor-Verbindungen, die aus Kondensation der unter 3) genannten Verbindungen mit Molekulargewichten < 5 000 000 hervorgehen (Lean 1973).

Wie sich aus Abb. 42 ergibt, liegt der Hauptaustausch zwischen dem reaktiven und dem partikulären Phosphat (Phytoplankton, Bakterien). Aus dem Vorrat des partikulären Phosphats, der durch Speicherung bis zu einem Hundertfachen über der Umgebungskonzentration liegen kann, erfolgen stets Verluste durch Sedi-

mentation aus der trophogenen in die tropholytische Zone und weiter bis zum Grund. Auf entsprechende Weise entstehen auch Verluste über die Fraktion des kolloidalen Phosphats. Da die Phosphat-Speicherung durch das Phytoplankton weit über den Eigenbedarf hinausgeht – es werden sozusagen Vorräte für Mangelzeiten angelegt –, ist es nicht verwunderlich, daß man während eines starken Phytoplanktonwachstums im Wasser oft kein reaktives Phosphat nachweisen kann.

Nach Tabelle 16 liegen die im Königssee gefundenen Maximalwerte für $\text{o-PO}_4\text{-P}$ bzw. $\text{PO}_4\text{-P}_{\text{total}}$ weit unter jenen, die in den übrigen dort aufgeführten Seen angetroffen worden sind. Die Konzentrationen bewegen sich im Königssee im allgemeinen zwischen 1–6 $\mu\text{g/l}$ $\text{PO}_4\text{-P}_{\text{total}}$. Zur Zeit der „Diatomeenblüte“, vor allem aber während einer Massenentwicklung von *Uroglena americana*, kommen gelegentlich auch Werte bis zu 11 $\mu\text{g/l}$ vor. Wie sich aus Abb. 30 ergibt, ist es für nährstoffarme Seen charakteristisch, daß im Sommer während der Stagnationsphase in der trophogenen Zone eher etwas höhere $\text{PO}_4\text{-P}_{\text{total}}$ -Konzentrationen beobachtet werden als in der Tiefe. Das trifft auch für den Königssee zu. Aus den Abb. 37 und 43 folgt, daß die Konzentration des $\text{PO}_4\text{-P}_{\text{total}}$ unterhalb oder schon innerhalb der trophogenen Zone abfällt, um erst ab einer Tiefe von 100–130 m wieder etwas anzusteigen. Diese vertikale Konzentrationszunahme in der Tiefe bildet sich während der Sommermonate aus und ist auf die Sedimentation partikulärer Substanzen – vor allem wohl auf Phytoplankton – zurückzuführen.

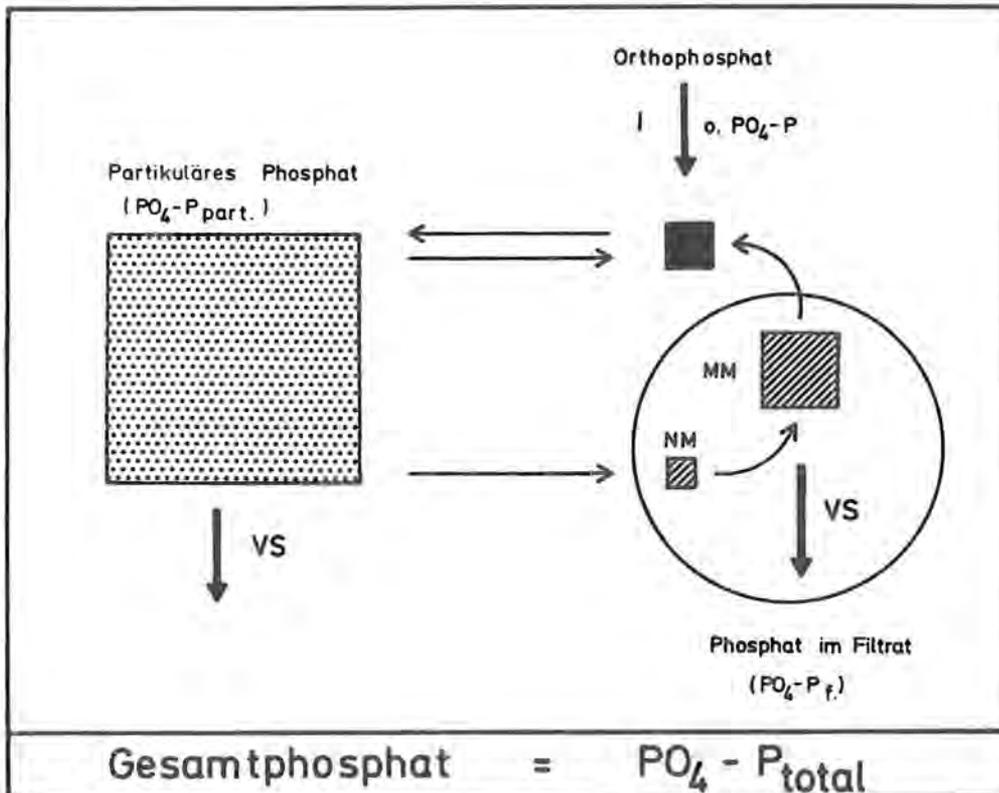


Abb. 42: Prinzipschema zum Kreislauf verschiedener Phosphatkomponenten, die analytisch normalerweise getrennt bestimmt bzw. gemeinsam als Gesamtphosphat angegeben werden. (I = Import, VS = Verluste durch Sedimentation, NM = niedrig molekulare, MM = makromolekulare Verbindungen) (aus Wetzel 1975).

Vergleicht man den Königssee anhand der Isoplethendarstellung mit dem Ammersee (Abb. 44 und 45), so zeigt sich auch dort der sommerliche Konzentrationsanstieg mit zunehmender Tiefe. Wie im Falle der schon besprochenen Ionen (z. B. NO_3^-) ist der vertikale Konzentrationsgradient des $\text{PO}_4\text{-P}_{\text{total}}$ im Königssee während der Stagnationsphase aber wesentlich niedriger als im Ammersee. Besonders auffällig ist der Befund, daß die Tiefenkonzentration im Ammersee ein Vielfaches der Oberflächenkonzentration erreicht, während im Königssee die höheren Konzentrationen in der Regel in der trophogenen Zone anzutreffen sind.

Von besonderer Bedeutung ist der Befund, daß der Nachweis des Orthophosphats (= reaktives gelöstes Phosphat) in der Regel nicht möglich gewesen war. Das bedeutet, daß ein etwaiges Vorhandensein dieser Phosphorkomponente Konzentrationen von $1 \mu\text{g/l PO}_4\text{-P}$ nicht überschreitet. In einigen wenigen Fällen war es jedoch möglich, das Orthophosphat in Grundnähe nachzuweisen, doch lagen die Analysenwerte auch in diesen Fällen nur knapp über der Nachweisgrenze. Umso auffälliger ist der Befund, daß wesentlich höhere Werte (ca. $7 \mu\text{g/l}$) gelegentlich in der Nähe der Salletanlage gefunden worden sind.

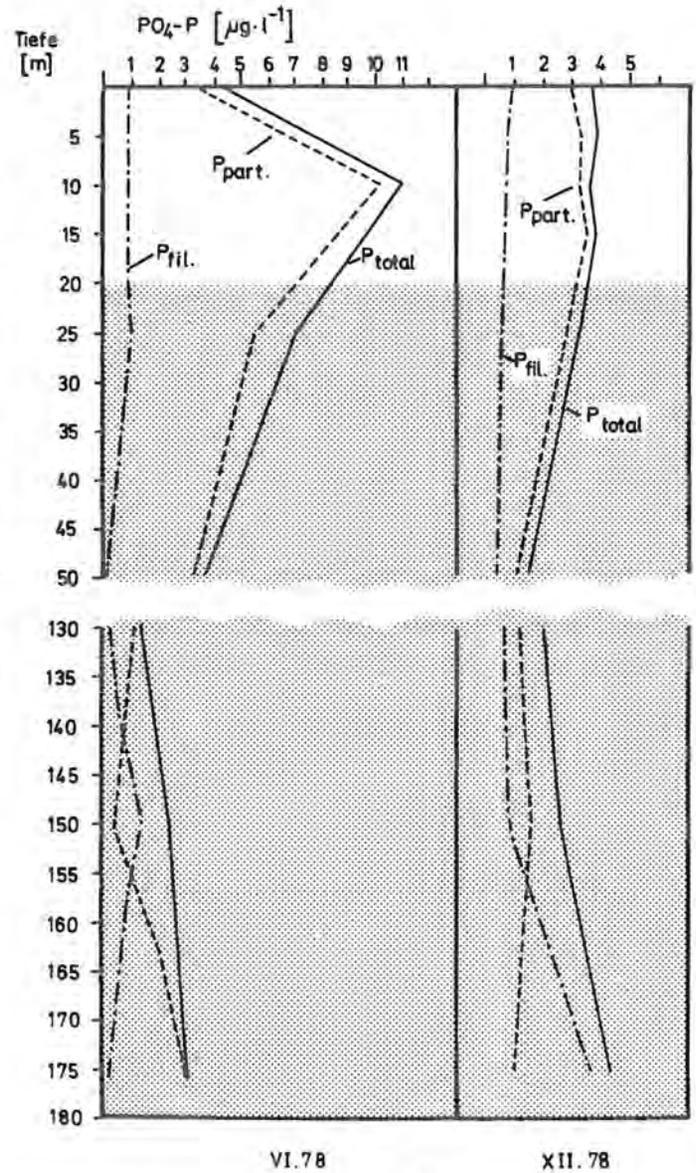


Abb. 43: Vertikale Verteilung der $\text{PO}_4\text{-P}$ -Fraktionen im Königssee während relativ hoher Phytoplanktondichten im Juni 1978 und bei typisch winterlichen Verhältnissen. P_{total} = Gesamtphosphat, $P_{\text{part.}}$ = partikuläres Phosphat, $P_{\text{fil.}}$ = Phosphat im Filtrat (vgl. Abb. 42).

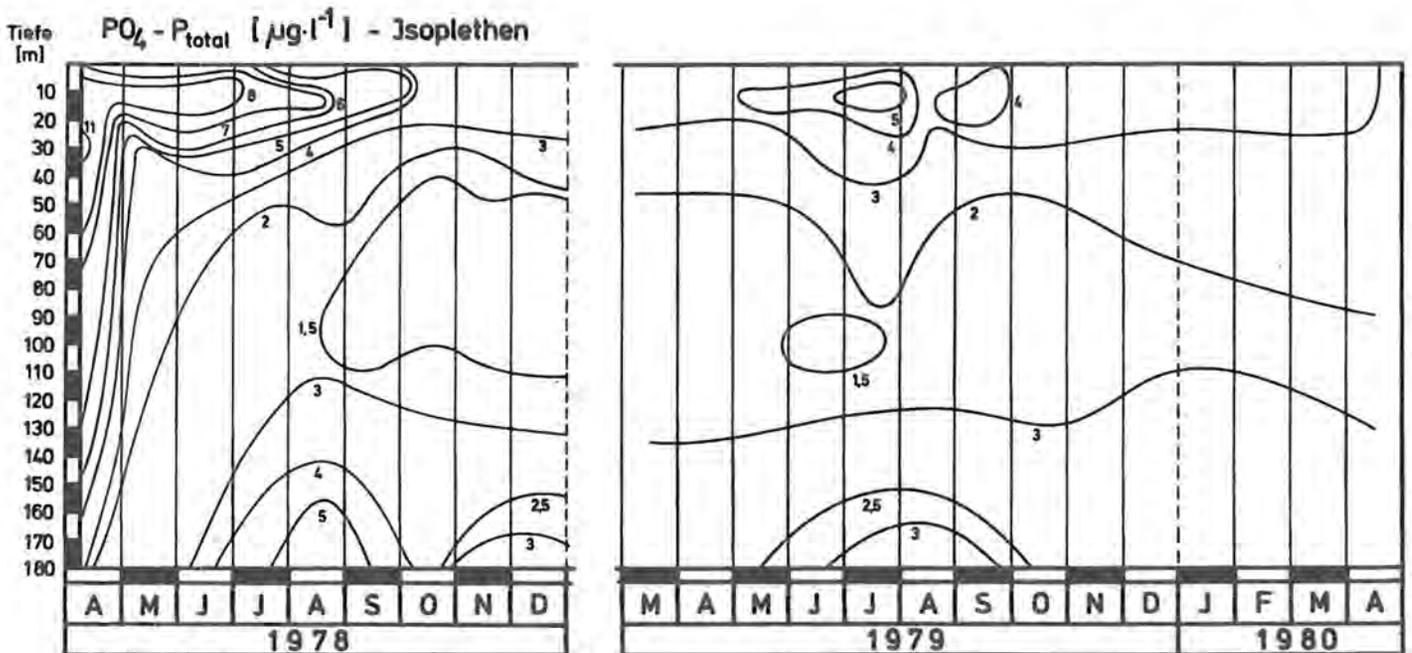


Abb. 44: $\text{PO}_4\text{-P}_{\text{total}}$ -Isoplethen des Königssees. Man beachte die geringen vertikalen Konzentrationsunterschiede.

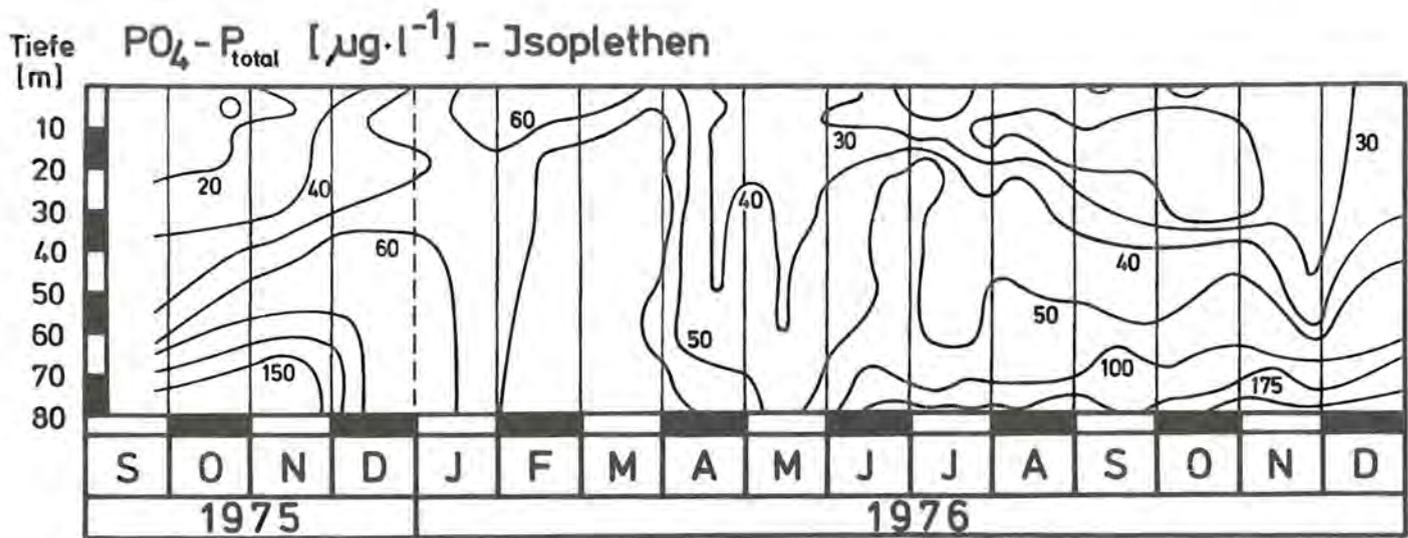


Abb. 45: PO_4-P_{total} -Isoplethen des Ammersees. Man beachte, wie es in den Sommermonaten in der Tiefe zu einer Konzentrationserhöhung kommt, die zu einem starken vertikalen Gradienten führt, der erst während der Zirkulationsphase wieder abgebaut wird (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 1978, verändert).

Tabelle 18		Stoffinhalte Königssee		
Gesamtsee (t)				
0-180 m	PO_4-P_{total}	NO_3-N	SiO_2	
Mittelwert Seejahr	1,633	248,8	476,6	
Maximum	3,420	288,5	561,8	
Minimum	1,178	224,1	419,3	
Trophogene Zone (mg/m^3)				
0-10 m	PO_4-P_{total}	NO_3-N	SiO_2	
Maximum	7,7	520	618	
Minimum	3,9	405	134	
10-20 m				
Maximum	11,0	540	649	
Minimum	2,3	442	233	
Ausgewählte Tiefen (mg/m^3)				
Oberfläche	PO_4-P_{total}	NO_3-N	SiO_2	
Maximum	6,2	540	600	
Minimum	2,6	300	130	
Seegrundnähe				
Maximum	6,5	580	214	
Minimum	1,5	370	162	

5.3.3.8 Sauerstoff

Dem Gewicht nach übertrifft der Sauerstoff in seinem Vorkommen auf der Erde alle übrigen Elemente. Man weiß heute mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit (Junge 1981), daß dieses Element erst mit der Entfaltung photoautotropher Organismen (vor ca. 3,7

Milliarden Jahren) in vielen Jahrmillionen seine heutige Menge (wahrscheinlich schon seit 200 Millionen Jahren) erreicht hat. Der überwiegende Anteil des Sauerstoffs ist in den Gesteinen und im Wassermolekül chemisch gebunden. Nur ein relativ kleiner Teil ist frei verfügbar, vor allem in der Luft, die etwa 21 Volumenprozent Sauerstoff enthält.

5.3.3.8.1 Verteilung im oligotrophen und eutrophen See

Die Konzentration des im Wasser ausschließlich physikalisch gelösten Sauerstoffs hängt im wesentlichen von der Wassertemperatur und der Druckdifferenz zwischen dem in der Luft und im Wasser befindlichen Sauerstoff ab. Im gut durchlüfteten Wasser stellen sich somit Gleichgewichtsbedingungen ein, die im wesentlichen durch diese zwei Größen geregelt werden. Sind die Gleichgewichtsbedingungen erfüllt, so bezeichnet man das Wasser als mit Sauerstoff gesättigt (= 100% Sättigung). Da die Gleichgewichtseinstellung nicht momentan erfolgt, kann es bei einer Veränderung der genannten Größen mit Sauerstoff über- bzw. untersättigtes Wasser geben. Übersättigungen entstehen z. B., wenn photoautotrophe Organismen schneller Sauerstoff produzieren, als er entweichen kann, und Untersättigungen, wenn heterotrophe Organismen den Sauerstoff rascher aufnehmen, als er aus der Umgebung nachgeliefert werden kann.

Das an der Seeoberfläche befindliche Wasser kann sich im Kontakt mit der Luft relativ rasch mit Sauerstoff sättigen. Wenn es aber als derart mit Sauerstoff gesättigtes Wasser in die Tiefe transportiert wird und dadurch unter höheren Druck gerät (zum Partialdruck an der Seeoberfläche kommt nun der hydrostatische Druck noch hinzu), so ist es ebenfalls untersättigt. Diese physikalisch bedingte Untersättigung ist ökologisch weniger interessant als die biogen bedingte Untersättigung, die auf Sauerstoff verbrauchende Stoffwechselfvorgänge (Sauerstoff-Zehrung) zurückzuführen ist.

Zur Abschätzung der Sauerstoff-Zehrung geht man von dem Sauerstoff-Vorrat aus, der sich während der Vollzirkulation in einem See gebildet hat. Die Zehrung drückt sich dann durch entsprechend hohen Verlust, die biogene Produktion durch einen Sauerstoff-Gewinn aus. Da Photosynthese und Zehrung gemeinsam in der trophogenen Zone stattfinden, in der tropholytischen Zone aber allein Sauerstoff-Zehrung erfolgt, sind in einem See in vertikaler Richtung erhebliche Sauerstoff-Konzentrationsunterschiede zu erwarten. Dieses antagonistische Geschehen verändert die zunächst physikalisch bedingte Sauerstoff-Verteilung somit mehr oder weniger stark.

In nährstoffarmen Seen wird sich weder der eine noch der andere dieser beiden Prozesse in auffälliger Weise auf die Sauerstoff-Verteilung auswirken. Die Sauerstoff-Konzentrationen werden in diesem Falle von der Wasseroberfläche bis zum Grund gleich oder ähnlich sein (orthograde Verteilung der Sauerstoff-Verteilung) (Abb. 30). In nährstoffreichen Seen ist die Dichte der photoautotrophen bzw. heterotrophen Organismen wesentlich größer. Die Sauerstoff-Verhältnisse der trophogenen Zone werden daher maßgeblich von der Photosynthese, die in der tropholytischen Zone vor allem durch den biogenen Sauerstoff-Verbrauch bestimmt. Es entsteht somit eine vertikale Sauerstoff-Schichtung, die sich durch große Unterschiede auszeichnet: hohe Konzentrationen (bzw. Übersättigungen) in der trophogenen Zone und Untersättigungen –

wenn nicht sogar Sauerstoff-Schwund – in der Tiefenzone (Abb. 30).

5.3.3.8.2 Verteilung in Raum und Zeit

Wenn wir die in Abb. 46 dargestellte Sauerstoff-Verteilung des Königssees betrachten, so ergibt sich folgendes:

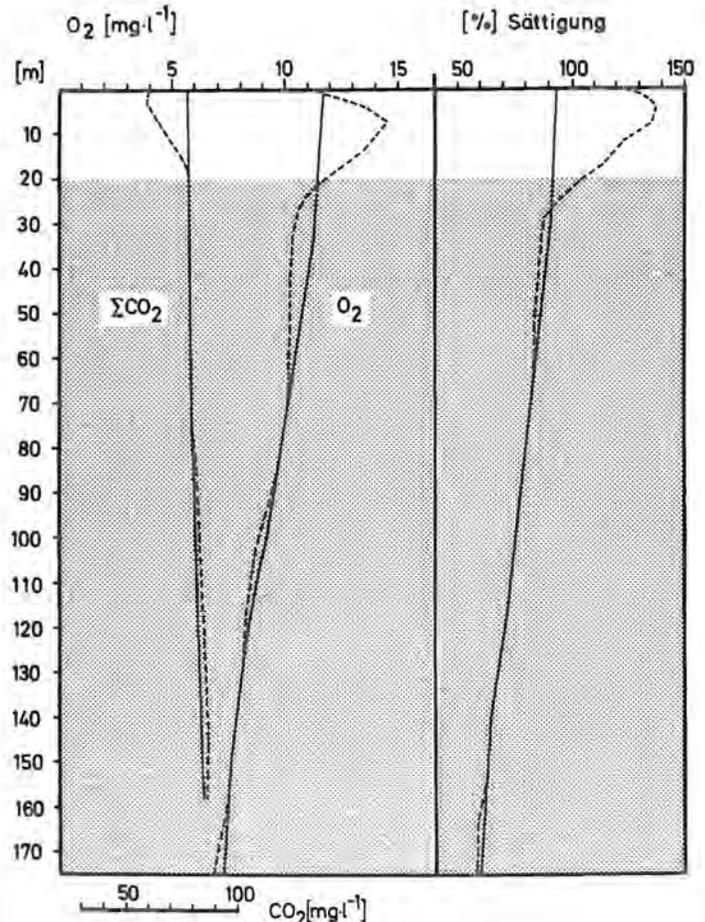


Abb. 46: Vertikale Sauerstoff- und ΣCO_2 -Verteilung im Königssee während der sommerlichen Schichtung (strichliert) und der winterlichen Zirkulationsphase (ausgezogen). Trophogene Zone hell, tropholytische Zone punktiert.

- 1) Der größte Unterschied in der vertikalen Sauerstoff-Verteilung zwischen Sommer und Winter ist in der trophogenen Zone zu beobachten. Hier kommt es z. Zt. der sommerlichen Schichtung zu Übersättigungen, welche die 150%-Grenze im allgemeinen jedoch kaum überschreiten. In den Herbst- und Wintermonaten (aber auch bei anhaltend ungünstiger Witterung im Sommer) bleiben die Sättigungswerte knapp über oder – wie es das dargestellte Beispiel zeigt – knapp unter der Sättigungs-Konzentration.
- 2) Die höchsten Sauerstoff-Konzentrationen werden während der sommerlichen Schichtung zwischen 8–15 m gemessen. In größerer Tiefe folgt noch innerhalb der trophogenen Zone eine verhältnismäßig starke Abnahme der Sauerstoff-Konzentration, die bis auf etwa 30 m Wassertiefe anhält. Von hier an fällt die Sauerstoff-Konzentration bis in eine Tiefe von ca. 70 m nur noch sehr wenig. Anschließend ist wieder eine etwas stärkere Abnahme zu beobachten. Am Grund in 175 m Tiefe werden nicht nur in

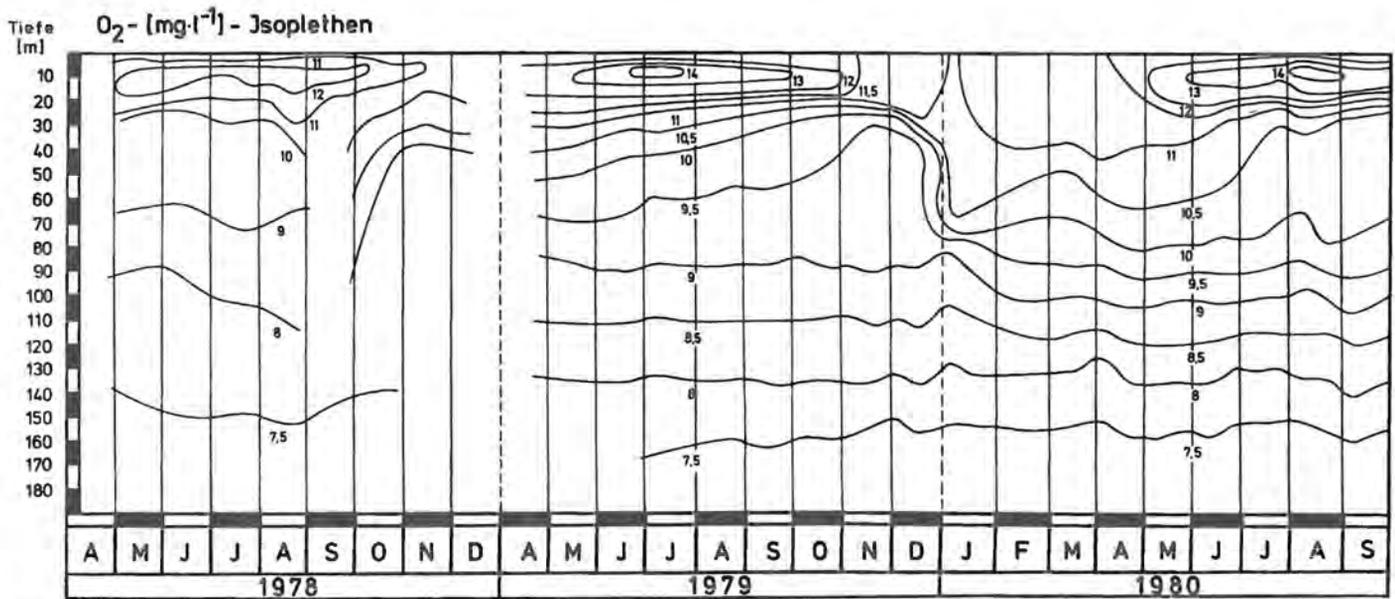


Abb. 47: Sauerstoff-Isoplethen des Königssees. Man beachte die waagerechte Orientierung der Isoplethen in der Tiefenzone des Sees. Sie veranschaulichen die geringen Konzentrationsveränderungen im Jahresablauf.

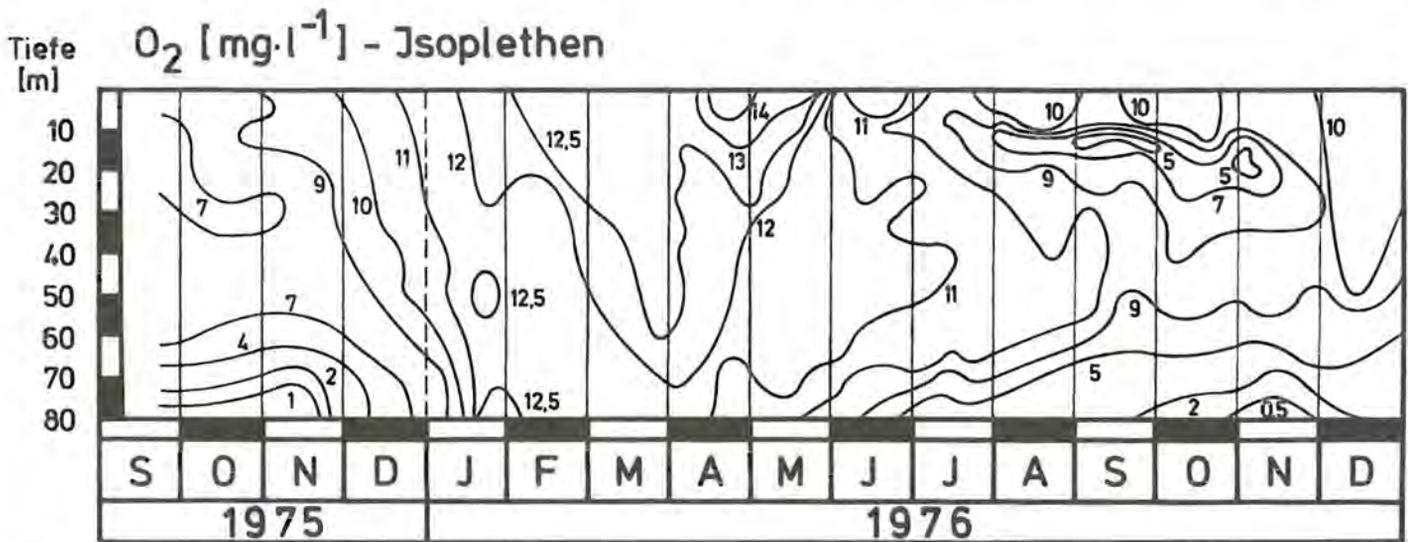


Abb. 48: Sauerstoff-Isoplethendarstellung des Ammersees (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 1978, verändert).

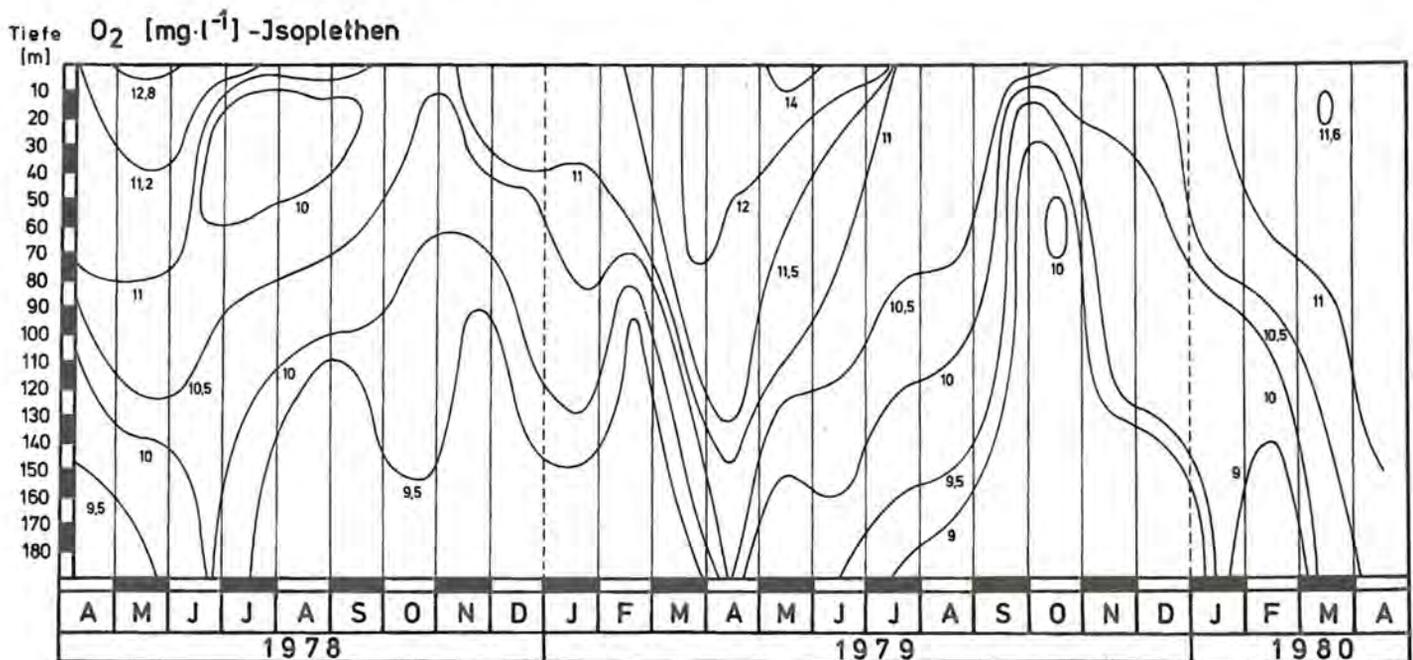


Abb. 49: Sauerstoff-Isoplethen des Walchensees. Vertikal orientierte Isoplethen veranschaulichen die starken Konzentrationsänderungen im Ablauf des Jahres (nach Angaben von Dr. C. Steinberg, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, gezeichnet).

O₂ - [mg·l⁻¹] - Isoplethen

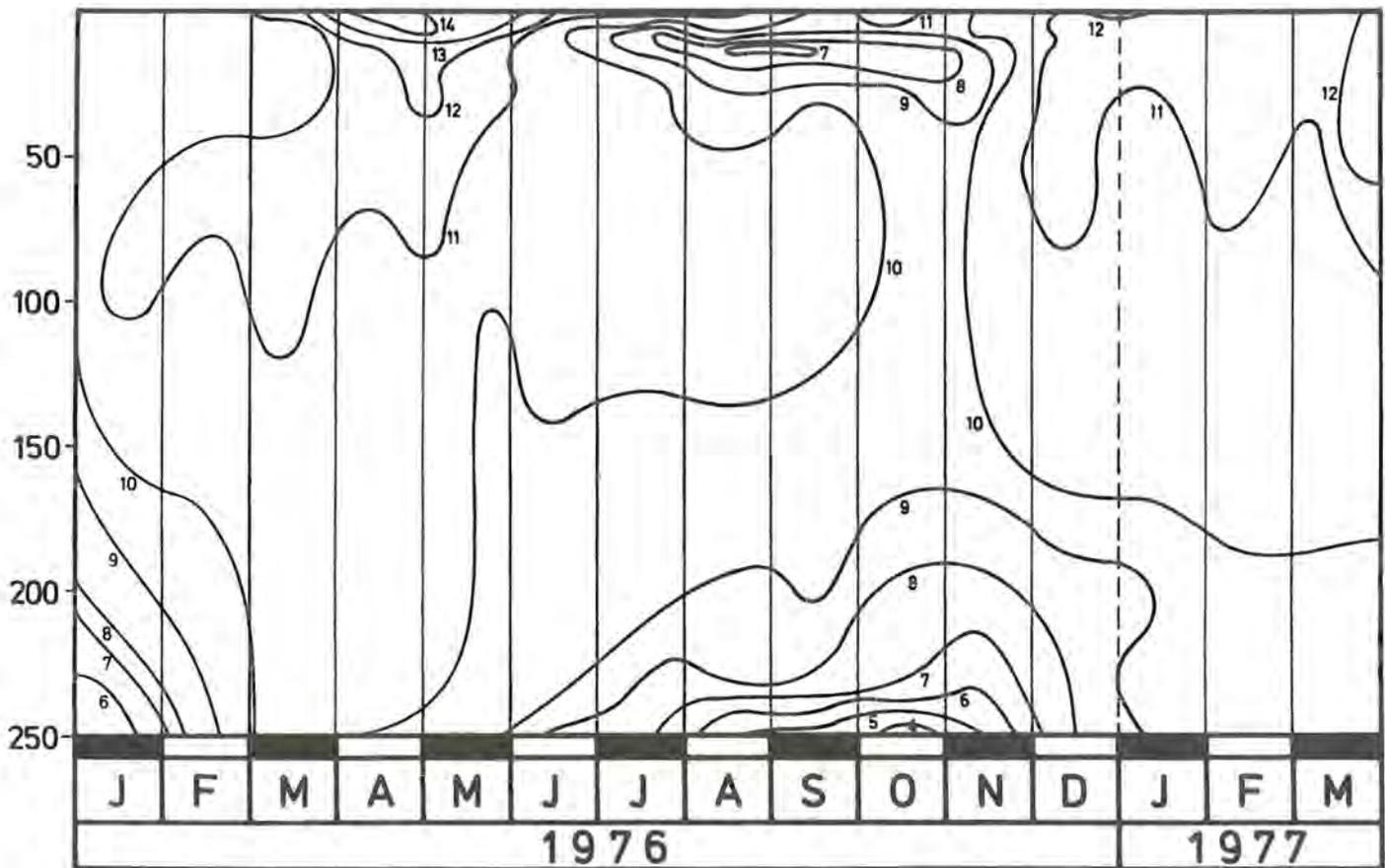


Abb. 50: Sauerstoff-Isoplethen des Bodensees im Jahresverlauf. Im auffallenden Gegensatz zu den Verhältnissen im Königssee wandern die Isoplethen auch in der Tiefe des Sees, d. h. es gibt bis zum Seegrund erhebliche jahresperiodische Unterschiede (Jber. Int. Gewässerschutzkommission 1978, verändert).

dem gezeigten Beispiel, sondern während des ganzen Untersuchungszeitraumes 6–7 mg O₂/l gefunden. Das entspricht Sättigungswerten, die zwischen 50–60% liegen.

Aus der Isoplethendarstellung (Abb. 47) ist die jahreszeitliche Entwicklung der gerade geschilderten Verhältnisse zu entnehmen: Die Anreicherung der trophogenen Zone mit Sauerstoff beginnt demnach im April mit der Entwicklung der thermischen Schichtung; sie hält bis zum November/Dezember an.

Dem relativ raschen Wechsel der Sauerstoff-Konzentrationen in der trophogenen Zone stehen auffällig gleichbleibende Verhältnisse in der tropholytischen Zone, aber erst ab 90–100 m Wassertiefe gegenüber. Das folgt sehr eindrucksvoll aus der waagrechten Lage der Isoplethen: 9–8,5–8–7,5 mg O₂/l, und ihrem verhältnismäßig gleichbleibenden Abstand untereinander.

Im Dezember/Januar (1979/80) läßt sich der Beginn der Zirkulationsphase durch den angezeigten Sauerstoff-Transport (vgl. die sich ändernde Lage der 9,5-, 10,0- und 10,5-mg/l-Isoplethen) in Tiefen bis zu 70 m verfolgen. Aber schon die 9,0-mg/l-Isoplethe ist davon kaum noch berührt. Aus diesem Befund muß der Schluß gezogen werden, daß die Tiefenzone des Königssees ab ca. 100 m bis zum Grund nicht in diese winterliche Zirkulation einbezogen worden ist. Zum besse-

ren Verständnis dieser besonderen Verhältnisse seien die Isoplethendarstellungen vom Ammersee (Abb. 48), Walchensee (Abb. 49) und vom Bodensee (Abb. 50) zum Vergleich herangezogen. In diesen Fällen zeichnen sich die Isoplethen durch auffallende Richtungsänderungen aus, wodurch die Dynamik der Konzentrationsveränderungen anschaulich wird.

5.3.3.8.3 Aktuelles und relatives Sauerstoff-Defizit

Zu den besonders auffälligen Befunden zur Sauerstoff-Verteilung im Königssee gehören die geringen Konzentrationsänderungen, die sich im Jahresablauf innerhalb der tropholytischen Zone ergeben. Sie lassen sich anhand der Darstellung des aktuellen bzw. relativen Sauerstoff-Sättigungs-Defizits besonders anschaulich darstellen (Abb. 51, 52). Das aktuelle Sauerstoff-Sättigungs-Defizit gibt definitionsgemäß die Abweichung des tatsächlichen Sauerstoff-Gehalts vom maximal möglichen Wert (Sättigungswert) an.

Die Darstellung des aktuellen Sauerstoff-Defizits (Abb. 51) zeigt, daß die schon anhand von Abb. 46 beschriebene Übersättigung in der trophogenen Zone über die gesamte warme Jahreszeit erhalten bleibt.

Folgende Befunde verdienen das besondere Interesse:

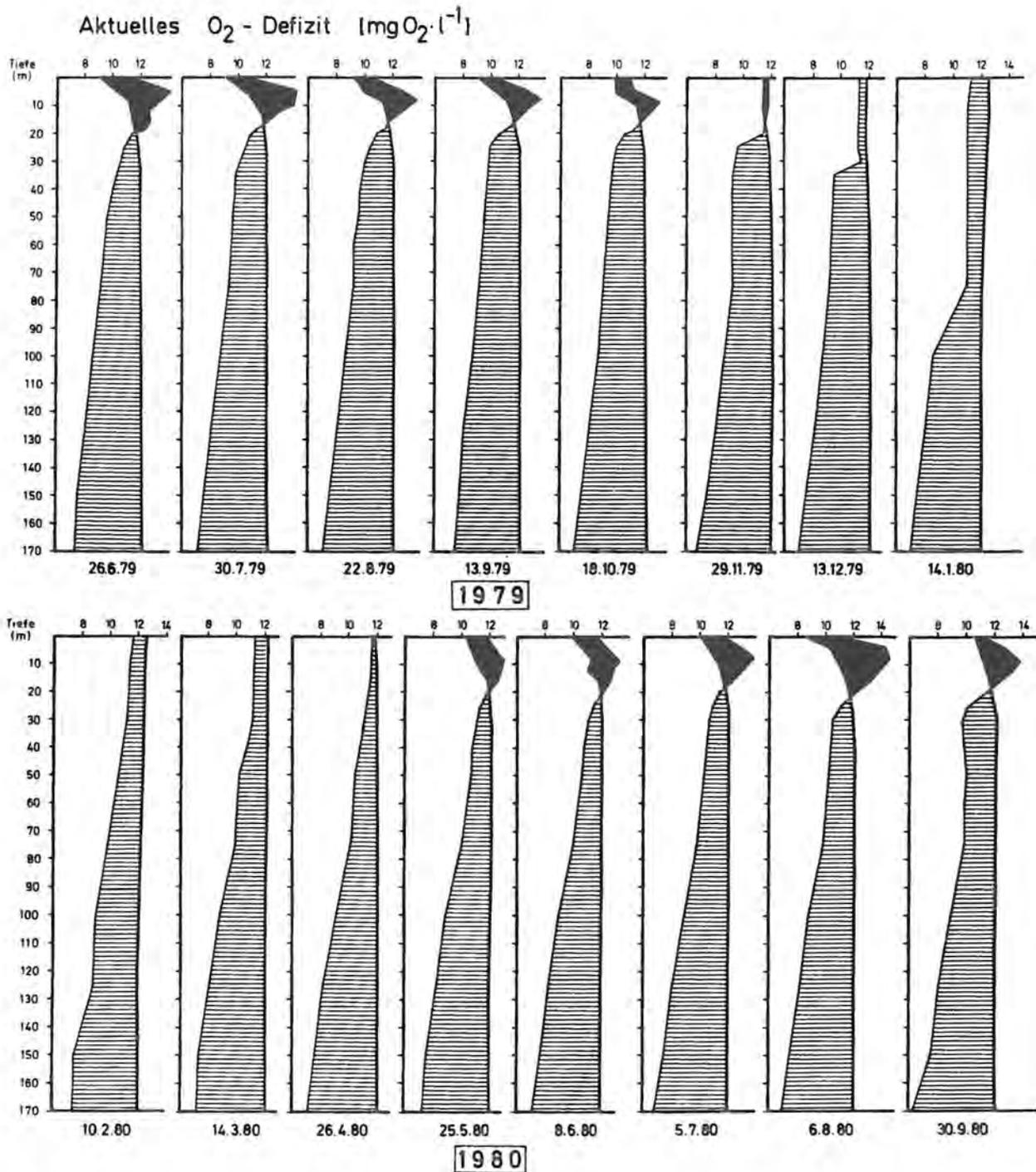


Abb. 51: Entwicklung des aktuellen Sauerstoff-Defizits im Königssee.

- 1) Übersättigungen entstehen höchstens bis zu einer Tiefe von 20 m (trophogene Zone).
- 2) Die tropholytische Zone ist immer untersättigt. In den Wintermonaten kann auch die trophogene Zone geringfügig untersättigt sein.
- 3) Die größten Unterschiede im aktuellen Sauerstoff-Defizit ergeben sich im Jahresablauf innerhalb der 20- bis 100-m-Schicht.

Betrachten wir nun die Darstellungen zum relativen Sauerstoff-Defizit. Es gibt definitionsgemäß die Abweichung der Sauerstoff-Konzentration von der Ausgangskonzentration vor Beginn der sommerlichen Schichtung an. Der in Abb. 52 geschwärzte Teil der Kurve zeigt anschaulich die Entwicklung des relativen Defizits, das

in jedem Fall auf die am 19. 5. (1979) bzw. 26. 4. (1980) gemessene Sauerstoff-Konzentration bezogen wird. Es ergibt sich, daß das Sauerstoff-Defizit vor allem in den ersten 80 m unterhalb der trophogenen Zone entsteht, d. h. zwischen 20 (30) – 100 m. Zur Entstehung eines Defizits können aber auch schon die darüber liegenden Schichten beitragen.

5.3.3.8.4 Dynamik der Konzentrationsänderungen

In Abb. 53 sind die fortlaufenden Veränderungen der Sauerstoff-Konzentration zwischen Mai 1979 bis September 1980 in ausgewählten Tiefen (12–20–30–40–50–75–100–150 und 175 m) dargestellt. Die 12-m-Schicht repräsentiert ein Geschehen, das m. E. für die gesamte trophogene Zone charakteristisch ist. Wie wir aus der vertikalen Temperaturverteilung wissen, ist sie

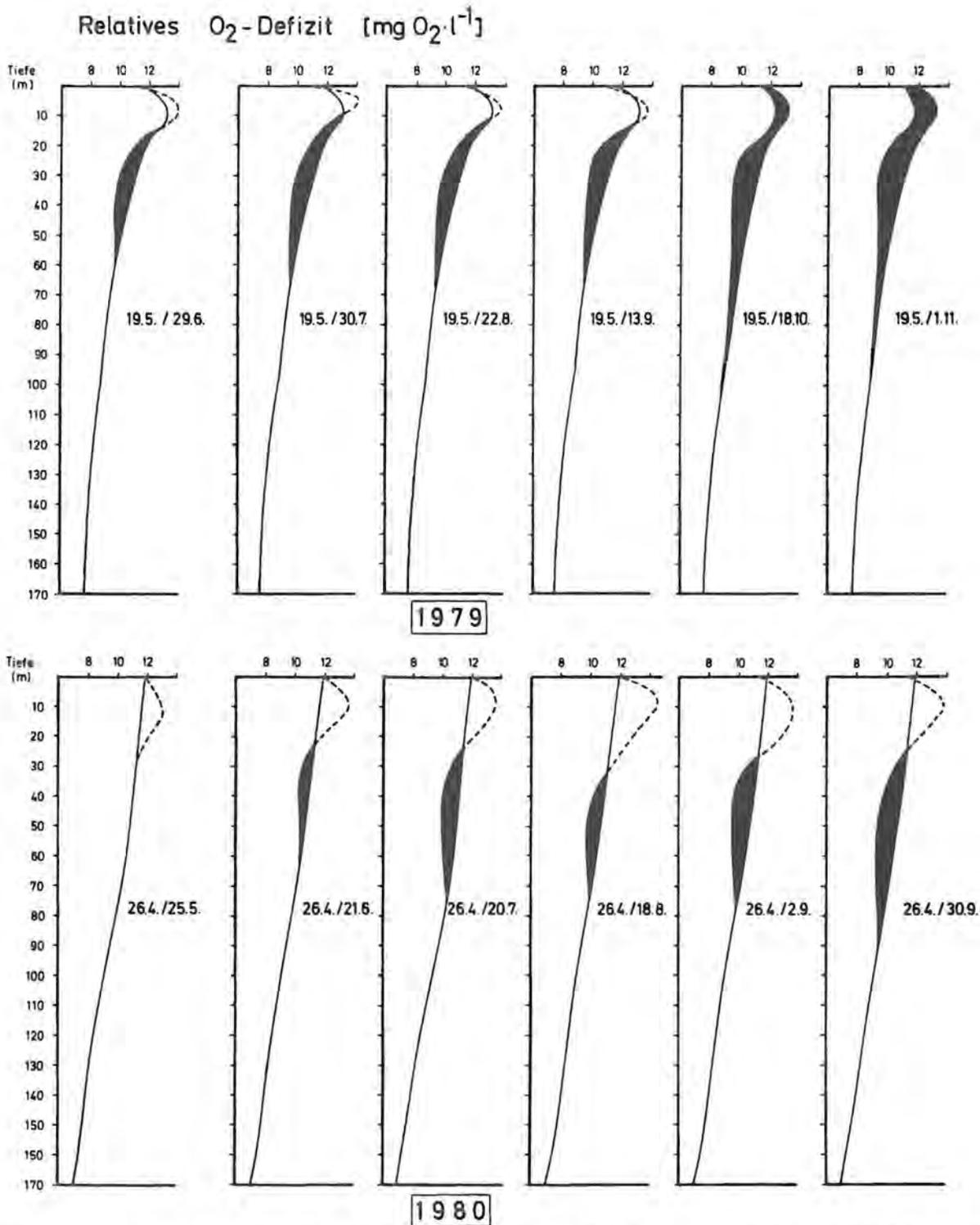


Abb. 52: Entwicklung des relativen Sauerstoff-Defizits im Königsee. 1979 bezogen auf die Sauerstoff-Verteilung vom 19. 5. und 1980 bezogen auf die Sauerstoff-Verteilung vom 26. 4.

vom Frühjahr bis November/Dezember thermisch geschichtet. Der durch phytoplanktische Photosynthese freigesetzte Sauerstoff kann daher in vertikaler Richtung nur sehr schwer verteilt werden. Er reichert sich daher in den betreffenden Schichten an.

Seine Konzentration nimmt erst dann wieder ab, wenn die Lichtverhältnisse für die Photosynthese mit fortschreitender Jahreszeit immer ungünstiger werden und nach Aufhebung der Temperaturschichtung ein Transport bis in die tropholytische Zone möglich ist. Aus der Feststellung, daß ab Dezember 1979 bis Mai 1980 in 20 m Tiefe die gleiche Sauerstoff-Konzentration vorliegt (in 12 m Tiefe durch Abnahme, in 20 m Tiefe

durch Zunahme), folgt, daß in diesem Bereich – zu dem selbstverständlich auch die Wasserschicht bis zur Seeoberfläche gehört – eine volle Durchmischung stattgefunden hat.

Die 20-m-Schicht repräsentiert m. E. die untere Grenze der trophogenen Schicht. Während der Temperaturschichtung im Jahre 1979 beobachten wir eine fortwährende Abnahme der Sauerstoff-Konzentration bis November. Anschließend wird das Defizit wieder aufgefüllt. Die Verhältnisse des Jahres 1980 zeigen jedoch, daß auch während der Temperaturschichtung schubweise eine gewisse Zunahme der Sauerstoff-Konzentration möglich ist. Dafür gibt es im Prinzip zwei ver-

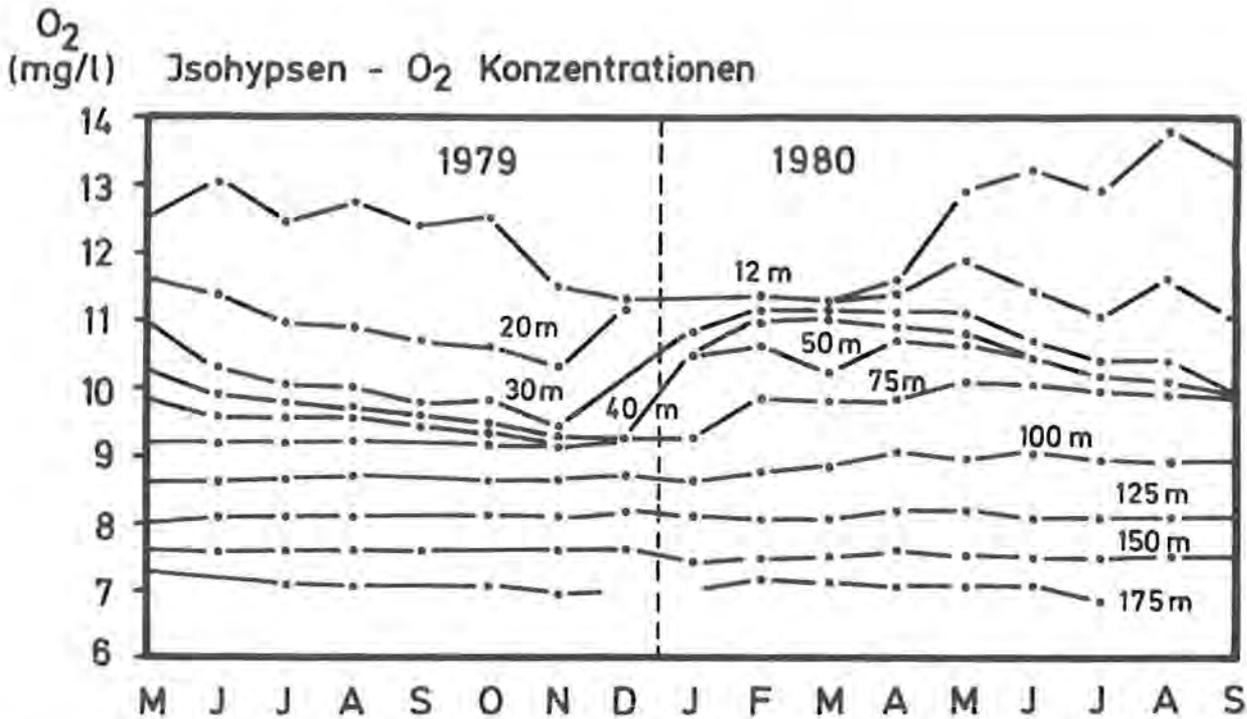


Abb. 53: Veränderung der Sauerstoff-Konzentration in verschiedenen Wassertiefen vom Mai 1979 bis September 1980. Man beachte den Unterschied zwischen den Tiefen 12, 20, 30, 40 und 50 m einerseits und den Tiefen 100, 125, 150 und 175 m andererseits.

schiedene Erklärungsmöglichkeiten: 1) eine zeitweilige Ausdehnung der trophogenen Zone (durch günstigere Einstrahlungsbedingungen) und 2) eine zeitweilige Erhöhung des vertikalen Austauschkoeffizienten (verstärkte Turbulenzen durch vorübergehende Windeinwirkungen).

In der 30-m-Schicht spielt sich dasselbe Geschehen ab wie in der 20-m-Schicht, jedoch mit einer bemerkenswerten Ausnahme: die im Verlauf der Sauerstoff-Zunahme erreichte maximale Konzentration bleibt in 30 m Tiefe etwas unter dem Niveau des in 20 m Tiefe gefundenen Maximalwerts. Daraus folgt, daß das Wasser in 30 m Tiefe nicht uneingeschränkt in den Durchmischungsprozeß einbezogen worden ist, der für die 0–20-m-Schicht gefordert werden muß. Die „Vollzirkulation“ endet somit zwischen 20 – 30-m-Wassertiefe.

In den Tiefen 40, 50 und stark abgeschwächt auch noch in 75 m beobachten wir dieselbe Charakteristik im Ablauf der Sauerstoff-Veränderungen wie in 30 m Tiefe. Dabei fällt auf, daß sich die Sauerstoff-Konzentrationen in den verschiedenen Tiefen während der Temperaturschichtung immer ähnlicher werden. Diese Entwicklung ist aber nicht Folge einer zunehmenden Durchmischung. Sie erklärt sich dadurch, daß die Sauerstoff-Konzentration in den Tiefen 30, 40 und 50 m abnimmt, während sie sich in 75 m Tiefe kaum ändert. Aus diesem Befund ziehen wir den Schluß, daß die Sauerstoff-Zehrung in Tiefen um 75 m wesentlich niedriger ist, als in der darüber liegenden Wasserschicht.

Auch in 100, 125, 150 und 175 m Tiefe ist während der Temperaturschichtung keine wesentliche Sauerstoffverminderung nachweisbar. Es fällt jedoch auf, daß es

zwischen Februar bis Mai 1980 in 75 m, und abgeschwächt auch noch in 100 m Tiefe, zu einer geringen Zunahme der Sauerstoff-Konzentration kommt. Demnach ist trotz der in Richtung Seegrund bestehenden Dichtezunahme zeitweise ein gewisser Sauerstoff-Transport in die Tiefe möglich.

Fassen wir nun die wichtigsten Ergebnisse dieser Analyse zusammen:

- 1) Hinsichtlich des vertikalen Wasseraustausches lassen sich im Königssee drei Schichten unterscheiden: a) eine **Oberflächenschicht** (0–20 m), die während der jahreszeitlich bedingten Zirkulationsphasen voll durchmischt wird, b) eine **Übergangsschicht** (20–100 m), die mit wachsender Tiefe immer weniger in den Durchmischungsprozeß einbezogen wird, den Jahresrhythmus aber deutlich zu erkennen gibt, und c) eine **Tiefenschicht** (100 m – Seegrund), in welcher es keine jahreszeitliche Rhythmik der Sauerstoff-Konzentration gibt, eine entsprechende Zirkulationsphase somit ausgeschlossen werden muß.
- 2) Hinsichtlich der Sauerstoff-Zehrung lassen sich ebenfalls drei Schichten voneinander unterscheiden: a) eine Oberflächenschicht, die mit der trophogenen Zone identisch und durch zeitweise hohe Sauerstoff-Produktion und anhaltend hohe Sauerstoff-Zehrung gekennzeichnet ist, b) eine Übergangsschicht zwischen 20–75 m mit abnehmender Zehrung und c) eine Tiefenschicht ab 75 m bis zum Seegrund, in welcher eine Zehrung kaum noch nachweisbar ist.

Diese Befunde waren Anlaß für einige spezielle Untersuchungen (Diplomarbeiten: R. Müller und R. Lehmann, s. Literaturverzeichnis), die im folgenden Abschnitt gesondert behandelt werden.

Tabelle 19 Daten zur Berechnung des Sauerstoff-Verbrauchs in der tropholytischen Zone (20–190 m) des Königssees					
Tiefenzone (m)	Volumen $\times 10^6 \text{m}^3$	O ₂ (mg/l) 26.4.80	O ₂ (mg/l) 30.9.80	ΔO_2 (mg/l)	Verbrauch (t)
20– 25	21,124	11,36	10,66	0,70	14,78680
25– 30	20,477	11,23	10,14	1,09	22,31993
30– 40	39,316	11,02	9,95	1,07	42,06812
40– 50	37,074	10,82	9,98	0,84	31,14216
50– 75	84,064	10,45	9,95	0,50	42,03200
75–100	71,993	9,61	9,42	0,19	13,67867
100–125	53,285	8,64	8,55	0,09	4,79565
125–150	45,869	7,90	7,80	0,10	4,58690
150–175	35,953	7,35	7,20	0,15	15,39295
175–190	10,605	7,35	6,90	0,45	4,77225
					Σ 185,57543

5.3.3.8.5 Größe und Tiefenabhängigkeit der Zehrung im Hypolimnion

In Abb. 54 ist das Hauptergebnis der bisherigen Betrachtungen zur Sauerstoff-Zehrung zusammenfassend dargestellt. Im Gegensatz zu Abb. 53 sind nicht einzelne Tiefen ausgewählt, sondern die beiden Tiefenschichten des Hypolimnions, die sich hinsichtlich ihrer Sauerstoff-Zehrung sehr wesentlich voneinander unterscheiden: die Übergangszone (20–75 m) und die Tiefenzone (100 m – Seegrund, in dem vorliegenden Fall bei 150 m Tiefe). Um etwaige „Störungen“ der Sauerstoff-Zehrung während der Temperaturschichtung durch gelegentliche Sauerstoff-Nachschübe aus der trophogenen Zone in die zu betrachtende Schicht zu erkennen, wurde deren Obergrenze für die Berechnungen von 20 m auf 25 m bzw. auf 30 m verlegt. Durch dieses Verfahren können entsprechende Störungen, die sich aus naheliegender Grund umso deutlicher zeigen, je geringer der Abstand zur trophogenen Zone ist, vor allem im Jahre 1980 erkannt werden. Die typischen Veränderungen der Sauerstoff-Konzentration setzen sich jedoch in jedem Fall klar durch und können durch Regressionslinien beschrieben werden. Auf dieser Basis läßt sich der gesamte Sauerstoff-Verbrauch innerhalb der tropholytischen Zone abschätzen. Hierzu wird – um das Beispiel des Jahres 1980 zu nehmen – als Ausgangsdatum der 26. 4. 80 vor Beginn der sommerlichen Temperaturschichtung gewählt (Tabelle 19). Zu diesem Zeitpunkt hat der Sauerstoff-Vorrat der tropholytischen Schicht seinen höchsten Jahreswert. Als Enddatum wird das Ende der Temperaturschichtung (30. 9. 80) gewählt, wenn der Sauerstoff-Vorrat seinen minimalen Jahreswert anzeigt. Auf diese Zeitspanne entfielen 1980 154 Tage und es ergab sich eine Abnahme des Sauerstoff-Vorrats um 185,6 Tonnen, woraus sich für den Sauerstoff-Verbrauch eine Rate von $0,029 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{Tag} = 0,86 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{Monat}$ ergibt. Damit liegt der hypolimnische Sauerstoff-Verbrauch des Königssees innerhalb der von Hutchinson (1938) für oligotrophe Seen angegebenen Spanne von $0,1–1,0 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{Monat}$.

5.3.3.8.6 Ursachen der tiefenabhängigen Zehrungsunterschiede

Für den Sauerstoffverbrauch in der tropholytischen Zone kommen grundsätzlich folgende Vorgänge in Betracht: 1) der mikrobielle Abbau (Dekomposition) organischer Substanzen während des Absinkens und nach der Sedimentation am Seegrund, 2) die Atmung (Respiration) der Algen, die in intaktem Zustand aus der trophogenen in die tropholytische Zone abgesunken sind und erst während des Absinkens eingehen, 3) die Atmung heterotropher Organismen (z. B. Zooplankter, Fische und am Seegrund die Benthosfauna), 4) Oxidation reduzierter anorganischer Verbindungen, z. B. NH_4^+ und NO_2^- .

Aufgrund der unterschiedlichen Verteilung dieser Komponenten sind auch entsprechende Unterschiede in der Zehrung denkbar. Für die beobachtete Abnahme der Sauerstoff-Zehrung mit zunehmender Tiefe kommen im wesentlichen zwei Gründe in Betracht: die Verminderung der Temperatur und die Verminderung des Anteils leicht abbaubarer organischer Substanzen durch den vorausgegangenen Abbau. Um wenigstens den Einfluß unterschiedlicher Temperaturen auszuschalten, wurde in einigen Orientierungsversuchen die Zehrungsrate experimentell bestimmt. Zu diesem Zweck (Abb. 55) wurden in verschiedenen Wassertiefen (20, 30, 50, 75, 100 und 150 m) Proben entnommen und nach Bestimmung der Sauerstoff-Konzentration (lichtdicht abgeschirmt) in ein und derselben Tiefe exponiert. Um in den Bereich meßbarer Unterschiede zwischen Ausgangs- und Endkonzentration zu gelangen, waren nach einigen Anläufen schließlich Expositionszeiten von vier Wochen erforderlich. Diese lange Zeit erschwerte den Vergleich mit den Verhältnissen außerhalb der Expositionsbehälter sehr. Dennoch zeigt das Ergebnis (Abb. 55) sehr klar den starken Unterschied in der Sauerstoff-Zehrung in Abhängigkeit von der Tiefe der Probenentnahme.

[mg O₂ / l]

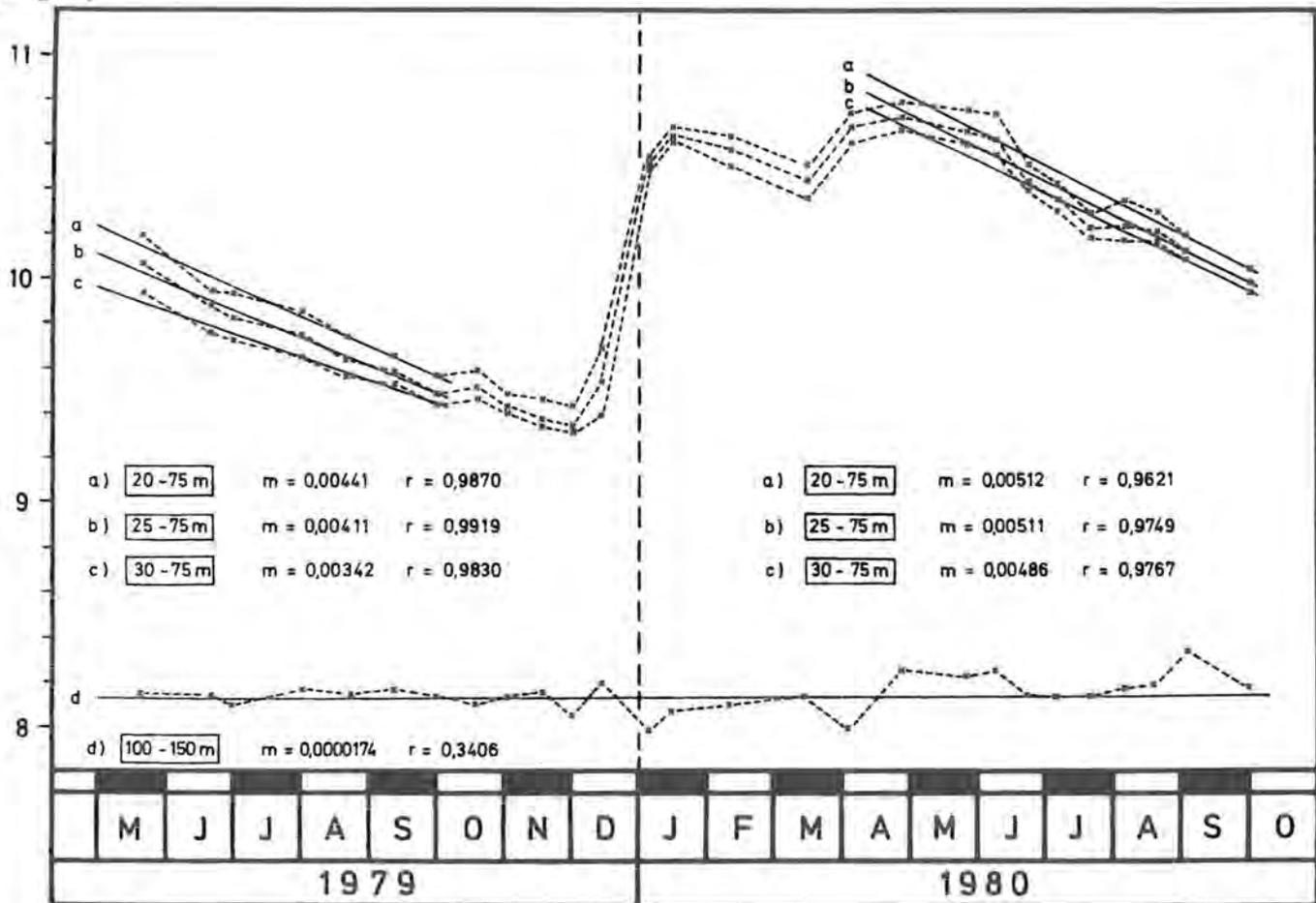


Abb. 54: Kontinuierliche Sauerstoff-Verminderung in den Tiefenschichten des Königssees während der sommerlichen Temperaturschichtung. Die starke Konzentrationszunahme ab November 1979 bis Februar 1980 und (etwas weniger ausgeprägt) zwischen März und April 1980 ist auf die vertikale Wasserdurchmischung zurückzuführen.

Im Rückblick auf den in Abb. 53 bzw. 54 dargestellten Befund deuten wir dieses experimentelle Ergebnis folgendermaßen: Die Dekomposition organischer Substanzen ist im Verlaufe des Absinkens bis zu einer Tiefe von ca. 70 m so weit abgeschlossen, daß unterhalb dieser Tiefe keine wesentliche Belastung des Sauerstoff-Vorrats erfolgt. Dafür kann es prinzipiell zwei Gründe geben: die abbaubare organische Substanz ist bis zu dieser Tiefe entweder vollständig oder mit Ausnahme der schwer abbaubaren Substanzen mineralisiert, so daß in jedem Falle kein wesentlicher weiterer Sauerstoff-Bedarf besteht. Einige weitere Untersuchungsergebnisse sprechen für die zweite Vorstellung.

Vergleicht man die in verschiedenen Tiefen vorhandenen Konzentrationen von Chlorophyll a bzw. von partikulärem, organisch gebundenem Kohlenstoff (POC), so ergibt sich folgendes (Abb. 56): Das relativ leicht abbaubare Chlorophyll a nimmt mit zunehmender Tiefe erheblich schneller ab als das POC, das aus leicht und schwer abbaubaren Verbindungen besteht. Von Letzterem gelangt daher noch ein erheblicher Anteil bis zum Seegrund. So sind in 75 m Tiefe immerhin noch ca. 40% der in der trophogenen Zone ermittelten POC-Konzentration vorhanden.

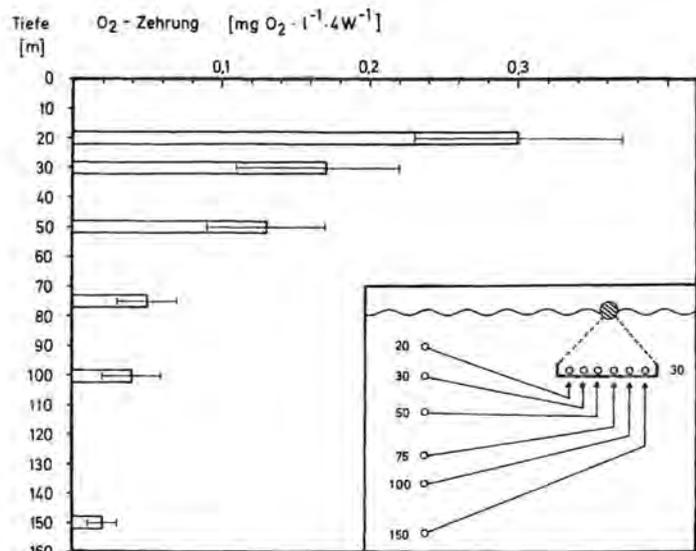
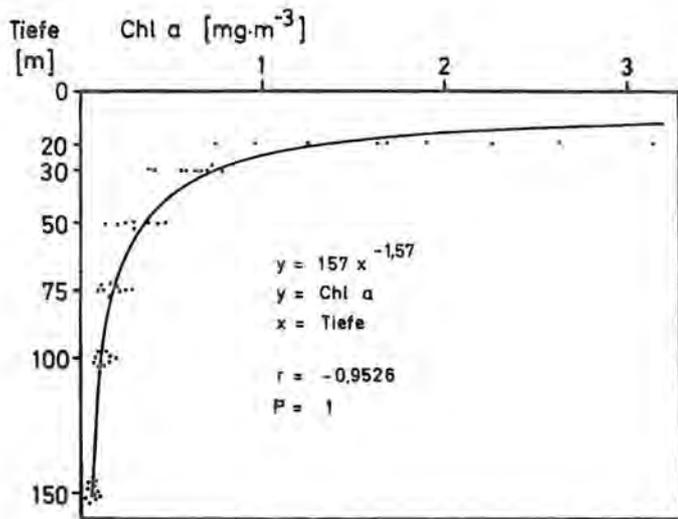


Abb. 55: Ergebnis der Zehrungsversuche im Königssee. Die Balken entsprechen der mittleren Sauerstoff-Abnahme in den Versuchsfラスchen im Zeitraum von 4 Wochen bei 4,3–4,4°C. Die eingeschobene Teilabbildung erläutert den Versuchsvorgang: Links sind die Tiefen von 20–150 m eingetragen, aus welchen die Wasserproben entnommen worden sind. Alle Proben wurden für 4 Wochen in 30 m Wassertiefe (tropholytische Zone) belassen. Aus dem Sauerstoff-Gehalt vor und nach dieser Zeitspanne ergibt sich eine Differenz, die dem Sauerstoff-Verbrauch entspricht.



Aus den in diesem Abschnitt geschilderten Experimenten bzw. Messungen ergibt sich somit, daß die bis in Tiefen um 75 m reichende relativ starke Sauerstoff-Zehrung vor allem auf die Dekomposition leicht abbaubarer organischer Substanzen zurückzuführen ist. Es ergibt sich weiterhin, daß mit etwa 40% ein beträchtlicher Anteil vorwiegend schwer abbaubarer organischer Substanzen den Seegrund erreicht. Für die Benthosorganismen ist dieses Material wahrscheinlich eine wichtige Nährstoffquelle. Es ist derzeit aber nicht abschätzbar, welches Gewicht in diesem Zusammenhang dem allochthonen organischen Material (Laub, Pollen u. a.) zukommt. Grundsätzlich muß damit gerechnet werden, daß der Anteil organischer Substanzen im Königsseesediment erheblich ist.

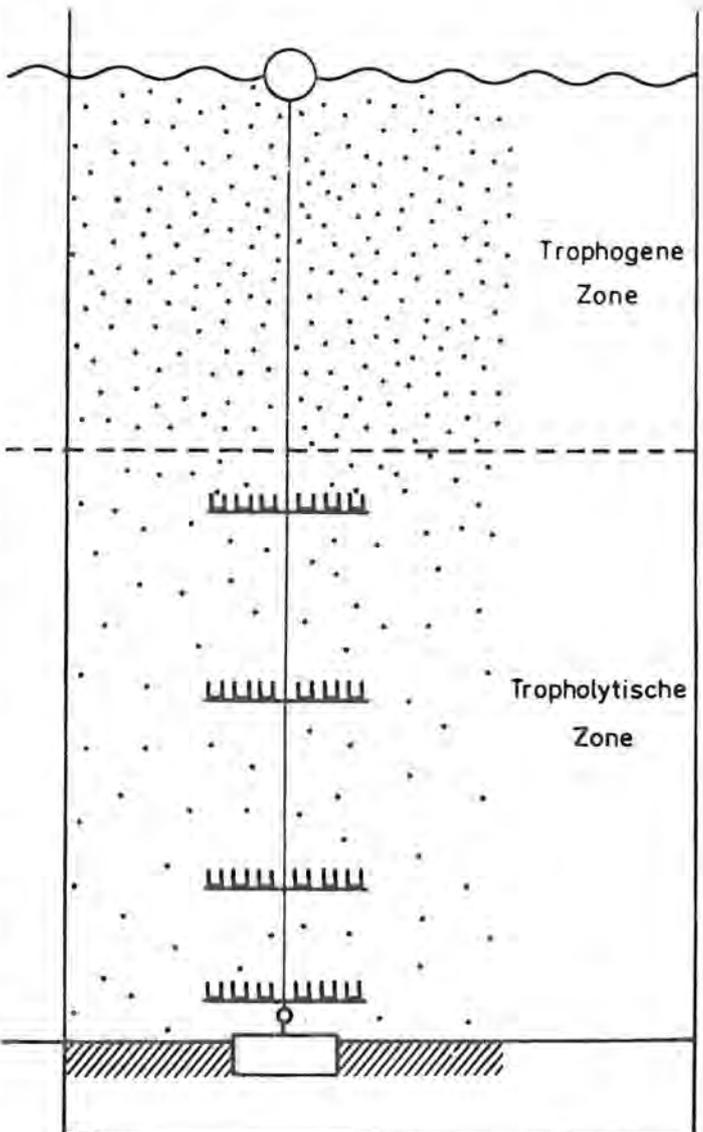
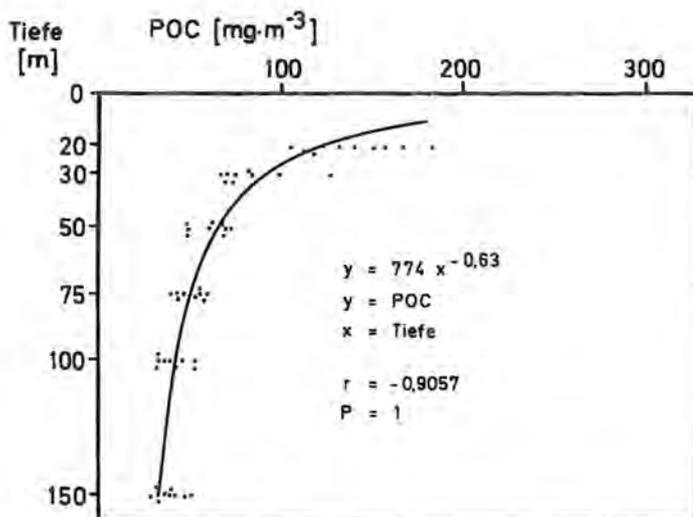


Abb. 56: Tiefenabhängigkeit der Konzentration von Chlorophyll a und von partikulärem organischem Kohlenstoff (POC) als Hinweis für den Abbau der betreffenden Substanzen während des Absinkens.

Für einen nicht zu vernachlässigenden Nachschub an organischer Substanz zum Seegrund durch Sedimentation sprechen auch die durchgeführten Sedimentationsmessungen. Zu diesem Zweck waren zwischen einer Verankerung am Seegrund und einer Boje (Abb. 57) in 7 verschiedenen Tiefen Sedimentationsfläschchen exponiert, deren Inhalt im 14-Tage-Abstand zwischen April bis Mitte Oktober 1980 auf die Größen Trockengewicht, Glühverlust, Chlorophyll, organischer Kohlenstoff und Carbonat analysiert worden ist. Abb. 58 zeigt (von oben nach unten) die in den angegebenen Tiefen und (von links nach rechts) zu den angegebenen Zeiten die für die Meßgröße Trockengewicht ermittelten Daten. In Verbindung mit Tabelle 20, in welcher neben den mittleren Trockengewichtswerten auch die Meßwerte für den Glühverlust (als grobes Maß für den Anteil der organischen Substanz) und den organisch gebundenen Kohlenstoff eingetragen sind, ergibt sich folgendes: Während des Absinkens zwischen 20–75 m (= 55 m) erfolgen durchwegs größere Substanzverluste als zwischen 75–170 m (= 95 m). Dies stimmt mit den zuvor behandelten Ergebnissen überein.

Abb. 57: Schema zur Sedimentationsmessung. In verschiedenen Wassertiefen sind innerhalb der tropholytischen Zone jeweils mehrere Sedimentationsgefäße aufgehängt. Sie sind nach oben geöffnet, damit die sedimentierenden Partikelchen aufgefangen werden können. Im freien Wasser eines Sees sind diese Partikelchen überwiegend abgestorbene Phytoplanktonorganismen (die in der trophogenen Zone produziert worden sind) mit den sie zersetzenden Bakterien.

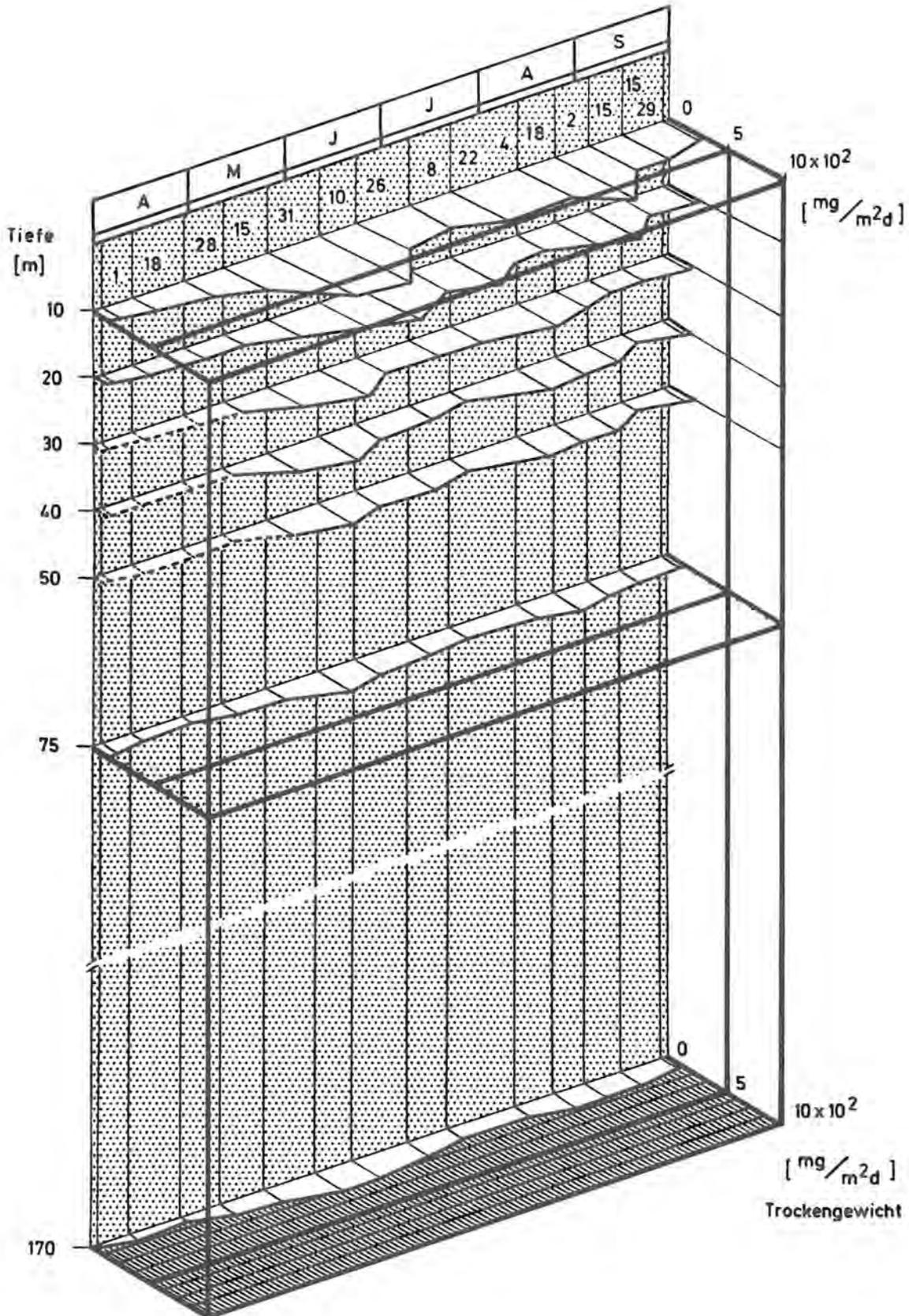


Abb. 58: Untersuchungen zur Sedimentation im Königssee von April (A) bis September (S) 1980. Die Zahlen von links nach rechts geben das Datum für die Beendigung der 14-Tage-Expositionszeit der Sedimentationsflaschen an, die in den angegebenen Wassertiefen von 10–170 m aufgehängt waren. Die Ergebnisse der Sedimentationsmessungen sind als Trockengewicht in $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{Tag}$ umgerechnet. Die Unterschiede in Abhängigkeit von der Zeit (von links nach rechts) sind auf Unterschiede in der Organismendichte zurückzuführen. Die Unterschiede in Abhängigkeit von der Tiefe sind eine Folge des mikrobiellen Abbaus der organischen Bestandteile des Sediments.

Tabelle 20		Sedimentationsanalysen (n = Zahl der Analysen)				
Tiefe	Trockengewicht (n=12)		Glühverlust (n=10)		Organischer Kohlenstoff (n=10)	
	mg/m ² d	%	mg/m ² d	%	mg/m ² d	%
20 m	653,4 ± 217,7	100	227,5 ± 77,8	100	97,7 ± 28,9	100
75 m	402,9 ± 118,1	61,7 ± 18,1	126,1 ± 56,1	55,4 ± 24,7	51,8 ± 18,0	53,1 ± 18,4
170 m	357,7 ± 98,5	54,8 ± 15,1	100,5 ± 50,4	44,2 ± 22,2	41,3 ± 16,21	42,3 ± 16,6

5.3.3.9 Zirkulations- und Schichtungsverhalten des Königssees – Konsequenzen aus den Ergebnissen der chemischen Analysen und der Tritium-Verteilung

Das Studium der jahreszeitlichen Temperaturänderungen hatte bereits gezeigt, daß Homothermie höchstens bis zu einer Ausdehnung von 120 m vorkam. Da die Leitfähigkeitswerte über die entsprechende vertikale Distanz nicht gleich waren, schied die Annahme einer von 0–120 m Tiefe reichenden Wasserzirkulation jedoch aus. Auch aus den Ergebnissen der chemischen Analysen ergab sich kein Hinweis auf eine Zirkulation bis in diese Tiefe, geschweige denn bis zum Seegrund. Die daraufhin im Rahmen einer Diplomarbeit (Müller 1981) besonders sorgfältig und häufig durchgeführten Untersuchungen über die Sauerstoff-Verteilung ließen eine wesentlich differenziertere Betrachtung zu (S. 68 ff.). Nach ihr sind drei Schichten zu unterscheiden, die in unterschiedlicher Weise in das Zirkulationsgeschehen einbezogen werden. Danach wird die obere 20-m-Schicht während der Zirkulationsphasen voll durchmischt, die 20–100-m-Schicht mit zunehmender Tiefe immer weniger und die anschließende Tiefenschicht anscheinend überhaupt nicht mehr im jahreszeitlichen Rhythmus (Abb. 53).

Diese Annahmen werden durch Spezialuntersuchungen gestützt, die von Herrn Dr. K.-H. Fischer vom Institut für Umweltp Physik der Universität Heidelberg an zwei Tagen (9.12.80 und 29.9.81) durchgeführt worden sind. Zum Verständnis des angewendeten Verfahrens erscheinen einige Vorbemerkungen zweckmäßig.

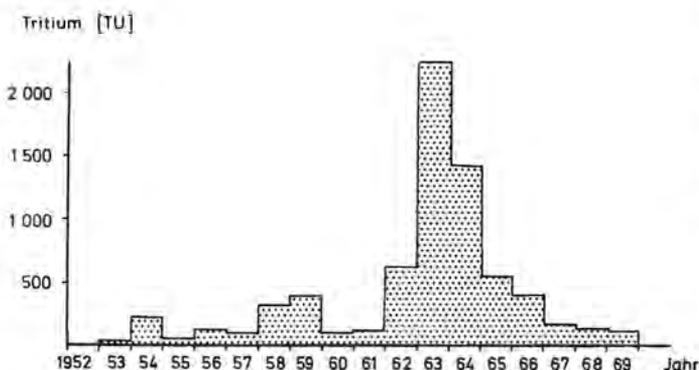


Abb. 59: Tritium-Konzentration im Regen Mitteleuropas in der Zeit zwischen 1952–1970 (nach Roether 1970, verändert).

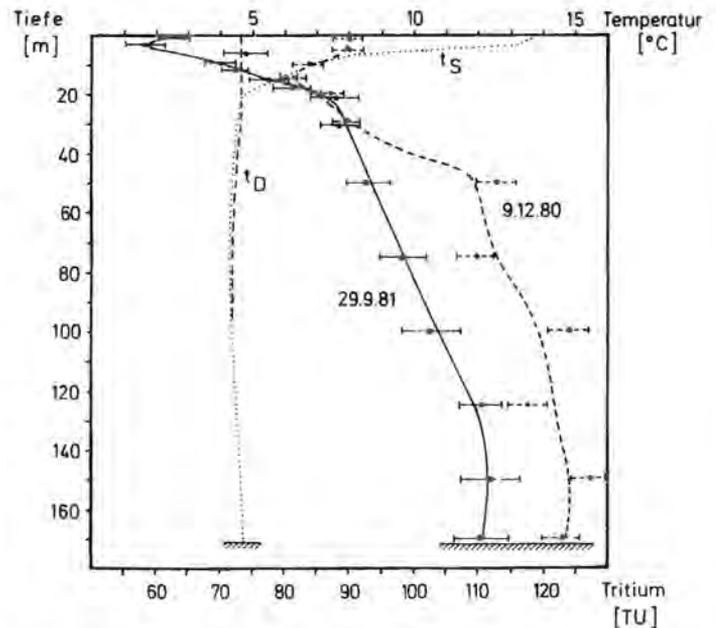


Abb. 60: Verlauf der Tritium-Konzentration in Tritium-Einheiten (1 TU: $^3\text{H}/^1\text{H} = 10^{-18}$) im Königssee während der winterlichen Teilzirkulation (Dezember 1980, strichliert) und während der herbstlichen Stagnation (September 1981). Temperaturverlauf t_S : September, t_D : Dezember (nach Angaben von Dr. K.-H. Fischer gezeichnet).

In natürlichen Gewässern kommt neben dem $^1\text{H}^1\text{HO}$ -Molekül in verschwindend geringer Menge auch das $^1\text{H}^3\text{HO}$ -Molekül vor, in welchem somit ein H-Atom durch ein Tritium-Atom (^3H) ersetzt ist. Die Halbwertszeit dieses radioaktiven Isotops, das unter der Einwirkung der Höhenstrahlung in der Atmosphäre mit einer Rate von ca. 0,25 Atomen/cm² · s entsteht, beträgt 12,3 Jahre. Für den ganzen Erdball ergeben sich daraus etwa $1,2 \cdot 10^3$ Mol $^1\text{H}^3\text{HO}$. Das Verhältnis von $^3\text{H} : ^1\text{H}$ beträgt rund 10^{-20} . Die Messung der Tritium-Konzentration erfolgt in TU (tritium units): bei 1 TU beträgt das Isotopenverhältnis $^3\text{H} : ^1\text{H} = 10^{-18}$. Bis zum Jahre 1953 betrug die mittlere Tritium-Konzentration in den Niederschlägen 4–6 TU. Durch die in den folgenden Jahren durchgeführten Atombombenversuche stieg die mittlere Tritium-Konzentration bis auf über 2000 TU (Abb. 59), um nach dem Kernwaffenstoppabkommen der Großmächte im Jahre 1963 wieder abzunehmen (Höltling 1980).

Die auf kurze Zeit befristete relativ hohe Tritium-Konzentration einerseits und die lange Halbwertszeit des

Zerfalls andererseits ermöglichen eine Altersdatierung des Wassers. So läßt sich zumindest abschätzen, ob das Tiefenwasser eines Sees aus Niederschlägen jüngeren oder älteren Datums stammt. Tiefenwasser, das sich zu einem erheblichen Anteil aus älteren Niederschlägen zusammensetzt, muß eine höhere Tritium-Konzentration besitzen als die Niederschläge aus jüngerer Zeit. Je mehr die Tritium-Konzentration des Seewassers jener der Niederschläge entspricht, desto gründlicher war demnach die Durchmischung zwischen älterem und jüngerem Wasser, wobei selbstverständlich die Abnahme der Radioaktivität mit fortschreitender Zeit in Rechnung gestellt werden muß.

Aus dem Verlauf der vertikalen Verteilung der Tritium-Konzentration vom Dezember 1980 läßt sich folgendes ablesen (Abb. 60): Es gibt im Königssee im wesentlichen drei übereinander liegende Wasserschichten, die sich hinsichtlich ihres Wasseraustausches mit jüngerem Wasser voneinander unterscheiden. 1) Eine Oberflächenschicht mit niedrigen TU-Werten von 0–20 m, die dementsprechend verhältnismäßig stark durchmischt, d. h. mit jungem Wasser ausgetauscht worden ist, 2) eine Übergangszone mit stark steigenden TU-Werten bis in ca. 50 m und 3) eine Tiefenzone mit relativ hohen TU-Werten.

Betrachten wir nun das Ergebnis der Messungen vom September 1981, so sind wiederum drei Wasserschichten voneinander zu unterscheiden: 1) eine mit der trophogenen Zone (0–20 m) zusammenfallende Wasserschicht, die sich durch eine starke Zunahme der TU-Werte mit zunehmender Tiefe auszeichnet, 2) eine Schicht von 20–120 m mit einer weniger starken TU-Zunahme und 3) eine Tiefenschicht zwischen 120 m – Seegrund mit keiner weiteren Zunahme. Unter Berücksichtigung eines radioaktiven Tritium-Zerfalls zwischen Dezember 1980 – September 1981 von ca. 5% errechnete Dr. Fischer für die Schicht zwischen 50–125 m eine Wassererneuerung durch Oberflächenwasser von maximal 45% und unterhalb 125 m von maximal 15%.

Die Unterschiede der TU-Konzentration innerhalb der trophogenen Zone zwischen den beiden Meßtagen belegen eindrucksvoll das Ausmaß der Durchmischung bis zu einer Tiefe von 20 m, bzw. der Nichtdurchmischung im September während der thermischen Schichtung. Unter Berücksichtigung der Temperatur- und der Sauerstoffsoplethen einerseits und des Verlaufs der TU-Konzentration andererseits ergibt sich zusammengefaßt, daß der Königssee weder 1979/80 noch 1980/81 während der Zirkulationsphase voll durchmischt worden ist. Ebenso sicher ist, daß es im Königssee kein Monimolimnion gibt (das ist eine Tiefenschicht, die vom Austausch mit den darüber liegenden Wasserschichten nahezu abgeschlossen ist).

Das besondere Zirkulationsverhalten des Königssees läßt sich noch besser erkennen, wenn wir seine Tritium-Verteilung mit jener des Lake Tahoe vergleichen (Imboden 1977). In diesem See sind über eine Tiefe von 450 m keine wesentlichen Unterschiede in der Tritium-Konzentration erkennbar (Abb. 61), d. h. daß ein wesentlich intensiverer Wasseraustausch möglich ist,

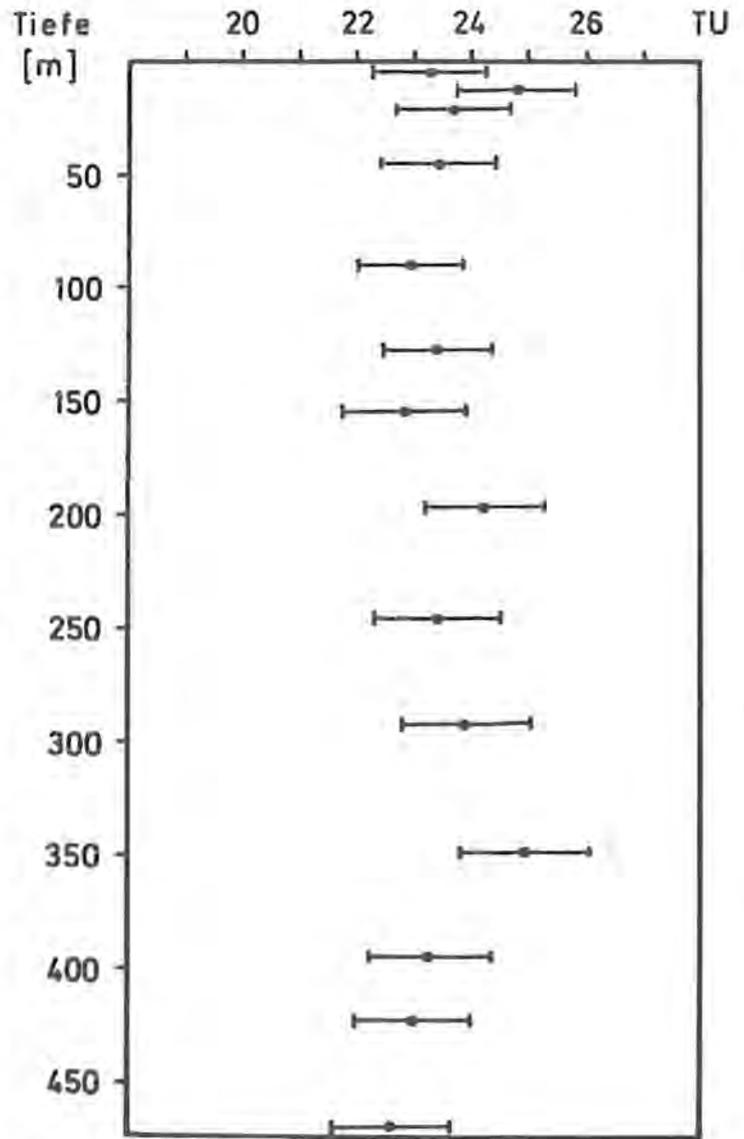


Abb. 61: Verlauf der Tritium-Konzentration im Lake Tahoe (nach Imboden et al. 1977, umgezeichnet).

obgleich man weiß, daß Vollzirkulationen nicht in jedem Jahre stattfinden.

Ein besonderes Interesse verdient aber auch der starke TU-Anstieg am Ende der Sommerstagnation in der trophogenen Zone des Königssees. Daraus folgt, daß die Mischung des oberflächlich zufließenden Wassers (Zuflüsse und Regenwasser) mit dem Seewasser während der Temperaturschichtung innerhalb der trophogenen Zone mit der Tiefe rasch abnimmt. Der zunächst zu beobachtende Abfall der Tritium-Konzentration (Oberfläche bis ca. 4 m) könnte darauf zurückzuführen sein, daß in dieser Tiefe die Haupteinschichtung des jungen Wassers erfolgt ist. Der anschließend erfolgende rasche Anstieg beweist, daß die Schichtung der trophogenen Zone während der Sommerstagnation kaum wesentliche Unterbrechungen erfahren hat.

Aus der Temperaturschichtung innerhalb der trophogenen Zone ergibt sich noch eine weitere wichtige Konsequenz. Es fällt auf, daß die vertikale Sauerstoff-Verteilung (Abb. 46) nicht dem für oligotrophe Seen typischen orthograden Verlauf entspricht (vgl. Abb. 30).

Durch die Existenz eines ausgeprägten Maximums in der trophogenen Zone und des sich nach der Tiefe zu anschließenden raschen Konzentrationsabfalls ähnelt sie vielmehr der – eutrophe Seen kennzeichnenden – klinograden bzw. positiv heterograden Sauerstoffkurve.

Letztere liefert den Ansatz zur Erklärung dieses scheinbaren Widerspruchs. Aus Abb. 30 ist zu entnehmen, daß in jedem Fall die Existenz eines Epilimnions angenommen worden ist, wie es dem Normalfall ja auch entspricht. In dieser Schicht ist ein vertikaler Austausch bekanntlich weitgehend möglich. Unter diesen Umständen kann sich nur im eutrophen See dennoch ein Sauerstoff-Maximum bilden. Innerhalb der ausgeprägten Sprungschicht des Königssees ist der vertikale Austausch aber so stark gehemmt, daß Akkumulationseffekte bereits bei relativ geringer Sauerstoff-Produktion ins Gewicht fallen. Die den eutrophen Seetyp vortäuschende Sauerstoffkurve ist somit eine Folge des innerhalb der Produktionszone stark behinderten vertikalen Austauschs.

Die Einschränkung des vertikalen Stoff- und Gasaustausches fördert aber nicht nur die Anreicherung von Stoffwechsel-Endprodukten. Sie fördert auch die Erhaltung nahrungsarmer Zonen, nachdem die dort zunächst verfügbaren Nährstoffe von den Phytoplanktern aufgenommen worden sind. Die thermische Schichtung in der Produktionszone des Königssees hat somit höchstwahrscheinlich zur Folge, daß die Ernährungsbedingungen für das Phytoplankton ungünstiger sind, als sie es bei Ausbildung eines Epilimnions wären.

5.4 Abschätzung des Nährstoffimports

Nährstoffe gelangen wie alle übrigen Substanzen entweder aus dem Einzugsgebiet oder unmittelbar über die Niederschläge in den See. Quantität und Qualität der Nährstoffzufuhr aus dem Einzugsgebiet hängen von dessen geologischen und klimatischen Eigenschaften ab, von der Art seiner Böden, der Vegetation, der Besiedlungsdichte der heterotrophen Organismen einschließlich der Menschen und deren Produktionsmethoden.

Der Einfluß des Menschen macht sich seit vielen Jahren auch über den atmosphärischen Materialtransport bemerkbar. Seine qualitative und quantitative Zusammensetzung hat sich in den letzten Jahrzehnten erheblich geändert und es ist unvermeidbar, daß die relativ kleinen, wie Inseln inmitten einer hochzivilisierten Landschaft gelegenen Naturschutzgebiete von diesen anthropogenen Wirkungen betroffen werden (z.B. Schwefeldioxyd-Transport in den Bayerischen Wald). Wenn vom Nährstoffimport in den Königssee die Rede ist, so sind demnach folgende Komponenten zu unterscheiden:

- 1) Nährstoffimporte über Bäche und Grundwasser;
- 2) Nährstoffimporte über Niederschläge auf die Seeoberfläche.

Über die hinsichtlich ihrer Herkunft unterschiedlichen Nährstoffimporte liegen bisher keine Untersuchungen vor. Wir müssen uns daher mit Schätzungen begnügen und schränken dabei unsere Betrachtungen auf Phosphat, Stickstoff und Silikat ein. Mit dieser Einschränkung unterstellen wir, daß die übrigen Komponenten der Nährstoffe im Überschuß vorliegen und ihre wechselnden Importgrößen daher von untergeordneter Bedeutung sind.

Was die Nährstoffimporte durch Niederschläge (Tabelle 21) betrifft, so ist nach Scheffer-Schachtschabel (1979) in der BRD mit 20 – 200 kg P/km² Jahr zu rechnen. Unseren Berechnungen liegt die für das Voralpengebiet ermittelte Menge von 60 kg P/km² Jahr (Hamperschl. Mitteilung) zugrunde. Im Falle des Stickstoffs wurde der Mittelwert 1620 kg/km² Jahr gewählt.

Die Ergebnisse der auf diesen Ausgangswerten (Tabelle 21) beruhenden Berechnungen können nur als grobe Schätzungen aufgefaßt werden. Sie sind in Tabelle 22 zusammengestellt. Für Phosphor ergibt sich ein Import von 1048 kg/Jahr aus dem Einzugsgebiet und von 313 kg/Jahr über die Niederschläge auf den See. Die entsprechenden Daten für Stickstoff lauten: 131100 kg/Jahr aus dem Einzugsgebiet und 8400 kg/Jahr über die Niederschläge.

Die Ergebnisse entsprechender Schätzungen, die jedoch nur z. T. auf den Ausgangsdaten (Import über die Niederschläge) beruhen, im übrigen aber auf Konzentrationsmessungen in den Zuflüssen, sind in Tabelle 23 zusammengestellt und mit einem Stern besonders gekennzeichnet. Sie sind ebenfalls nur als grobe Schätzungen zu verstehen, weil es nicht möglich war, die Schüttung der Zuflüsse über den betreffenden Zeitraum hinweg zu registrieren. Die Frachten wurden daher aus den monatlichen Niederschlagshöhen und der Größe der orographischen Einzugsgebiete der einzelnen Zuflüsse berechnet und ergaben: 895 kg P/Jahr, 119194 kg N/Jahr und 152984 kg SiO₂/Jahr.

Den Berechnungen des Exports wurden die monatlichen Mengen des Königssee-Abflusses und die Monatsmittel der betreffenden Konzentrationen in der trophogenen Zone zugrunde gelegt. Die ebenfalls in Tabelle 23 zusammengestellten Daten für den Export lauten: 1006 kg P/Jahr, 89825 kg N/Jahr und 68238 kg SiO₂/Jahr.

Berücksichtigt man neben dem Import über das Einzugsgebiet auch den Import über die Niederschläge, so lassen sich nun nach Abschätzung der Exporte die Größen der Nettoimporte ermitteln. Sie sind – nach beiden Schätzverfahren berechnet – ebenfalls in Tabelle 23 für die in Frage kommenden Substanzen angegeben. Vergleicht man die Ergebnisse der nach beiden Schätzverfahren ermittelten Werte miteinander, so sind sie verhältnismäßig ähnlich. Das sagt jedoch wenig über ihre Güte aus. Über sie kann erst nach genaueren Untersuchungen befunden werden.

In den der Schätzung zugrundeliegenden Ausgangsdaten ist ein etwaiger Einfluß des Menschen nicht ent-

Tabelle 21 Nährstoffimporte (Ausgangswerte für Abschätzungen)			
Element	über Niederschläge (kg/km ² · J)	über Auswaschung (kg/km ² · J)	über den Menschen (g/P · T)
Phosphor (P)	60 ³⁾ (Bereich 20–200) ¹⁾	8 Wald (1–5) : 3 ²⁾ ungenutztes Land: (2–8) : 5 ²⁾	1,9
Stickstoff (N)	1620 (Bereich 1410–1830) ³⁾	1000 ³⁾	13

¹⁾ Scheffer-Schachtschabel 1979 ²⁾ Ambühl pers. Mitt. ³⁾ Hamm pers. Mitt. – nur anorg. N-Verbindungen

Tabelle 22 Nährstoffimporte (Schätzwerte vgl. Tabelle 21)		
Herkunft	Phosphor P (kg · J ⁻¹)	Stickstoff N (t · J ⁻¹)
Niederschläge auf Seeoberfläche	313	8,4
Einzugsgebiet Königssee	1048	131,1
Menschen*) Sallet + St. Bartholomä	422,5 + 20% <u>84,5</u> 507,0	2,9

*) Es wird von den Besucherzahlen der Staatlichen Verwaltung Königssee von Januar–Dezember 1980 ausgegangen: Hin- und Rückfahrt Königssee–Sallet 294 861 Personen und Hin- und Rückfahrt Königssee–St. Bartholomä 372 231 (Summe: 667 092). Wegen der begrenzten Aufenthaltsdauer der Besucher werden 3 Besucher = 1 Einwohnerwert + 20% Spülmittel gesetzt.

Tabelle 23 Nährstoffbilanzen nach Ausgangsdaten (vgl. Tabelle 21) geschätzt bzw. aufgrund von Messungen errechnet (kg/Jahr)					
Nährstoffe	Import Zuflüsse (Z)		Import Niederschläge (N)	Export Abfluß (E)	Nettoimport (Z + N – E)
PO ₄ -P	1048	895*)	313	1006*)	202 355*)
NO ₃ -N	131100	119194*)	8400	89825*)	49675 37769*)
SiO ₂	152984*)		–	84746*)	68238*)

*) Aus gemessenen Werten errechnet.

halten, denn es wurden Daten verwendet (Tabelle 21), die aus Wald- und ungenutzten Landgebieten ermittelt worden waren. Er ist jedoch in den zufließenden Nährstoffen enthalten, die gemessen und in einem der beiden Schätzverfahren berücksichtigt worden sind. Wie groß der anthropogene Anteil ist, kann nicht ohne weiteres beurteilt werden. Wahrscheinlich ist er vernachlässigbar gering.

Es fragt sich nun, ob der Nährstoffeintrag im Raum St. Bartholomä und Sallet, der nicht über offene Zuflüsse, sondern nur über Sickerwasser möglich ist, ebenfalls vernachlässigt werden kann. Bei der Behandlung dieser Frage sind wir jedoch wiederum auf Schätz-

zungen angewiesen. Wir müssen davon ausgehen, daß der Mensch pro Tag 1,9 g P und 13 g N aus seinem Stoffwechsel entläßt. Nun müssen wir wissen, wieviele Menschen St. Bartholomä und Sallet besuchen und wie lange sie dort verweilen. Für das Jahr 1980 gibt die Staatliche Verwaltung Königssee eine Besucherzahl von 667 092 an. Bedenkt man, daß die Funktion des Menschen als Nährstofflieferant im allgemeinen auf die Tageszeit (12 Stunden) beschränkt ist und die Aufenthaltsdauer von vier Stunden wohl kaum überschritten wird, so entfallen auf die Größen 1,9 g P und 13 g N jeweils drei Personen pro Tag. Wir setzen somit drei Besucher = 1 Einwohnerwert, so daß sich die Besucherzahl in 222 364 Einwohnerwerte umrechnen läßt. Dar-

aus ergeben sich 422,5 kg P/Jahr und 2,9 t N/Jahr. Dem derzeit immer noch starken Einsatz phosphathaltiger Waschmittel wollen wir durch einen Aufschlag von 20% (Bucksteg, persönl. Mitteilung) Rechnung tragen. Der jährliche Import nach St. Bartholomä und Sallet beträgt in dem gegebenen Beispiel somit 507,0 kg P/Jahr.

Ogleich es sicher ist, daß die nach dem Ausfaulen freier werdende P-Menge nicht unmittelbar und vollständig in den Königssee gerät, ist es derzeit völlig ausgeschlossen, die Größe dieses Imports abzuschätzen. Sicher ist jedoch, daß das Nährstoffdepot immer größer wird, wenn die Zufuhr zu diesem Depot größer ist als die Abgabe aus diesem Depot in den See. Dem Anwachsen des Nährstoffdepots sollten in den z.T. groben Hangschuttmassen um St. Bartholomä und Sallet jedoch enge Grenzen gesetzt sein. Wenn dem Königssee nicht jetzt schon Gefahr droht, so ist sie jedenfalls im Laufe der Zeit unvermeidbar, zumal die vorhandenen Kläranlagen in St. Bartholomä und Sallet mangels Nährstoffrückhaltung ohne Bedeutung sind. Es besteht daher kein Zweifel, daß bereits zum gegenwärtigen Zeitpunkt nach geeigneten Lösungen gesucht werden muß. Im Augenblick fehlen zwar noch genaue Informationen über den „diffusen“ jährlichen Eintrag in den See, doch sei an die bereits erwähnten Befunde erinnert, wonach im Nahbereich um St. Bartholomä bzw. Sallet – wenn auch nur gelegentlich – die bisher höchsten Werte von reaktivem Phosphat (vgl. S. 63) gemessen worden sind. Der jährlich bei St. Bartholomä und Sallet abgelagerte Phosphor würde nach seiner Einfuhr in den See folgendes bewirken: In die trophogene Zone verbracht, könnten dort durch 507,0 kg P ca. 50,7 t organische Substanz aufgebaut werden ($1 \text{ g P} \triangleq 100 \text{ g Biomasse}$), deren Abbau in der tropholytischen Zone den Sauerstoffhaushalt mit ca. 76 t/Jahr belasten würde ($1 \text{ g P} \triangleq 150 \text{ g BSB}$). Die für die tropholytische Zone während der sommerlichen Schichtung berechnete Zehrung von $0,86 \text{ g/m}^2$ Monat würde dadurch auf $1,2 \text{ g/m}^2$ Monat ansteigen. In Anbetracht der begrenzten Zirkulation des Tiefenwassers wären negative Auswirkungen nicht zu vermeiden. Derartige Berechnungen sind unrealistisch, weil über den zeitlichen Verlauf des P-Imports keine Daten bekannt sind. Immerhin eignen sie sich, um auf die potentielle Gefahr hinzuweisen.

5.5 Abschätzung der kritischen Belastungsgrenzen

Es war bereits an anderer Stelle darauf hingewiesen worden, daß die Schlüsselfunktion des Pflanzennährstoffes Phosphat einerseits auf seinem geringen Angebot in natürlichen Gewässern beruht und andererseits auf dem beträchtlichen Bedarf zum Aufbau pflanzlicher Biomasse. So ist es nicht verwunderlich, daß die mit den Produktionseigentümlichkeiten und Konsumgewohnheiten des Menschen immens gesteigerte Phosphatzufuhr in die Gewässer zu dramatischen Veränderungen in der Wasserqualität geführt hat. In der Praxis hat diese Entwicklung bewirkt, Mittel und Wege zu suchen, um die Phosphatzufuhr zu bremsen und die Phosphatelimination zu verbessern. Der limnologischen Grundlagenforschung bot sich mit dieser Ent-

wicklung aber auch die Gelegenheit, das Problem der Beziehungen zwischen den Nährstoffen und dem Aufbau pflanzlicher Biomasse in Seen auf Phosphat einzuschränken. Dabei läßt sich der Vorteil ausnutzen, daß Phosphor immer als Phosphat und nicht wie z.B. der Stickstoff in mehreren Oxidationsstufen vorkommt. So ist es möglich, das Problem seiner Verfügbarkeit für die Pflanzen vor allem unter dem Gesichtspunkt der morphometrischen und hydrographischen Eigenschaften der Seen zu studieren. Nicht weniger wichtig ist der Umstand, daß auf dieser Grundlage die Möglichkeit besteht, das Problem der Eutrophierung unmittelbar zu analysieren und nicht – wie noch vor ca. 25 Jahren – nur die komplexen Folgen dieses Vorgangs.

Die typischen Eutrophierungsfolgen werden im allgemeinen nur beobachtet, wenn ein anhaltender Nährstoffnachschub gesichert ist. Über Zuflüsse ist das grundsätzlich möglich. Genügt es nun, die Phosphatkonzentration in den Zuflüssen zu kennen, um vorauszusagen, welche Entwicklung der See nehmen wird? Nein, denn bei geringer Wasserschüttung werden dem See weniger Nährstoffe zugeführt als bei großer. Kommt es demnach auf die Gesamtmenge der Zufuhr (= Konzentration x Wasserschüttung) innerhalb eines gegebenen Zeitabschnittes an? Auch diese Information genügt nicht, denn in einem großen See wird die Zufuhr stärker verdünnt als in einem kleinen. Wir müssen auch berücksichtigen, daß ein Teil der von den Pflanzen aufgenommenen Nährstoffe durch Sedimentation zum Seegrund gelangt, dort durch den Abbau der organischen Substanzen freigesetzt und den Algen in der trophogenen Zone später wieder zugeführt wird. Diese Nährstoffrückführung ist in einem flachen See leichter möglich als in einem tiefen. Ein tiefer See kann somit höhere Nährstoffimporte „verkräften“, bevor er mit verstärktem Algenwachstum antwortet. Die kritische Belastungsgrenze liegt beim tiefen See somit höher als beim flachen See. Was aber ist für den See kritisch? Aufgrund zahlreicher Ergebnisse kann man sagen (Vollenweider 1968), daß ein Phosphor-Import, der z. Zt. der Frühjahrszirkulation eine Gesamtphosphat-Konzentration von $10 - 20 \mu\text{g P/l}$ sichert, mit großer Wahrscheinlichkeit ausreicht, um die bekannten Eutrophierungsfolgen auszulösen. $10 \mu\text{g P/l}$ können als untere und $20 \mu\text{g P/l}$ als obere Grenze bezeichnet werden. Oberhalb von $20 \mu\text{g P/l}$ sind bereits so hohe Algendichten zu erwarten, daß sie mit dem treffenden Ausdruck „Wasserblüte“ bezeichnet werden können.

Die Frage ist nun, wie groß muß der Phosphorimport in einen See sein, damit er diese kritische Konzentration erreicht? Unter Berücksichtigung der heutigen Situation unserer Gewässer wird man die Frage aber besser so formulieren: Wie groß darf der Phosphorimport höchstens sein, damit die Konzentration im See unter der kritischen Grenze bleibt? Mit dieser Frage kommen wir wieder auf diejenigen Eigenschaften eines Sees zurück, die den Wirkungsgrad des Phosphorimports beeinflussen. Zu ihnen zählen 1) die mittlere Tiefe (\bar{z}) des Sees, denn: je tiefer der See, desto mehr wird der Nährstoffimport verdünnt, 2) die Wassererneuerungszeit (T_w), denn: je kürzer sie ist, desto größer ist der Auswascheffekt und 3) die Nährstoffretention (R_c), denn: je

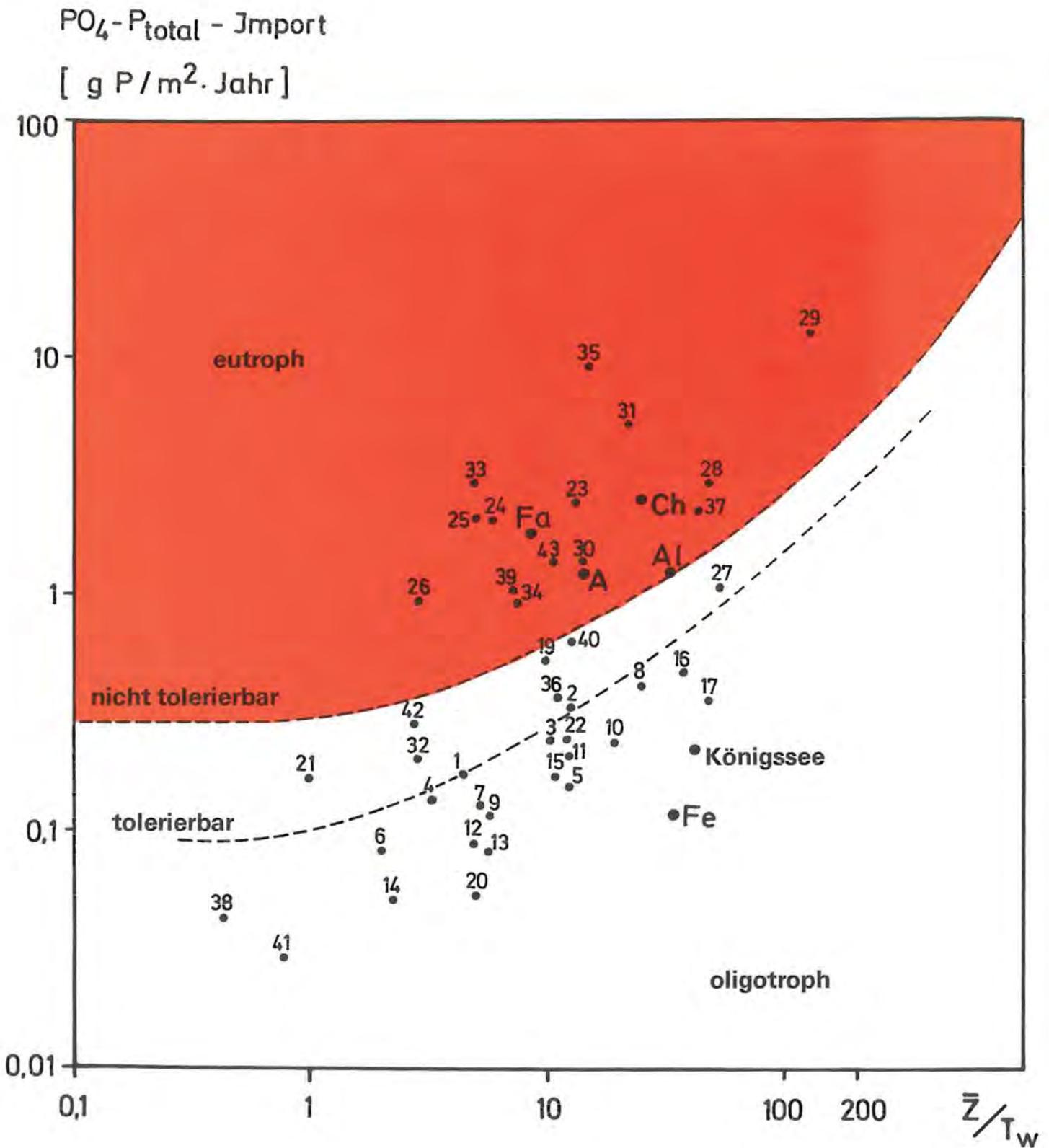


Abb. 62: Vollenweider-Diagramm zur Ermittlung der kritischen Phosphor-Importe in Abhängigkeit von mittlerer Tiefe (\bar{z}) und Wassererneuerungszeit (T_w). Die Seen im roten Teil des Diagramms sind eutroph. Ihr P-Import liegt oberhalb der kritischen Grenze. A Ammersee, Al Großer Alpsee, Ch Chiemsee, Fa Fasanerie-See, Fe Feldsee.

- | | | | | | |
|--------------------|----------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------|--------------------|
| 1 Wörthersee | 9 Turner See | 17 Lunzer Untersee | 25 Hallwilersee | 32 Lago di Montorfano | |
| 2 Millstätter See | 10 Gösselsdorfer See | 19 Lago di Mergozzo | 26 Sempachersee | 33 Lago di Annone | 40 Lake Ontario |
| 3 Ossiacher See | 11 Rauschelesee | 20 Piburger See | 27 Vierwaldstättersee-Kreuztrichter | 34 Lago del Segrino | 41 Lake Superior |
| 4 Weissensee | 12 Maltschacher See | 21 Lake Mendota | | 35 Lago d'Alserio | 42 Lake Michigan |
| 5 Keutschacher See | 12 St.-Urban-See | 22 Attersee | | 36 Lac d'Annecy | 43 Lake Washington |
| 6 Klopeiner See | 14 Kraiger See | 23 Greifensee | | 28 Lago Maggiore | |
| 7 Längsee | 15 Vassacher See | 24 Baldeggersee | | 29 Zürichsee-Obersee | |
| 8 Afritzer See | 16 Leonhardsee | | | 30 Lac Léman | |
| | | | | 31 Lago di Pusiano | |
| | | | | 37 Lac Nantua | |
| | | | | 38 Lake Tahoe | |
| | | | | 39 Lake Erie | |

Tabelle 24

Kritische Belastungsgrenzen, nach verschiedenen Berechnungsverfahren (1.–4.) *) ermittelt
(alle Daten außer Königssee nach verschiedenen Autoren aus Tilzer 1979)

See	Trophie- zustand	Limnologische Grundparameter zur Berechnung der Belastungsgrenzen					Belastungsgrenzen (mg P/m ² · Jahr)				
		Mittlere Tiefe \bar{z}	Durchfluß- grad ρ_w/J	Aufenthaltszeit des Wassers $T_w(J)$	Hydraulische Belastung q_s (m/J)	Sedimentations- Koeffizient f. P $\sigma/J = 10/\bar{z}$	1.	2.	3.	4.	$\bar{x} \pm 5\%$
Königssee	oligotroph	98,1	0,43	2,35	41,74	0,102	391	517	999	1057	741 ± 40
Vorderer Finstertalersee	oligotroph	14,8	2,5	0,4	37	0,676	126	470	435	604	200 ± 21
Ossiacher See	mesotroph	19,9	0,5	2,0	10,0	0,50	150	200	223	241	204 ± 19
Millstätter See	mesotroph	91,0	0,12	8,3	11	0,11	374	209	434	426	361 ± 29
Lake Tahoe	ultraoligotroph	313	0,0014	700	0,447	0,032	785	104	104	123	279 ± 121
Lake Washington	eutroph	32,9	0,43	2,3	14,1	0,30	203	243	339	356	285 ± 26

*) 1: $L_c = 25 \cdot \bar{z}^{0,6}$ (Vollenweider 1968)

2: $L_c = 100 + 10 \bar{z}/T_w$ (Dillon & Rigler 1974)

3: $L_c = 17 (\bar{z}/T_w)^{0,6} \cdot \bar{z}^{0,4}$ (Vollenweider 1976)

4: $L_c = 10 q_s (1 + \sqrt{T_w})$ (Vollenweider 1976)

Tabelle 25		Gesamt-Phosphor-Import (vgl. Abb. 62)		
See	Mittlere Tiefe \bar{z}	\bar{z}/T_w	Import P $g/m^2 \cdot \text{Jahr}$	Referenzen
Königssee	98,1	42,6	0,23	
Ammersee	37	14,8	1,23	BLW 1978
Chiemsee	25,6	20,5	2,45	BLW 1976
Fasanerisee	5,7	8,4	1,74	Siebeck 1975
Genfer See	155	12,8	0,70	Vollenweider u. Dillon 1974
Großer Alpsee	13,6	27,2	1,1	BLW 1979
Starnberger See	53,2	2,5	0,42	Steinberg, pers. Mitteilung

mehr Nährstoffe im See durch Sedimentation vom Export ausgeschlossen werden, desto größer die „interne Düngung“, d. h. die Rückführung von Nährstoffen aus der tropholytischen in die trophogene Zone.

Mit diesen und anderen Größen haben sich zahlreiche Forscher – wie Vollenweider, Dillon, Rigler, Lorenzen, Imboden – befaßt, um die kritischen Belastungsgrenzen zu definieren. Einige der von ihnen formulierten Beziehungen sind in Tabelle 24 berücksichtigt worden. In den Spalten 1. – 4. sind die nach diesen 4 Verfahren ermittelten kritischen Belastungsgrenzen der betreffenden Seen eingetragen. Sie liegen für den Königssee zwischen $0,391 - 1,057 g P/m^2 \text{Jahr}$ – Mittelwert: $0,741 \pm 0,40 g P/m^2 \text{Jahr}$ – und damit wesentlich über dem geschätzten P-Import von $0,23 g P/m^2 \text{Jahr}$. Das ergibt sich auch aus Abb. 62, der eines der ersten Modelle von Vollenweider (1974) zugrunde liegt. Wir sehen, daß der Königssee unter den zahlreichen, im Rahmen des Internationalen Biologischen Programms bzw. des „OECD-Programmes Alpine Lakes“ untersuchten Seen weit unterhalb der tolerierbaren Grenze im Bereich der oligotrophen Seen liegt. Auch im Vergleich mit den bayerischen Seen (z. B. Chiemsee und Ammersee), die vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft daraufhin untersucht worden sind, nimmt der Königssee eine besonders günstige Position ein (vgl. auch Tabelle 25). Das ergibt sich auch, wenn wir unseren Betrachtungen die von R. und H. Schröder (1978) entwickelte Modellvorstellung zugrunde legen (Abb. 63).

Das gegenwärtige Erscheinungsbild des Königssees und die erheblich über dem gegenwärtigen P-Import liegende kritische Belastungsgrenze sprechen dafür, daß der Zustand des Königssees derzeit ungefährdet ist. Dennoch erscheint Vorsicht geboten, und zwar aus folgenden Gründen:

- 1) Das anthropogene Nährstoffdepot bei St. Bartholomä und bei Sallet nimmt fortlaufend zu.
- 2) Aufgrund des geschilderten Zirkulationsverhaltens ist der Königssee auf dem Wege zu einem meromiktischen See. Da die Modelle zur Bestimmung der kritischen Belastungsgrenzen unterschiedliche Durch-

mischungsverhältnisse nicht berücksichtigen, ist ihre Anwendbarkeit auf den Königssee u. U. nicht ohne wesentliche Einschränkung möglich. Die Einschränkungen werden wahrscheinlich umso gravierender, je weiter sich der Königssee in Richtung Meromixie entwickelt.

- 3) Die angewendeten Modelle berücksichtigen mittlere Kenndaten des Sees. Ihre Voraussagen schließen daher separate Entwicklungen in verschiedenen Seeteilen nicht aus. Da der Nährstoffimport aus dem Gebiet um St. Bartholomä und Sallet vor allem in das relativ flache Südbecken des Königssees gelangt, sind dort zuerst entsprechende Veränderungen zu erwarten.

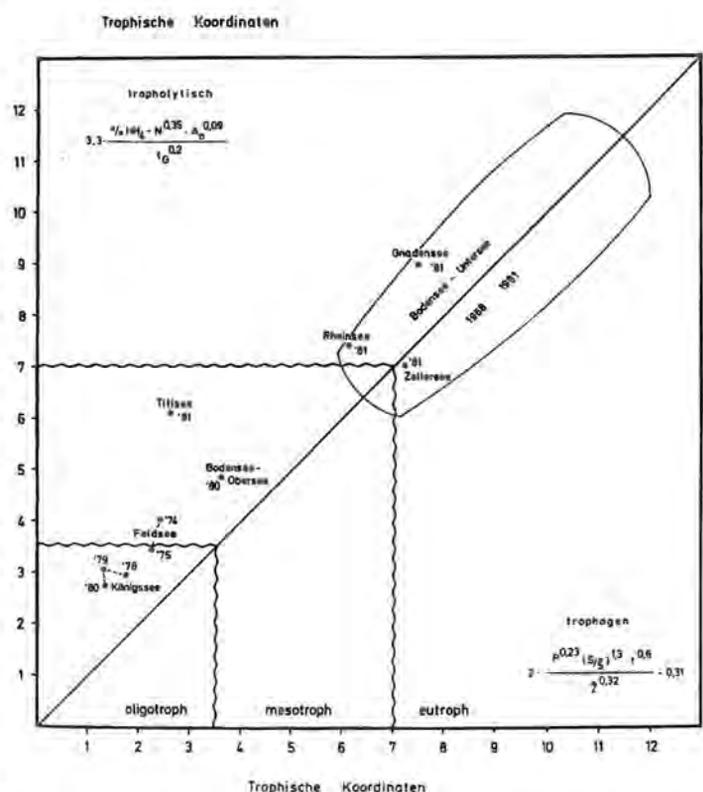


Abb. 63: Position einiger Seen im „Koordinatensystem Aufbau/Abbau“ nach R. und H. Schröder (1978).

6. Ausgewählte Organismengesellschaften des Ökosystems Königssee

6.1 Organismen des Benthals

Wie sich aus Abb. 12 ergibt, teilt man das Benthos in zwei Regionen ein: die erste Region, das Litoral, entspricht der trophogenen Zone des Pelagials, die zweite Region, das Profundal, entspricht der tropholytischen Zone des Pelagials. Die bisherige Analyse beschränkte sich auf die submersen Makrophyten der Litoralregion und die Chironomiden der Litoral- und der Profundalregion.

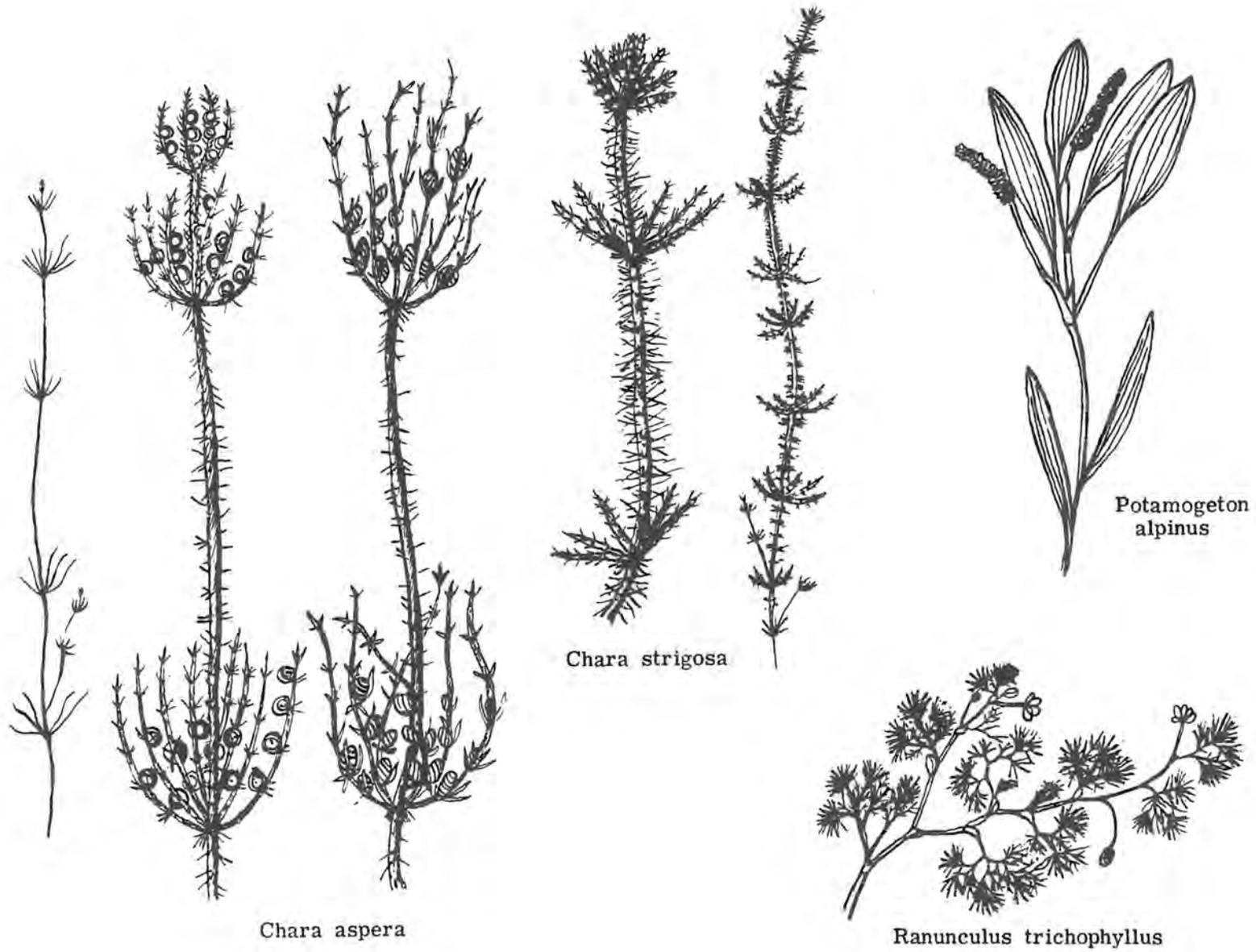
6.1.1 Die submerse Makrophytenvegetation (Tafel III)

Unter Makrophyten versteht man diejenigen pflanzlichen Organismen, die bereits in Einzahl ohne optische

Hilfsmittel erkennbar sind. Da die über den Wasserspiegel aufragenden (emersen) Wasserpflanzen im Königssee mengenmäßig ohne Bedeutung sind, beschränken wir uns auf die untergetauchten (submersen), die im Rahmen einer Tauchkartierung (Melzer 1981) gefunden worden sind.

Das Ergebnis (Tabelle 26) zeigt, daß die sogenannten Armleuchteralgen (Characeen), und unter diesen vor allem die Art *Chara strigosa*, die Hauptrolle spielen. Sie kommt an beiden Enden des Sees (Abb. 64), im Bereich der unterseeischen Geröllhalden um St. Bartholomä, am gegenüberliegenden Ufer im Raum zwischen Kesselbachzufluß und Fallaugraben, in ganz besonders dichten Beständen im Bereich der Sallet-Anlegestelle und schließlich ihm gegenüber bei den Grünen Quellen vor. Eine andere *Chara*-Art, *Chara aspera* var. *subinermis*, tritt mengenmäßig stark in den Hintergrund. Bei der Sallet-Anlegestelle fehlt sie ganz; auch im östlichen Uferbereich des Eisgraben-Hangschuttes ist sie nicht anzutreffen. Ansonsten zeigt sie sich dort, wo auch die zuvor genannte Art vorkommt, aber immer nur in klei-

Tabelle 26 Submerse Makrophyten des Königssees		
1. An mehreren Standorten (in der Reihenfolge ihrer Häufigkeit)		
Name	Häufigkeit	Vorkommen
<i>Chara strigosa</i> A. Br.	verbreitet bis massenhaft	Nord- und Südende, St. Bartholomä, Kesselbach bis Fallaugraben
<i>Ranunculus trichophyllus</i> ssp. <i>trichophyllus</i> und ssp. <i>eradicatus</i> (Larst.)	sehr selten bis verbreitet	Nord- und Südende, St. Bartholomä
<i>Chara aspera</i> var. <i>subinermis</i> Groves	sehr selten bis verbreitet	Nord- und Südende, Malerwinkel, Königsbach, St. Bartholomä, Kesselbach bis Fallaugraben
<i>Potamogeton alpinus</i>	sehr selten bis selten	Nord- und Südende, Malerwinkel, Königsbach, Fallaugraben
2. An einem bis wenigen Standorten		
<i>Potamogeton berchtoldii</i>	verbreitet	Nordende
<i>Chara contraria</i> A. Br. ex Kütz	häufig	Oberseezufluß
<i>Nitella opaca</i> (Ag. ex Bruc.)	sehr selten	Nordende
<i>Potamogeton x nitens</i> Weber	sehr selten	St. Bartholomä Anlegestelle
<i>Tetraspora cylindrica</i> (Wahlenberg) Agardh	sehr selten	Grüne Quellen
<i>Fontinalis antipyretica</i> L.	sehr selten	Nordende und Oberseezufluß



Chara aspera

Chara strigosa

Potamogeton alpinus

Ranunculus trichophyllus

Chara strigosa A. Br.

Chara aspera
var. *subinermis* Groves

- sehr selten
- selten
- verbreitet
- häufig
- sehr häufig

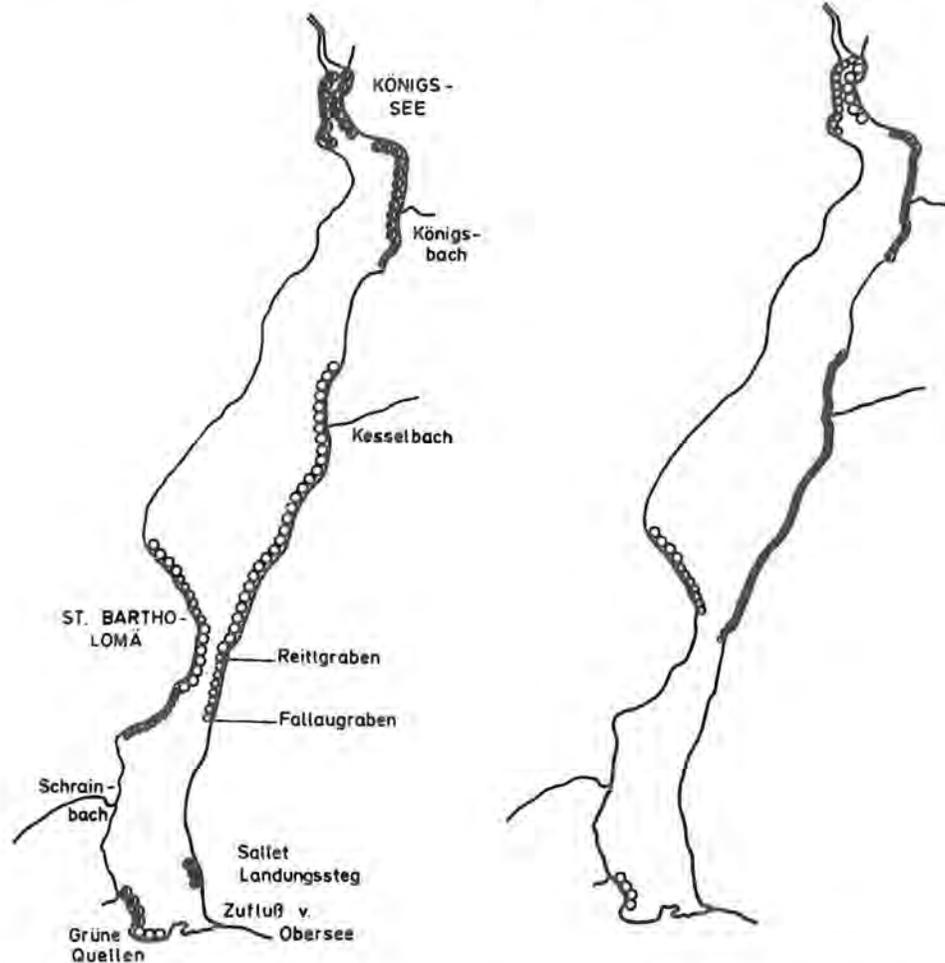


Abb. 64: Verteilung der beiden im Königssee häufigsten Chara-Arten mit halbquantitativer Schätzung der Bestände (nach Melzer 1981, verändert).

nen Inselbeständen. Noch geringer ist *Chara contraria* anzutreffen. Im großen und ganzen ist diese Art auf den Bereich um den Oberseezufluß beschränkt. Die ebenfalls zu den Characeen gehörende *Nitella opaca* ist verhältnismäßig selten anzutreffen. Als Fundort wird das nördliche Ende des Königssees angegeben.

Der Haarblättrige Hahnenfuß (*Ranunculus trichophyllus*) steht hinsichtlich seiner Verbreitung und Häufigkeit nach *Chara strigosa* an 2. Stelle. Er kommt in zwei Unterarten vor, die nur an Orten mit feinem Sediment am südöstlichen und nördlichen Ende des Sees und am Ufer um St. Bartholomä gefunden werden. In nennenswerter Menge kommt auch das Laichkraut *Potamogeton alpinus* vor: am südöstlichen und nördlichen Ende des Sees und im Uferbereich zwischen Reitl- und Fallaugraben (Abb. 65). Alle übrigen – insgesamt wurden 11 verschiedene Wasserpflanzen gefunden (Tabelle 26) – sind nur vereinzelt anzutreffen: *Potamogeton berchtoldii* am Nordostufer bei Christlieger und am gegenüberliegenden Ufer, *Potamogeton x nitens* südlich des Landungssteges bei St. Bartholomä, das Quellmoos *Fontinalis antipyretica* bei den Bootshäusern am Nordende des Sees und im Bereich des Oberseezuflusses.

Zu den Makrophyten kann man auch die langen Fäden der Grünalge *Spirogyra* zählen, deren Artname noch nicht bestimmt worden ist. Sie bildet im Raum um St. Bartholomä, vor allem in Richtung Sallet und dort vor dem Landungssteg, im späten Frühjahr bis zum Herbst ausgedehnte grüne Watten am Grund, die man vom Boot aus gut erkennen kann. Bei anhaltender Sonneneinstrahlung werden sie durch die im Fadengeflecht hängengebliebenen Sauerstoffbläschen losgerissen und treiben dann an der Wasseroberfläche. Eine weitere Grünalge, die zur Familie der Tetrasporaceen gehört, *Tetraspora cylindrica*, kann im Bereich der Grünen Quellen gefunden werden. Nach Melzer (1981) bevorzugt sie derartige unterseeische Quellen, denen sie durch ihre auffällige Grünfärbung den entsprechenden Namen gegeben hat.

Welche Schlußfolgerungen können wir aus dem Vorhandensein der genannten Wasserpflanzen ziehen? Besitzen sie einen indikatorischen Wert? Es liegt auf der Hand, daß wir diese Frage verhältnismäßig leicht beantworten könnten, wenn gesichert wäre, daß alle in unseren Breiten vorkommenden Wasserpflanzen die gleiche Chance gehabt hätten, den Lebensraum Königssee zu erobern. Das ist mit Sicherheit nicht der

Potamogeton
alpinus

Ranunculus trichophyllus Chaix
ssp. trichophyllus
+ ssp. eradicatus

- sehr selten
- ◻ selten
- verbreitet

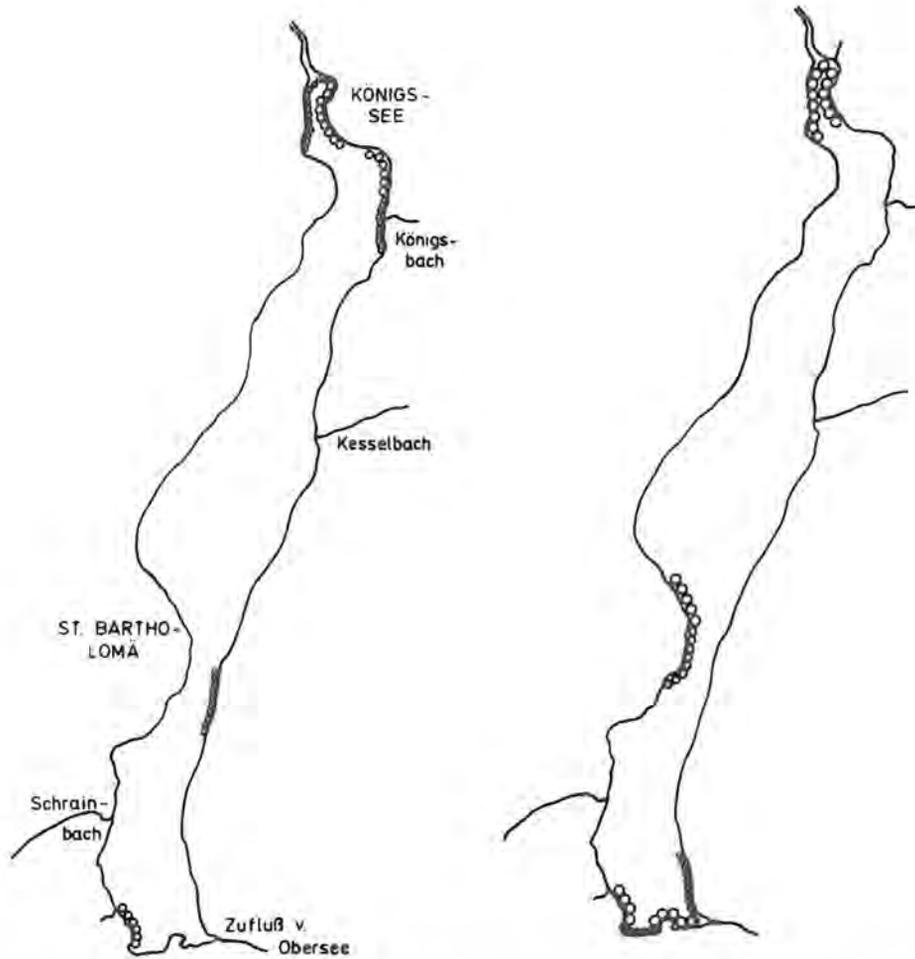


Abb. 65: Verteilung des Alpenlaichkrautes *Potamogeton alpinus* und des haarblättrigen Hahnenfußes (*Ranunculus trichophyllus*) (nach Melzer 1981, verändert).

Fall. Wir kennen auch nicht die Vorgeschichte der Wasserpflanzenbesiedelung im Königssee (die Angaben von Migula, 1897, Vollmann, 1914, reichen zur Klärung dieser Frage nicht aus). Wir wissen daher nicht, ob die nur vereinzelt vorkommenden Arten am Anfang ihrer Ausbreitung stehen oder ob sie die letzten eines einst ausgedehnten Bestandes sind. So tun wir gut daran, uns auf die häufig vorkommenden Vertreter zu beschränken, indem wir unterstellen, daß sie aufgrund ihres Bestandes und der Konstitution der Individuen an ihrem Standort gute Lebensbedingungen finden. Für diese Betrachtung kommen somit lediglich *Chara strigosa*, *Chara aspera*, *Ranunculus trichophyllus* und *Potamogeton alpinus* in Frage. Da *Ranunculus trichophyllus* eine breite ökologische Potenz besitzt – er kommt nicht nur in kalkreichen Quellbächen, sondern auch in anthropogen belasteten Fließgewässern vor (Köhler, persönliche Mitteilung) –, unterstreicht sein Vorkommen im Königssee nur seine Anspruchslosigkeit in der Wahl des Besiedelungsraumes. Das Alpenlaichkraut *Potamogeton alpinus* kommt vor allem in fließenden Gewässern mit geringer Härte oder sogar etwas dystrophen Eigenschaften vor, wobei es zumindest in den weichen Fließgewässern des Oberpfälzer Waldes gegen Nährstoffeinträge sehr empfindlich ist. Seine Verbreitung im

Königssee könnte somit als Hinweis auf die geringe Härte und den niedrigen Nährstoffgehalt gewertet werden.

Was nun die *Chara*-Arten betrifft, so bevorzugen auch sie nährstoffarme Gewässer mit hinreichendem Kalkgehalt. *Chara aspera* gehört zu den Pionierpflanzen, denen es oft in wenigen Jahren gelingt, den Boden neu entstandener Seen (Baggerseen!) mit einem dichten Rasen zu überziehen. Infolge ihrer relativ geringen Lichtansprüche dringen sie längs der Halde am weitesten in die Tiefe vor, um hier „in versteinelter Starre an der Grenze des Lebensraumes grüner Makrophyten dahinzuvegetieren“ (Krause 1979–1981). *Chara strigosa*, die im Königssee die vorherrschende Stellung einnimmt, ist die einzige ihrer Familie, die auf kalte und klare Gewässer beschränkt ist. In Mitteleuropa kommt sie daher nur in den Alpen vor. Nährstoffreiche Gewässer meidet sie wie alle übrigen Characeen.

Auffällig ist das Vorkommen der ausgedehnten *Spirogyra*-Watten im Raum um die Sallet-Anlegestelle und am Ufer von St. Bartholomä. Wir müssen sie als Indiz für relativ günstige Ernährungsbedingungen werten, die im Hinblick auf die in beiden Räumen unweit des Ufers

erfolgende Nährstoffablagerung grundsätzlich in Erwägung zu ziehen sind. Der in diesem Bereich erfolgte Nachweis von reaktivem Phosphat (bis 7 µg PO₄-P/l) unterstützt die These, daß die ausgedehnten Spirogyra-Watten das erste Zeichen einer beginnenden Eutrophierung sind, die auf das Südbecken des Königssees beschränkt ist.

Zusammenfassend ergibt sich somit: Die vorherrschenden Makrophyten des Königssees (*Chara strigosa*, *Chara aspera* und *Potamogeton alpinus*) können aufgrund ihrer sonstigen Verbreitung in Mitteleuropa als Anzeiger für ein nährstoffarmes (gilt für alle drei), klares und kaltes (gilt für *Chara strigosa*) Gewässer bezeichnet werden. Das auf den Südostteil des Königssees beschränkte Vorkommen ausgedehnter Spirogyra-Watten spricht für relativ günstige Ernährungsbedingungen, die höchstwahrscheinlich anthropogenen Ursprungs sind.

6.1.2 Die Chironomiden

Die bisherige Kenntnis der Artenzusammensetzung verdanken wir einer umfangreichen, zwischen den Jahren 1952–1957 durchgeführten Sammelarbeit (Engelhardt, unpubl.). Sie wurde in jüngster Zeit einer gründlichen systematischen Bearbeitung unterzogen (Reiss, unpubl.), deren Ergebnisse in Tabelle 27 zusammengefaßt sind. Demnach werden bisher 30 Arten unterschieden, deren Fundorte über das gesamte Benthon verteilt sind.

Im Rahmen unseres Königssee-Projektes hat R. Müller im August und September 1980 als Vorstufe für eine spätere umfassende quantitative Bestandsaufnahme Untersuchungen zur Bestandsdichte der profundalen Fauna durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden in beiden Monaten jeweils 10 Stichproben mit Hilfe eines Eckmann-Greifers (Grundfläche 225 cm²) in der Längsachse des Königssees an neun verschiedenen Stellen entnommen (Abb. 66). Da der Probeninhalt durch ein Netz mit einer Maschenweite von 200 µm geschlämmt wurde, sind nur die entsprechend größeren Organismen erfaßt. Aus diesen Untersuchungen folgt:

- 1) Das Profundal des Königssees wird vor allem von Nematoden, Oligochaeten und Chironomiden besiedelt. Abgesehen von der bei Probenstelle 2 besonders hohen Besiedelung mit Oligochaeten und einer besonders geringen Besiedelung an Probenstelle 9 mit Chironomiden und Oligochaeten, sind zwischen den übrigen Probenstellen keine auffälligen Unterschiede zu erkennen.
- 2) Die Organismendichten bewegen sich im großen und ganzen zwischen 10–880 Individuen/m² bei den Oligochaeten und zwischen 0–300 Individuen/m² bei den Chironomiden.
- 3) Unter den Chironomiden dominieren *Micropsectra contracta* Reiss, einige noch nicht näher bestimmte Tanyptodinae-Arten und eine ebenfalls noch unbekannte, zur Gattung *Stictochironomus* gehörige Art.

Tabelle 27 Artenliste der Chironomidae (Familie der Zuckmücken) vom Königssee ¹⁾

<p>TANYPODINAE (Gattung): <i>Arctopelopia barbitarsis</i> (Zett.) <i>Ablabesmyia monilis</i> (L.) <i>Ablabesmyia phatta</i> (Egg.) <i>Macropelopia fehlmanni</i> (Kieff.) <i>Procladius</i> sp.</p> <p>DIAMESINAE (Gattung): <i>Protantypus caudatus</i> Edw.</p> <p>PRODIAMESINAE (Gattung): <i>Prodiamesa</i> sp.</p> <p>ORTHOCLADIINAE (Gattung): <i>Cricotopus</i> sp. <i>Heleniella ornatocollis</i> (Edw.) <i>Heterotrissocladius marcidus</i> (Walk.) <i>Paracladius alpicola</i> (Zett.) <i>Parakiefferiella ? bathophila</i> (Kieff.) <i>Psectrocladius psilopterus</i> (Kieff.) <i>Pseudosmittia ruttneri</i> Str.</p>	<p>CHIRONOMINAE (Gattung): Chironomini: <i>Chironomus</i> sp. <i>Dicrotendipes lobiger</i> (Kieff.) <i>Harnischia</i> sp. <i>Microtendipes pedellus</i> (de Geer) <i>Paracladopelma nigriflora</i> G. <i>Paratendipes plebejus</i> (Meig.) <i>Paratendipes</i> sp. <i>Polypedilum (Polypedilum)</i> sp. <i>Polypedilum (Tripodura)</i> sp. <i>Stictochironomus</i> sp. <i>Sergentia coracina</i> (Zett.)</p> <p>TANYTARSINI (Gattung): <i>Micropsectra contracta</i> Reiss <i>Micropsectra coracina</i> (Kieff.) <i>Paratanytarsus austriacus</i> (Kieff.) <i>Paratanytarsus laccophilus</i> Edw. <i>Tanytarsus gregarius</i> (Kieff.)</p>
--	--

¹⁾ leg. W. Engelhardt 1952–1957, det. F. Reiss (die Sammelproben befinden sich in der Zoologischen Staatssammlung München).

Aus der in Tabelle 27 zusammengestellten Sammlung ergibt sich das reiche Chironomiden-Spektrum des Königssees. Es ist mit Sicherheit noch nicht als vollständig anzusehen, und das ist auch nicht verwunderlich, denn man unterscheidet in Mitteleuropa weit über 1000 Arten (Jacobs-Renner 1974).

Die Chironomiden sind nach den bisherigen Befunden die einzigen Vertreter der Insekten, die den Königssee bis zum Seegrund erobert haben. Hier leben sie im und auf dem Substrat, um sich höchstens für jeweils kurze Zeit durch Schnell- oder Schlängelbewegungen im Wasserraum aufzuhalten. Nach der Verpuppung steigen sie zur Wasseroberfläche auf, um hier als Imagines den Luftraum zu erobern. Sie sind nur wenige Millimeter groß (Abb. 67), sehr zart und oft zu Tausenden an den Beleuchtungskörpern der Landstellen und an den beleuchteten Schaufensterscheiben zu beobachten. Ihre Mundwerkzeuge sind weder zum Saugen noch zum Stechen geeignet. Eine Nahrungsaufnahme der nur wenige Tage lebenden Imagines ist daher nicht möglich. Ihr einziges Ziel ist die Sicherung der Nachkommenschaft.

Von den in Tabelle 27 aufgeführten Arten stammen *Macropelopia fehlmanni* nach den Fundortangaben von Engelhardt aus Tiefen zwischen 50–120 m, *Paracladopelma nigrifulva* aus 120 m und *Micropsectra contracta* Reiss aus Tiefen bis zu 170 m, obgleich diese Art auch im Litoral gefunden worden ist. Aufgrund ihrer Verbreitung in anderen Seen gehören *Macropelopia fehlmanni*, *Procladius caudatus*, *Paracladopelma nigrifulva* und

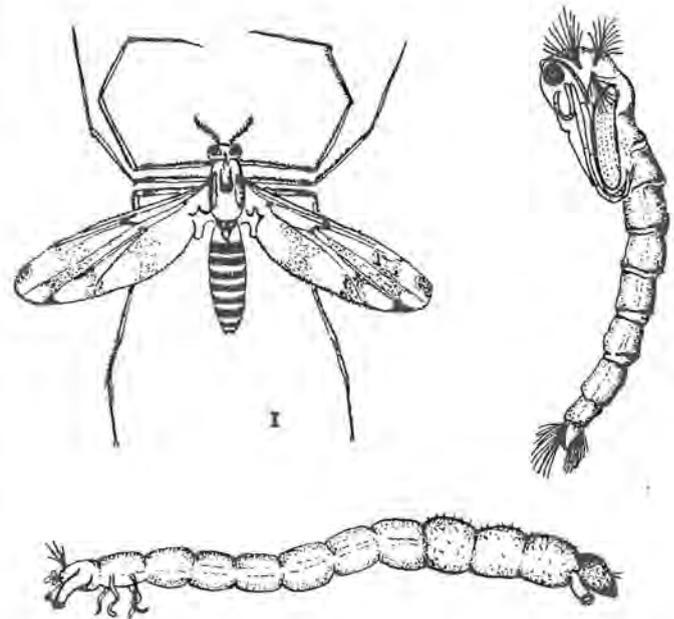


Abb. 67: Imago, Larve und Puppe einer Zuckmücke (Chironomidae) (nach verschiedenen Vorlagen von K. Preißler gezeichnet).

m. E. auch *Heterotrissocladius marcidus* sowie die noch nicht bestimmbare *Stictochironomus*-Art zu den typischen Vertretern oligotropher Seen (Reiss, persönl. Mitteilung). Sie können daher als Indikatororganismen für die Oligotrophie des Königssees bewertet werden.

6.2 Organismen des Pelagials

6.2.1 Das Phytoplankton (Tafel IV)

6.2.1.1 Artenzusammensetzung

Im Königssee wurden bisher 49 Phytoplanktonarten nachgewiesen, eine Zahl, die sicherlich bei weiteren Untersuchungen noch zunehmen wird. Ohne wesentliche Veränderungen im Chemismus des Sees, insbesondere in der Zufuhr von pflanzenverfügbaren Nährstoffen, sind jedoch keine Umschichtungen des Dominanzverhältnisses zu erwarten, so daß das derzeitige Phytoplanktonspektrum in seiner quantitativen Entfaltung eine für spätere Vergleichsuntersuchungen geeignete Grundlage darstellt.

Die Zuordnung der bisher nachgewiesenen Arten zu den verschiedenen Stämmen bzw. Klassen ergibt sich aus Tabelle 28. Demnach gehören 17 Arten zur Klasse der Chrysophyceen, 9 Arten zu den Chlorophyceen, 8 Arten zu den Bacillariophyceen (= Diatomeen), 6 Arten zu den Dinophyceen, 5 Arten zu den Cryptophyceen und jeweils 2 Arten zu den Konjugatophyceen bzw. Cyanophyceen. Wenn wir diese Zusammenstellung mit dem Artenspektrum einiger anderer Seen vergleichen (Tabelle 29), so ergibt sich, daß der Königssee der einzige See ist, in welchem die Chrysophyceen hinsichtlich der Artenzahl (17!) im Übergewicht sind. Bei den anderen Seen fällt hingegen die große Artenzahl bei den Bacillariophyceen und den Chlorophyceen auf; auch die Artenzahl der Cyanophyceen ist durchwegs höher als im Königssee. Bevor wir die Frage nach dem Indikator-

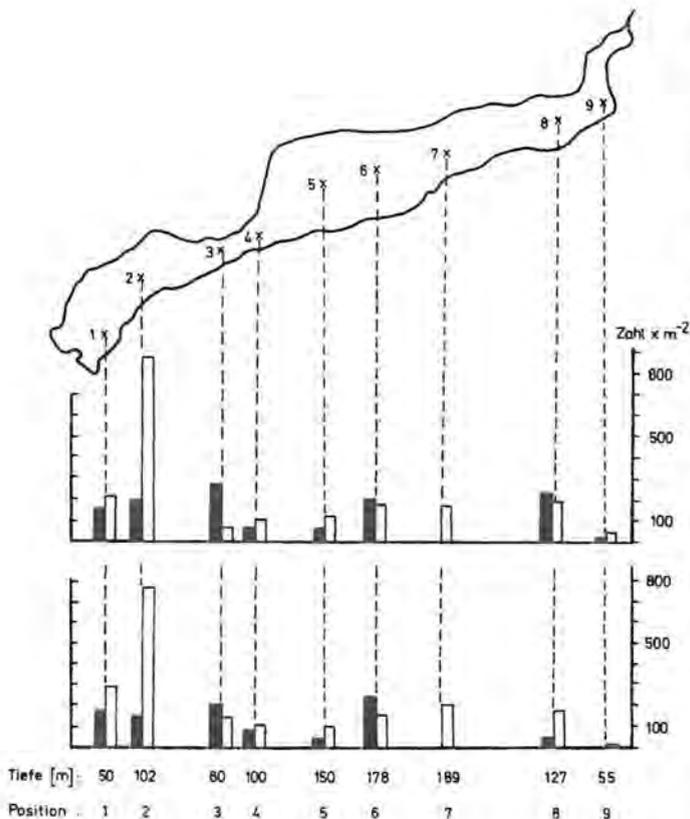


Abb. 66: Bestandsdichte der Chironomiden (schwarze Säulen) und der Oligochaeten (weiße Säulen) an neun Probenstellen mit Angabe von Tiefe und Position im Königssee.

(nach Vorlagen verschiedener Autoren gezeichnet von E. Geipel)

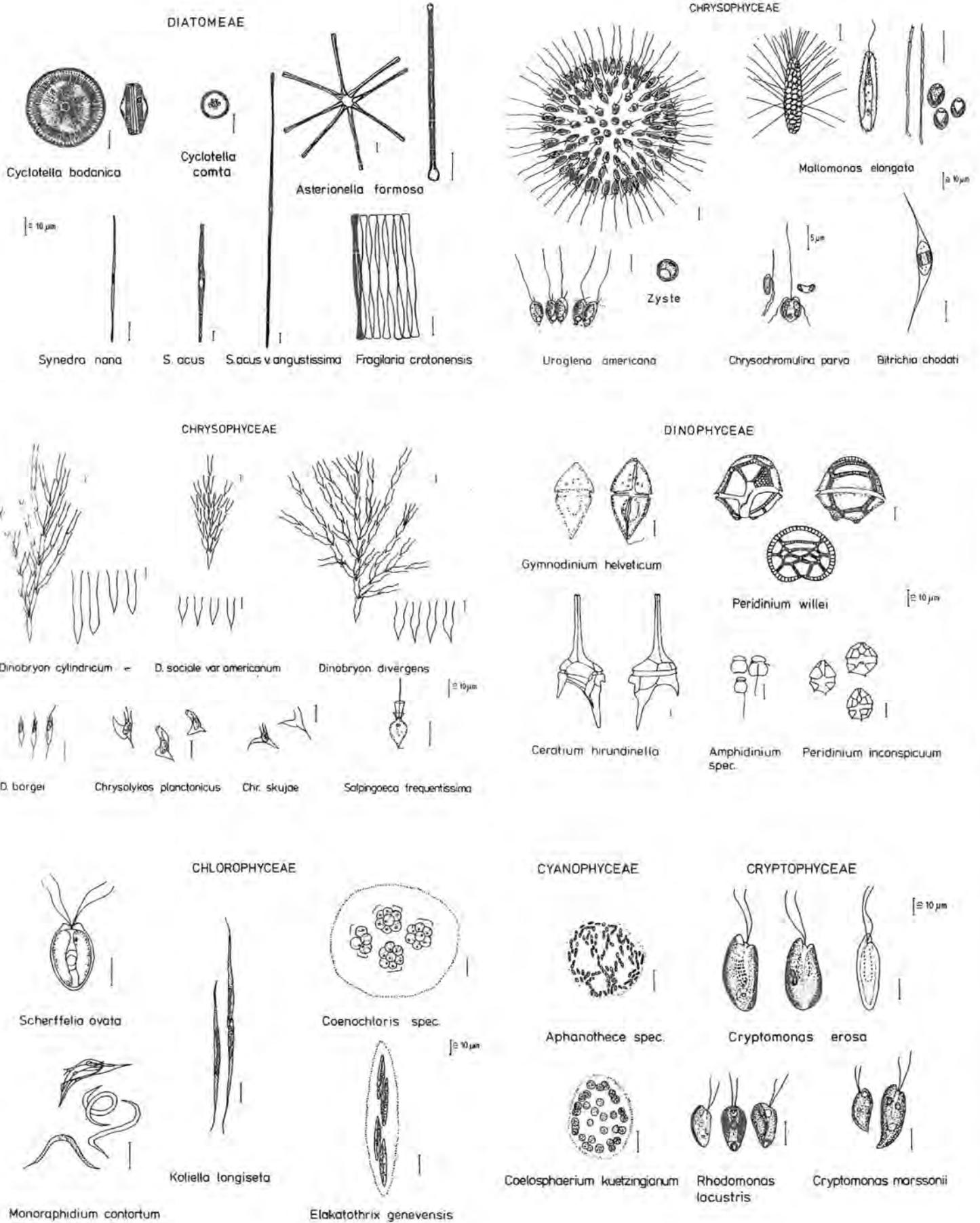
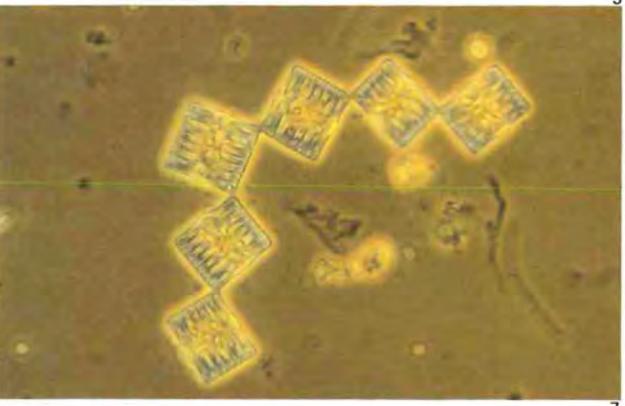
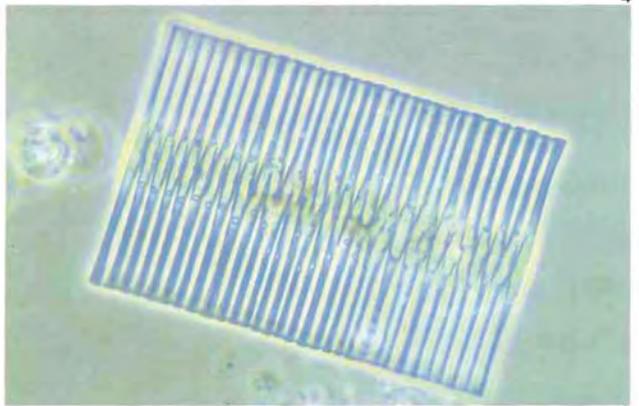
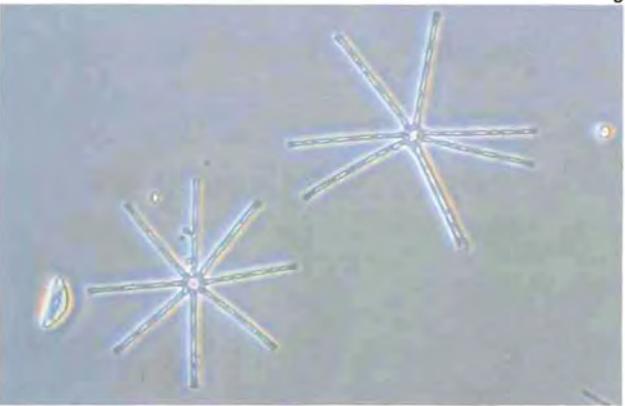
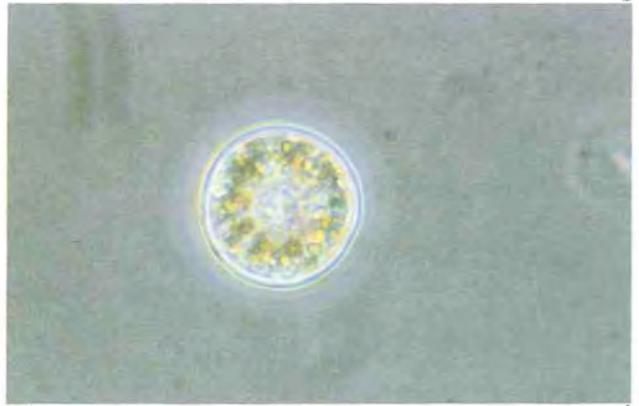
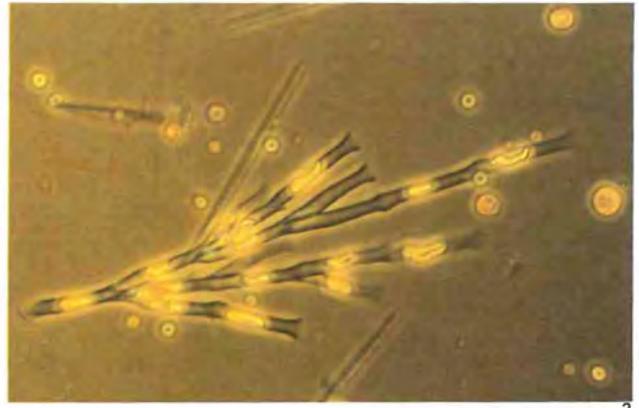
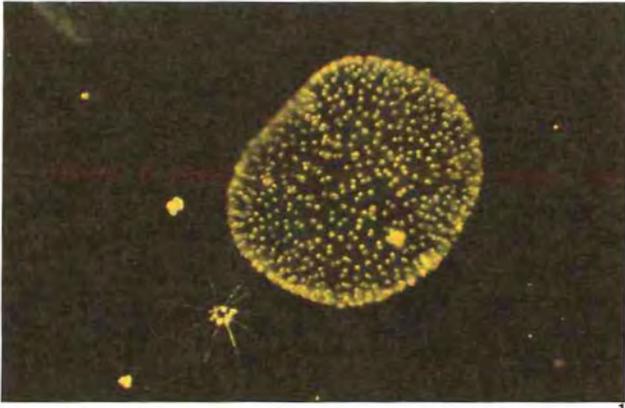


Tabelle 28

Die Phytoplankter des Königssees unter Berücksichtigung ihrer maximalen Entfaltung (g Frischgewicht/m²) inkl. Zeitangabe (Monat) (m = mobil, i = immobil)

*) sitzen auf Asterionella-Zellen

Chromophyta	(Stamm)	Maximum
Chrysophyceae	(Klasse)	(Monat)
Dinobryon cylindricum	(m)	5 (IV–V)
Dinobryon sociale var. americanum	(m)	< 1 (IV–V)
Dinobryon divergens	(m)	< 0,5 (VI–VII)
Dinobryon borgei	(m)	
Dinobryon crenulatum	(m)	
Chrysolykos skujae		< 0,3 (IV–V)
Chrysolykos planctonius		
Chrysochromulina parva	(m)	< 0,2 (~)
Chrysomoeba spec.	(m)	
Uroglena americana	(m)	2–13 (V–VII)
Mallomonas alpina	(m)	
Mallomonas elongata	(m)	
Phaeaster aphanaster	(i)	< 0,02 (IV, VIII)
Salpingoeca frequentissima*)	(m)	
Bitrichia chodati	(i)	< 0,1 (III–IV)
Kephrion spec.	(m)	< 0,05 (IV–V)
Bikosoeca lacustris*)	(m)	
Chromophyta	(Stamm)	Maximum
Bacillariophyceae	(Klasse)	(Monat)
Cyclotella bodanica	(i)	4 (V, X)
Cyclotella comta	(i)	6 (V–VI)
Asterionella formosa	(i)	< 0,3 (VIII, X)
Fragilaria crotonensis	(i)	< 0,1 (IV–V)
Synedra acus	(i)	< 0,9 (III–IV)
Synedra acus angustissima	(i)	< 0,2 (V–VI)
Synedra nana	(i)	< 1 (III–IV)
Tabellaria flocculosa	(i)	



Tafel V:

**Ausgewählte Arten aus dem
Phytoplankton des Königssees**

1. *Uroglena americana*,
2. *Dinobryon cylindricum*,
3. *Dinobryon sociale*,
4. *Cyclotella bodanica*,
5. *Asterionella formosa*,
6. *Fragilaria crotonensis*,
7. *Tabellaria flocculosa*,
8. *Mallomonas elongata*,
9. *Ceratium hirundinella*

(Foto Geipel).

Chlorophyta	(Stamm)	Maximum	
Chlorophyceae	(Klasse)	(Monat)	
Chlamydomonas spec.	(m)	< 0,4 (II–VI)	
Scherffelia spec.	(m)		
Paramastix conifera	(m)		
Scourfieldia complanata	(m)		
Tetraedron minimum	(i)		
Coenochloris spec.	(i)		
Koliella longiseta	(i)		< 0,02 (X)
Elakatothrix genevensis	(i)		< 0,03 (V, VI)
Monoraphidium contortum	(i)		< 0,2 (IV, V)
Conjugatophyceae	(Klasse)		
Cosmarium depressum	(i)		
Staurastrum vestitum	(i)		
Dinophyta	(Stamm)	Maximum	
Dinophyceae	(Klasse)	(Monat)	
Peridinium willei	(m)	0,7 (III–IV)	
Peridinium inconspicuum	(m)		
Ceratium hirundinella	(m)	< 0,2 (X–II)	
Gymnodinium helveticum	(m)	< 0,2 (VIII–II)	
Gymnodinium spec.	(m)		
Amphidinium spec.	(m)		
Cryptophyta	(Stamm)	Maximum	
Cryptophyceae	(Klasse)	(Monat)	
Rhodomonas lacustris	(m)	< 1,0 (VI, X)	
Cryptomonas erosa	(m)	< 0,4 (I, V)	
Cryptomonas marssonii	(m)	< 0,4 (VII)	
Cryptaulax spec.	(m)		
Katablepharis ovalis	(m)		
Cyanophyta	(Stamm)	Maximum	
Cyanophyceae	(Klasse)	(Monat)	
Aphanothece spec.	(i)	< 0,1	
Coelosphaerium kutzingianum	(i)		

Tabelle 29		Phytoplanktonartenzahl, nach Klassen aufgeteilt (In Klammern Rangordnung nach Biomasse)				
Klasse	Königssee (oligotroph)	¹⁾ Großer Alpsee (mesotroph- eutroph)	²⁾ Attersee (oligotroph)	³⁾ Mondsee (eutroph)	⁴⁾ Ammersee (eutroph)	²⁾ Fuschlsee (eutroph)
Cyanophyceae (Blaualgen)	2	5	9	7 (1-2)	12 (1)	3 (1)
Cryptophyceae (Kryptomonaden)	5 (3)	5 (2)	4 (3)	6	7	7
Dynophyceae (Dinoflagellaten)	6	6 (3)	5	5 (3)	6 (3)	5 (3)
Chlorophyceae (Grünalgen)	9	19	12 (2)	10	25	12
Konjugatophyceae (Jochalgen)	2	4	1	2	4	2
Bacillariophyceae (Kieselalgen)	8 (1)	18 (1)	16 (1)	25 (1-2)	21 (2)	25 (2)
Chrysophyceae (Goldalgen)	17 (2)	4	5	5	7	3
Summe	49	61	52	60	82	57
¹⁾ Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 1979 (Rangordnung geschätzt)			³⁾ Schwartz 1979			
²⁾ Kots und Moog 1981			⁴⁾ Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 1978			

wert dieser Phytoplanktonzusammensetzung nachgehen, ist es erforderlich, neben der Artenzusammensetzung auch deren Individuendichte bzw. Biomasse zu berücksichtigen. Dies geschieht im folgenden Abschnitt im Zusammenhang mit ihrem jahreszeitlichen Auftreten.

6.2.1.2 Veränderung im Jahresablauf

Über das jahreszeitliche Auftreten der Vertikalverteilung, das Anwachsen der Population bis zur maximalen Entfaltung und ihren nachfolgenden Niedergang, der u. U. bis zum völligen Verschwinden der vegetativen Zellen führen kann, informieren die Isoplethendarstellungen (*Cyclotella comta*: Abb. 68, *Cyclotella bodanica*: Abb. 69, *Uroglena americana*: Abb. 70 und *Rhodomonas lacustris*: Abb. 71). In zwei weiteren Darstellungen (Abb. 72 und 73) läßt sich anhand des Frischgewichts/m² die zeitliche Abfolge im Auftreten der einzelnen Arten verfolgen.

Betrachten wir zunächst den jahreszeitlichen Wechsel des Biomasseanteils, der in ihren jeweiligen Klassen zusammengefaßten Arten (Abb. 74), so ergibt sich, daß die Bacillariophyceen die wichtigste Gruppe des Phytoplanktons sind. Sie beherrscht die trophogene Zone

nicht nur im Frühjahr, wie aus vielen anderen Seen bekannt ist (z. B. Ammersee, Abb. 75), sondern das ganze Jahr über. Diese Vorherrschaft kann den Bacillariophyceen höchstens von den Chrysophyceen streitig gemacht werden, die in den Sommermonaten für einige Wochen eine beachtliche Biomasse erreichen, meist aber an 2. Stelle hinter den Bacillariophyceen bleiben (Abb. 74). An 3. Stelle sind die Cryptophyceen zu nennen, während die Vertreter der übrigen Klassen eine untergeordnete Rolle spielen.

Wir wollen uns nun den einzelnen Arten zuwenden. Anhand von Abb. 72 und 73 läßt sich feststellen, daß fast alle Arten zwischen Mai und Juli ihre maximale Entfaltung zeigen. Aus dieser Reihe fallen lediglich *Synechococcus nana*, die ihr Maximum bereits im April erreicht, und *Uroglena americana*, deren Maximum 1980 erst im August beobachtet worden ist. Diese Art kann aber auch schon im Mai höchste Individuendichten erreichen (Abb. 70). Möglicherweise spricht sie besonders rasch auf Nährstoffschübe an, da sie in den drei Beobachtungsjahren jeweils nach Hochwässern aufgetreten ist. So kann sie innerhalb kürzester Zeit die höchsten bisher im Königssee festgestellten Zellzahlen (nicht Koloniezahlen!) erreichen: während des Maximums 1980 bis zu 2900000 Zellen/l bzw. ca. 2 g

Tiefe *Cyclotella comta* Biomasse [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$]

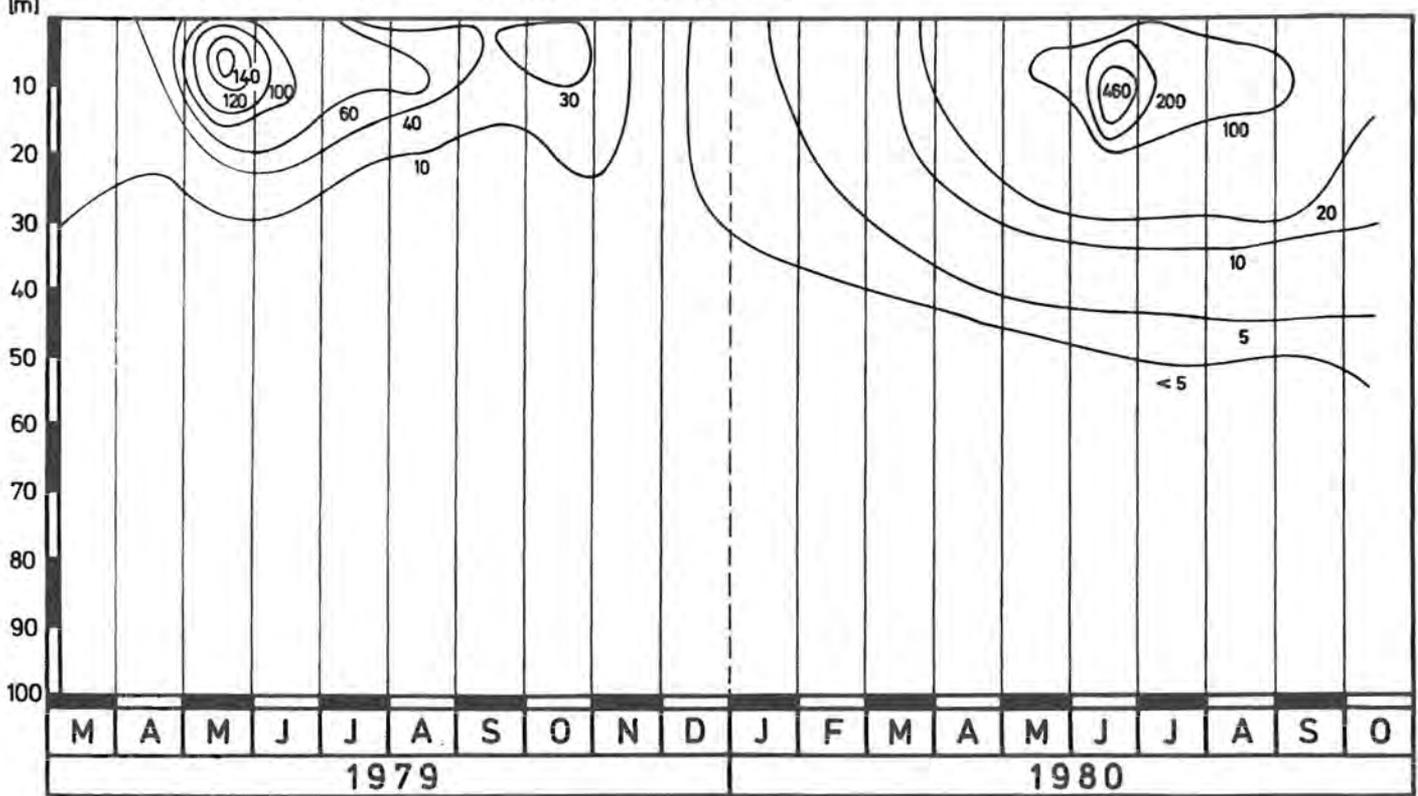


Abb. 68: Räumliche und zeitliche Verteilung von *Cyclotella comta*.

Tiefe *Cyclotella bodanica* Biomasse [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$]

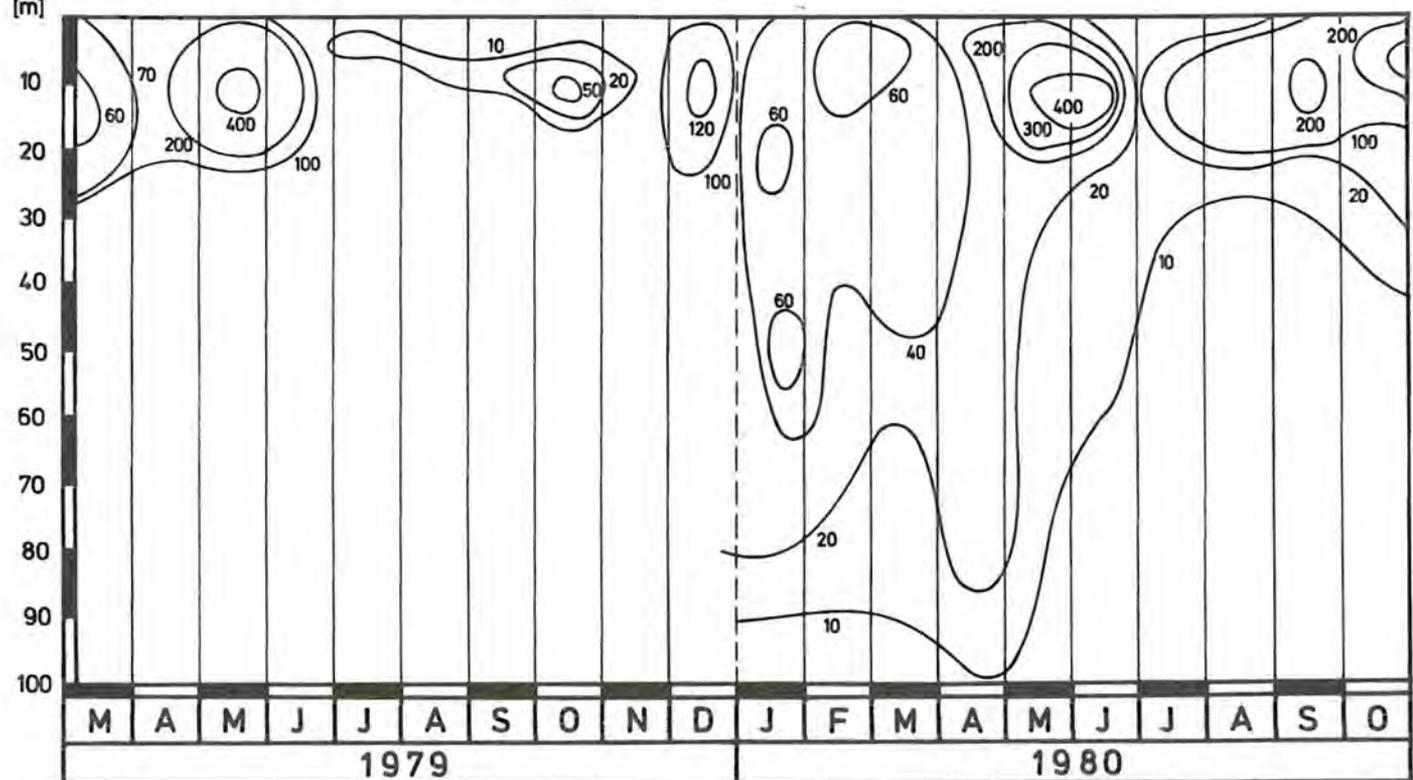


Abb. 69: Räumliche und zeitliche Verteilung von *Cyclotella bodanica*.

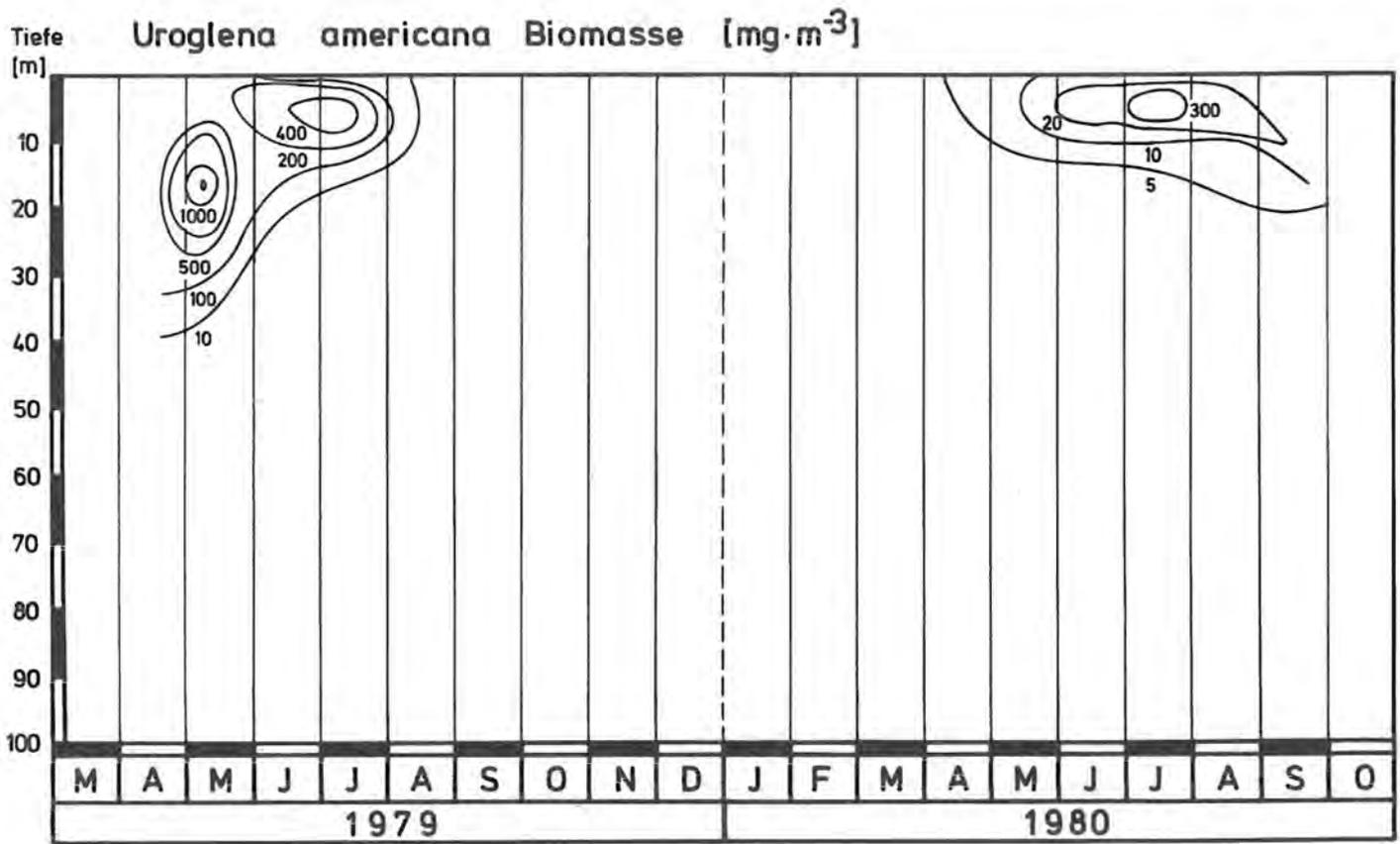


Abb. 70: Räumliche und zeitliche Verteilung von *Uroglena americana*.

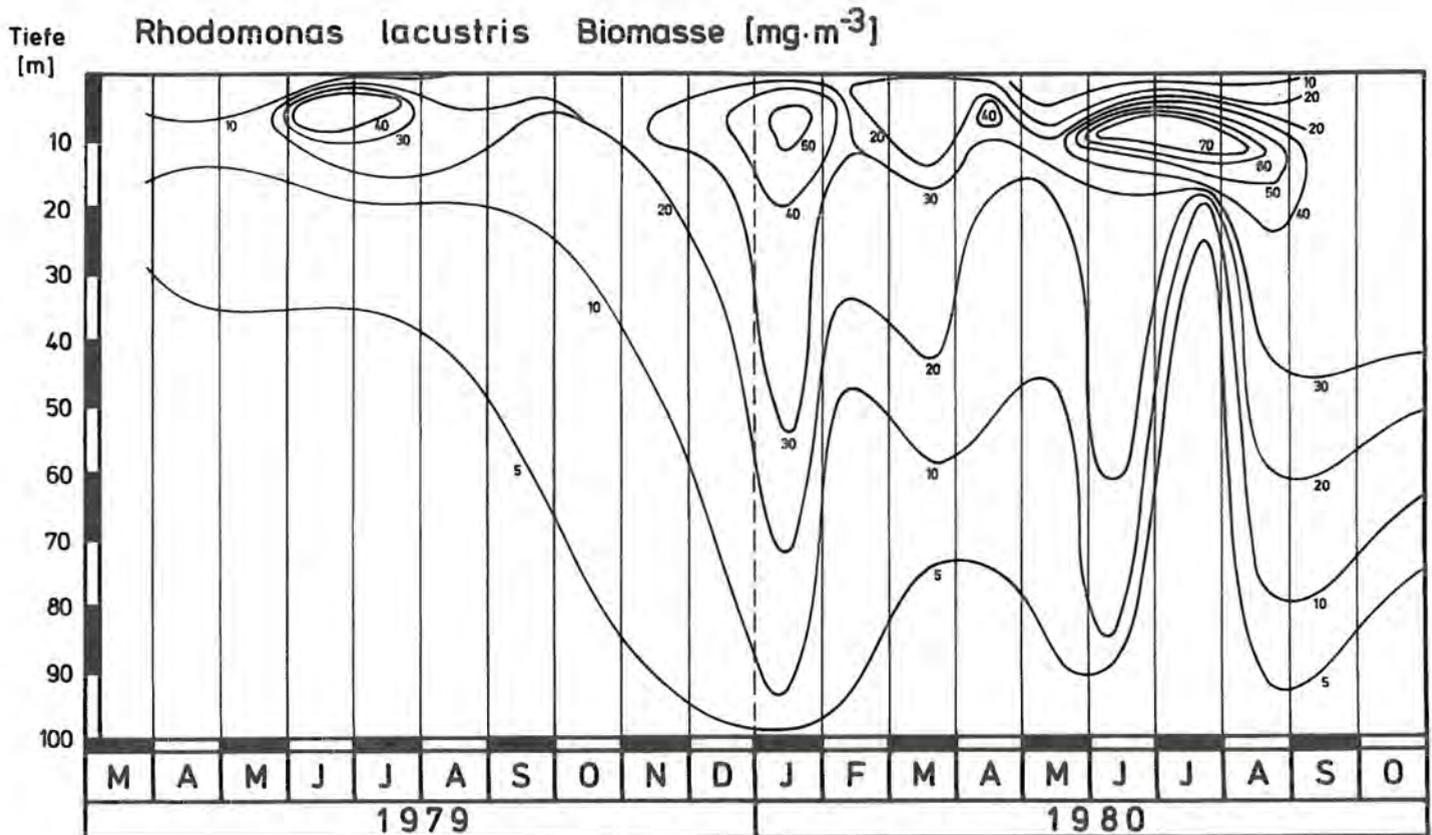


Abb. 71: Räumliche und zeitliche Verteilung von *Rhodomonas lacustris*.

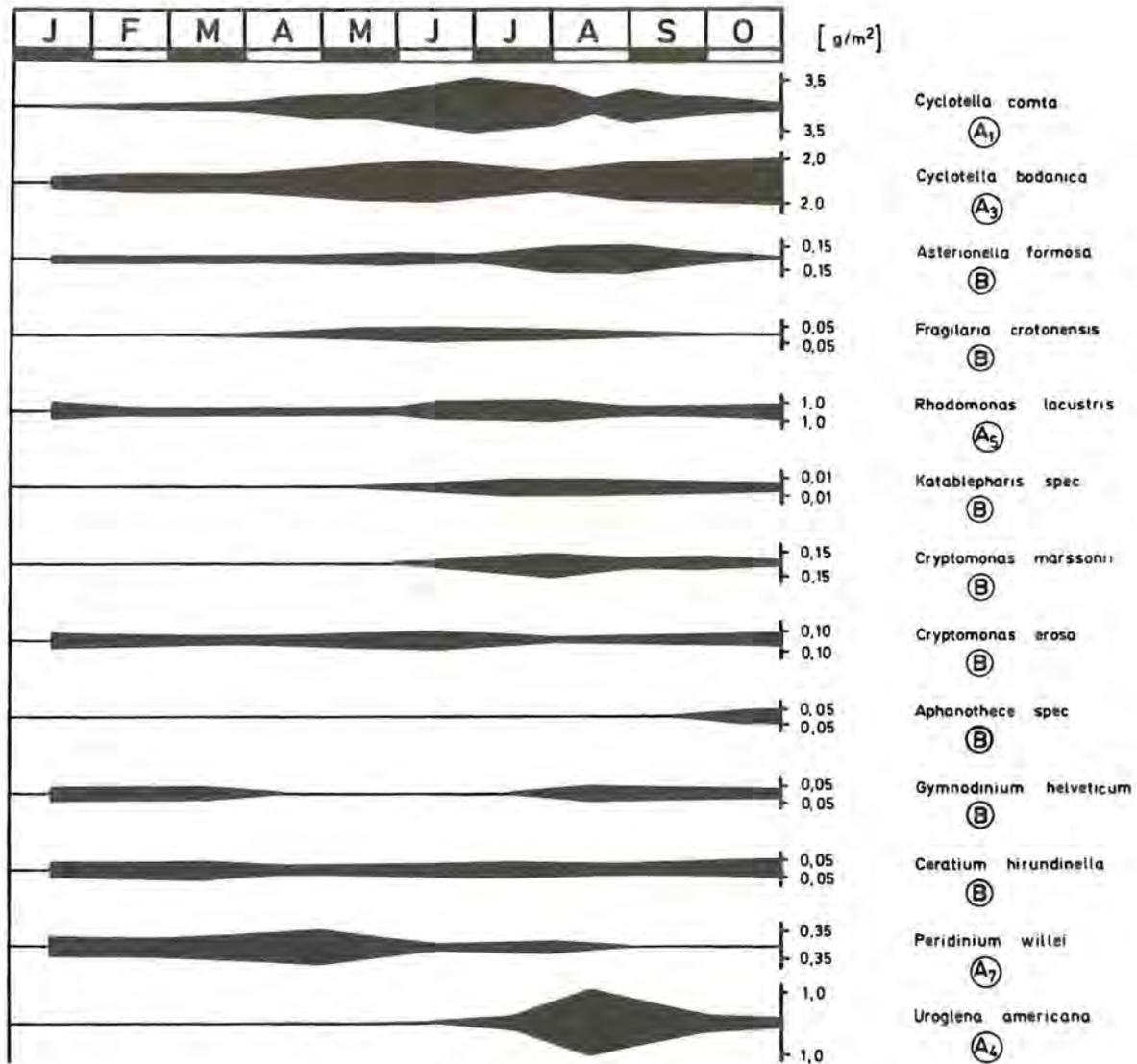


Abb. 72: Das jahreszeitliche Auftreten der Phytoplanktonarten im Königssee (1980). Näheres im Text.

Frischgewicht/m². Im Mai 1979 wurden sogar bis zu $15 \cdot 10^6$ Zellen/l gezählt. In diesem Fall zeigt das Königsseewasser bereits eine Vegetationsfärbung. Es ist bemerkenswert, daß sie auf den südlichen Seeteil (Südbecken und südlicher Teil des Nordbeckens) beschränkt war. Möglicherweise nahm sie ihren Ausgang vom Südbecken des Sees, um sich dann in nördlicher Richtung auszudehnen.

Wenn wir eine Rangordnung der Biomasse der einzelnen Arten aufstellen, ergibt sich folgendes: An 1. Stelle steht *Cyclotella comta* (Abb. 68) mit ca. 6 Millionen Zellen/l z. Zt ihres Maximums und ca. 6,6 g/m² Biomasse-Frischgewicht. Ihrer Bedeutung entsprechend sei sie in Abb. 76 durch ein Bild vorgestellt, das Frau Dr. B. Hickel vom Max-Planck-Institut in Plön mit dem Rasterelektronenmikroskop hergestellt hat. An 2. Stelle steht *Dinobryon cylindricum* (540 000 Zellen/l bzw. 5 g/m² z. Zt. des Maximums). Die 3. Stelle nimmt *Cyclotella bodanica* ein, gefolgt von *Uroglena americana* (4. Stelle), die sich, wie schon erwähnt, gelegentlich sogar an die Spitze stellen kann. Die 5. Stelle gehört *Rhodomonas lacustris* mit maximal 400 000 Zellen/l. *Dinobryon sociale* und *Peridinium willei* bilden das Ende dieser aus

8 Arten bestehenden Gruppe, die zumindest während ihrer maximalen Entfaltung jeweils ein Frischgewicht von $>0,5$ g/m² erreichen. Sie sind in Abbildung 72 und 73 mit den Zeichen A₁–A₈ versehen.

Von dieser Gruppe wollen wir eine 2. Gruppe unterscheiden, in welcher wir alle diejenigen Arten zusammenstellen, die 0,5 g/m² Frischgewicht auch während des Maximums nicht erreichen. Das sind (Abb. 72 und 73): *Ceratium hirundinella*, *Gymnodinium helveticum*, *Dinobryon divergens*, *Cryptomonas erosa*, *Cryptomonas marssonii*, *Asterionella formosa*, *Synedra acus* var *angustissima*, *Scherffelia* sp., *Katablepharis* sp., *Chrysoykos skujae* und *Chrysoykos planctonicus* (beim Zählen zusammengefaßt), *Chrysochromulina* sp., *Fragilaria crotonensis* und *Monoraphidium contortum*. Die in Abb. 72 und 73 berücksichtigten Arten dieser Gruppe sind durch ein B gekennzeichnet.

Zu den Vertretern einer 3. Phytoplanktongruppe zählen wir zuletzt alle Arten, die bei maximaler Dichte unter 0,05 g/m² bleiben. Zu ihnen gehören *Bitrichia chodati*, *Dinobryon borgei*, *Phaeaster aphanaster* und *Koliella longiseta*. Sie sind in Abb. 72 und 73 durch ein C gekennzeichnet.

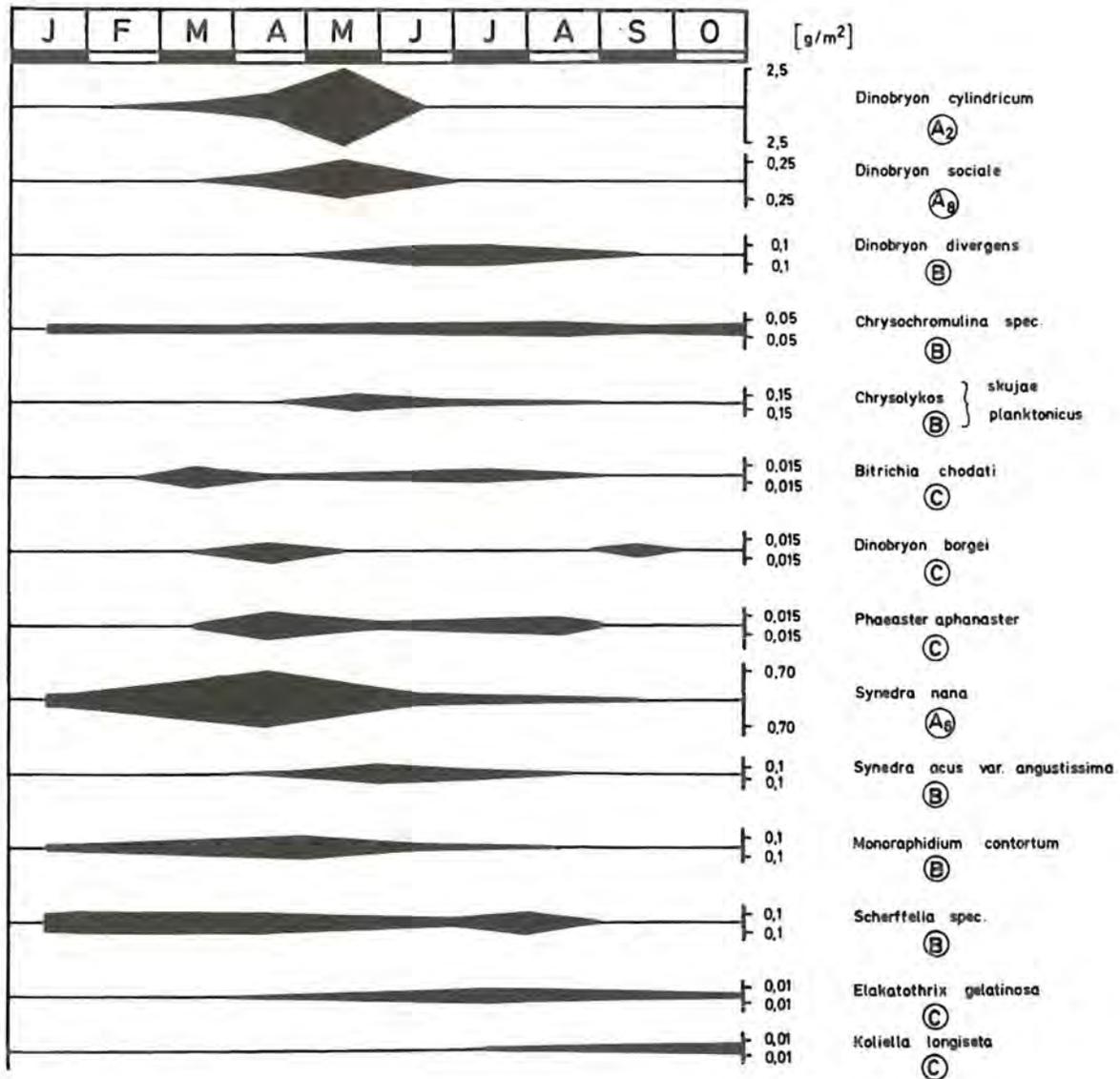


Abb. 73: Das jahreszeitliche Auftreten der Phytoplanktonarten im Königssee (1980). Näheres im Text.

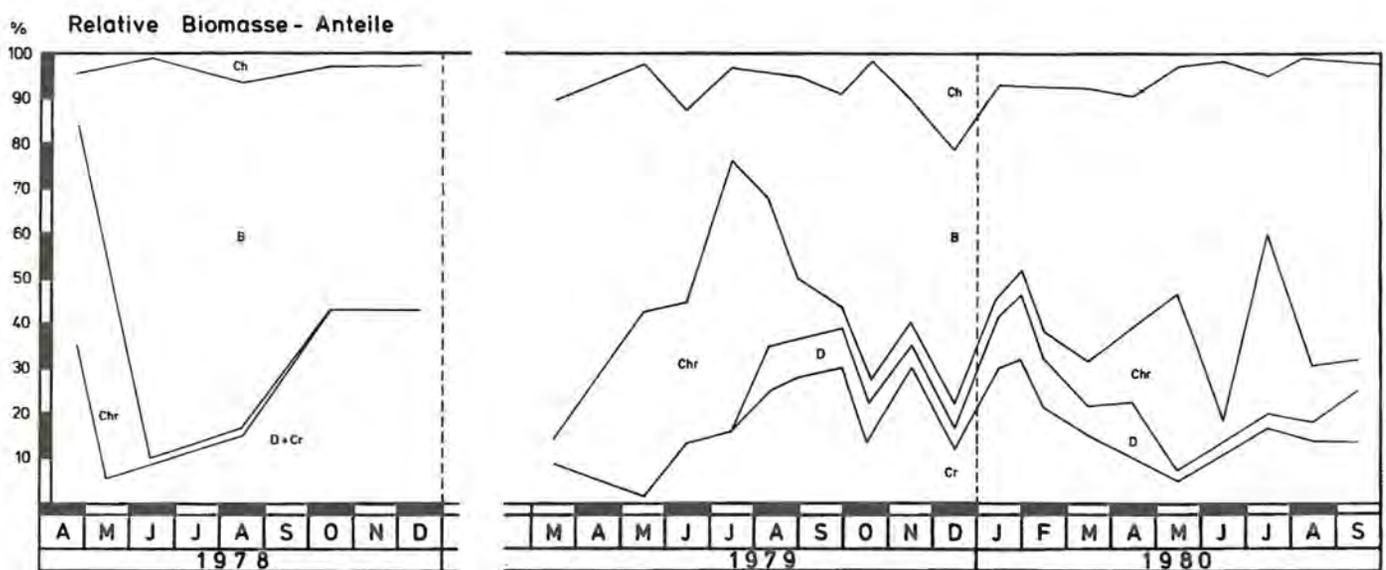


Abb. 74: Der jahreszeitliche Wechsel der Biomasse-Anteile im Königssee. Die Phytoplanktonarten sind zu ihren jeweiligen Klassen zusammengefaßt (B Bacillariophyceen, Ch Chlorophyceen, Chr. Chrysophyceen, Cr Cryptophyceen, D Dinophyceen).

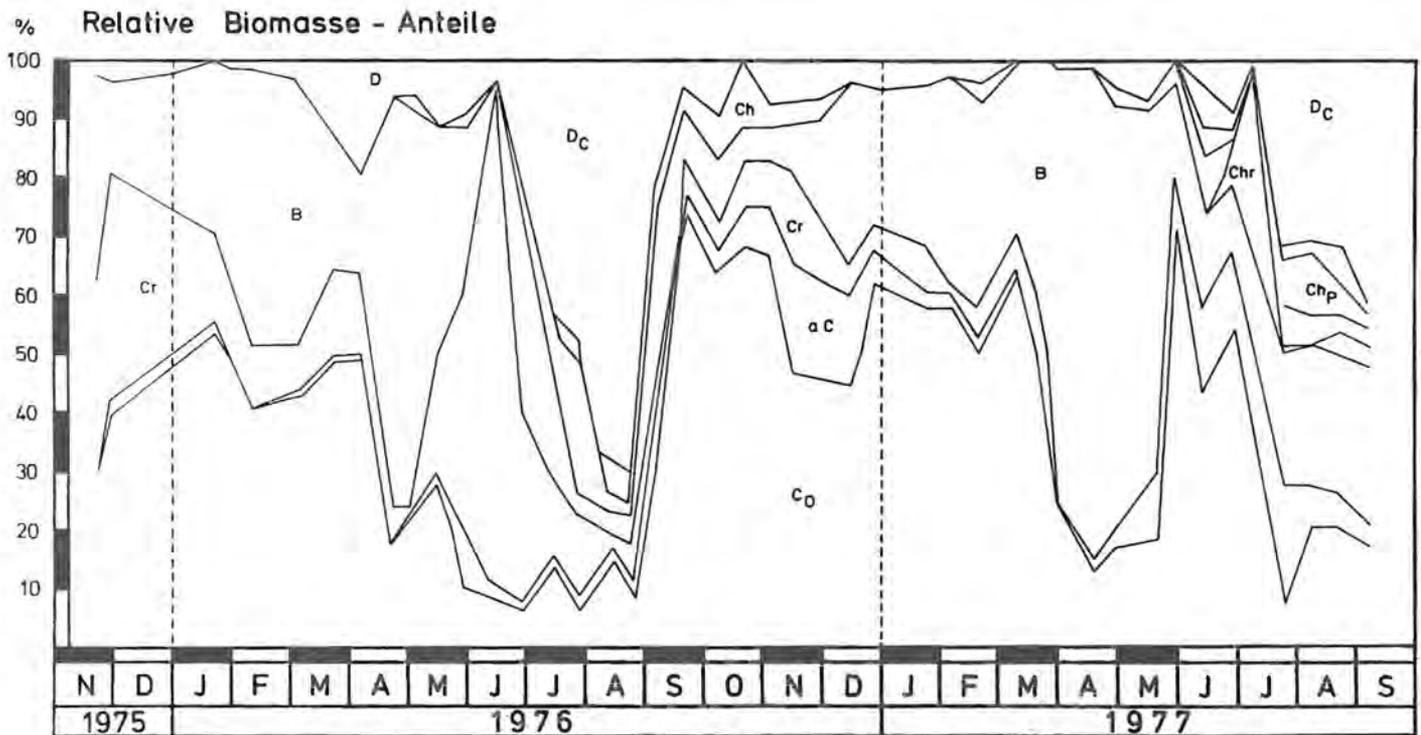


Abb. 75: Der jahreszeitliche Wechsel der Biomasse-Anteile im Ammersee. Man beachte die vorherrschende Rolle der Cyanophyceen (insbesondere von *Oscillatoria rubescens*) und von *Ceratium hirundinella*. B Bacillariophyceen, Chp Chlorophyceen: *Phacotus*, aC andere Cyanophyceen, Cr Cryptophyceen, Chr Chrysophyceen, C0 Cyanophyceen: *Oscillatoria rubescens*, Ch Chlorophyceen, D Dinophyceen, Dc *Ceratium hirundinella* (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 1978, verändert).



Abb. 76: *Cyclotella comta* durch das Rasterelektronenmikroskop fotografiert (Foto B. Hinkel)

Nachdem wir uns nun ein Bild über die Artenzahl, über deren Rangordnung nach der Biomasse und über ihre Verteilung in Raum und Zeit verschafft haben, stellen wir nunmehr die Frage nach dem Indikatorwert der einen oder der anderen Art. Für den oligotrophen Zustand des Königssees spricht das Vorherrschen von *Cyclotella*-Arten, darunter vor allem von *Cyclotella bodanica*. Auch die Arten der Gattungen *Asterionella*, *Dinobryon* und *Uroglena* sind typisch für nährstoffarme Seen. Von *Uroglena* und *Dinobryon* ist bekannt, daß sie bei $\text{PO}_4\text{-P}$ -Konzentrationen von über $20 \mu\text{g/l}$ nicht mehr existieren können. *Asterionella* ist weniger empfindlich,

doch liegt ihr Wachstumsoptimum ebenfalls noch unterhalb dieser Grenze (Grim 1939, Rodhe 1948). Daraus ergibt sich, daß das Vorherrschen der Chrysophyceen (die vor allem durch *Dinobryon cylindricum* und *Uroglena americana* repräsentiert werden) und der *Cyclotella*-Arten den oligotrophen Status des Königssees anzeigt. Das zeitweilige Massenaufreten von *Uroglena americana* steht hierzu nicht im Widerspruch. Es ist denkbar, daß *Uroglena* auf Nährstoffzugaben ähnlich reagiert wie *Asterionella* (Abb. 77). Die anderen Arten des Königssees könnten sich im Prinzip ähnlich verhalten wie *Scenedesmus* in dem zitierten Versuch, d. h. ihr Wachstum wird unter entsprechenden Düngzugaben zunächst sehr viel langsamer gesteigert.

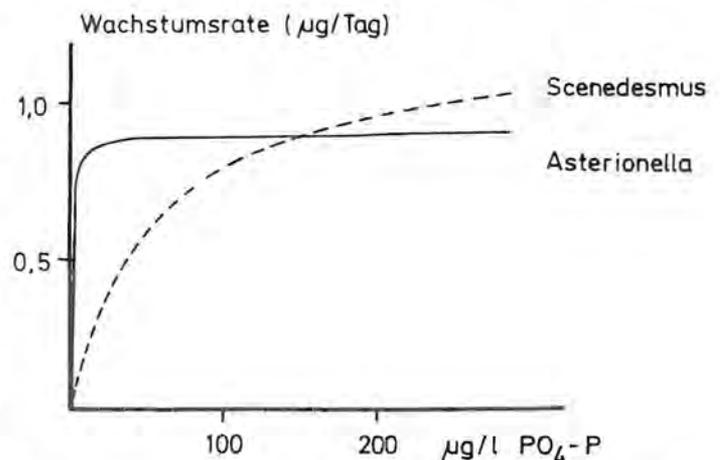


Abb. 77: Schema der Konkurrenzfähigkeit von Phytoplanktern mit unterschiedlichen Nährstoffansprüchen. Abszisse: Angebot an Orthophosphat, Ordinate: Wachstumsrate. Bei sehr niedrigem P-Angebot erzielt *Asterionella*, bei hohem dagegen *Scenedesmus* den höheren Zuwachs (nach Uhlmann 1975).

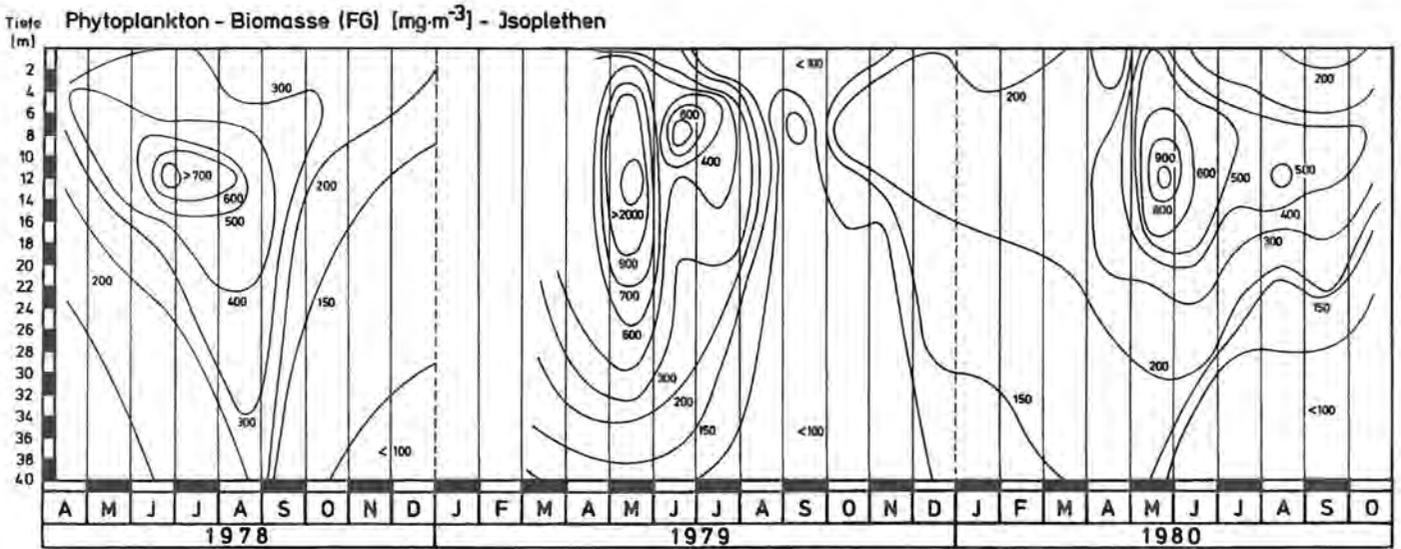


Abb. 78: Die jahreszeitliche Verteilung der Phytoplankton-Biomasse im Königssee. Die besonders hohen Werte im Mai 1979 sind auf das Massenaufreten von *Uroglena americana* zurückzuführen.

Die für eutrophe Seen typischen Phytoplankter, wie z. B. *Ceratium hirundinella*, *Fragilaria* und *Tabellaria*, spielen im Königssee eine untergeordnete Rolle. Besonders auffällig ist die geringe Bedeutung der Chlorophyceen und der Cyanophyceen, die in eutrophen Seen die vorherrschende Rolle spielen.

Die Phytoplanktonzusammensetzung eines Sees hängt aber nicht ausschließlich von der Höhe des Nährstoffangebots ab. Wichtig ist auch die Zusammensetzung der Nährstoffkomponenten. So könnte das Vorherrschen der Diatomeen gegenüber den Grünalgen bzw. der systematisch zu ihnen gehörenden Conjugatophyceen eine Folge des Überwiegens von Erdalkali-Ionen gegenüber Alkali-Ionen sein. (Ist das Verhältnis zwischen monovalenten und divalenten Kationen $< 1,5$, so

wird das Wachstum von Diatomeen, ist es $> 1,5$, wird das Wachstum von Chlorophyceen gefördert).

Für die Phytoplanktonzusammensetzung sollten aber auch die niedrigen Wassertemperaturen des Königssees von Bedeutung sein – vielleicht sogar die Besonderheit, daß die Temperaturschichtung innerhalb der trophogenen Zone liegt. Was die Temperaturschichtung betrifft, so behindert sie den vertikalen Wasseraustausch. Die Drift der Phytoplankter nach oben bzw. unten durch Turbulenz ist im Vergleich zu den Verhältnissen im Epilimnion ebenfalls eingeschränkt. So dominiert das schwerebedingte Absinken. Für die Phytoplankter des Königssees wäre ein für Wachstum und Reproduktion hinreichend langer Aufenthalt in der trophogenen Zone m. E. weniger gefährdet, wenn diese

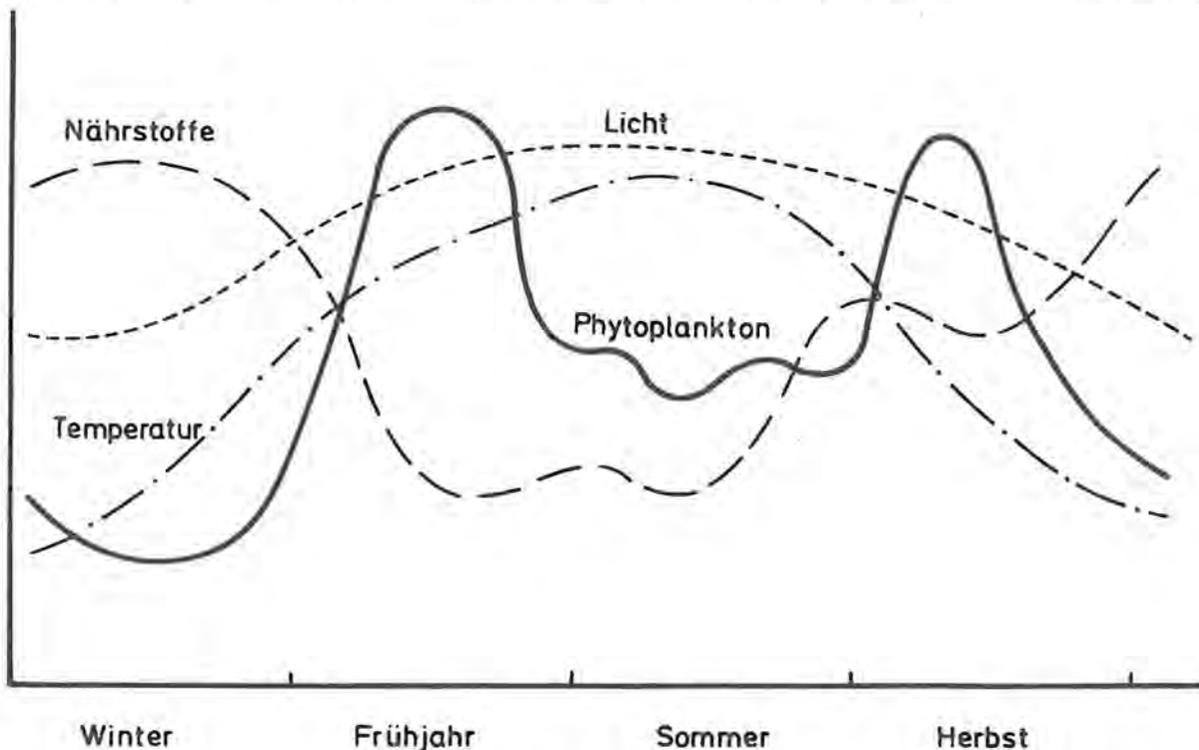


Abb. 79: In den Voralpenseen werden in der Regel zwei Phytoplanktonmaxima beobachtet, die mit dem unterschiedlichen Nährstoffangebot in engem Zusammenhang stehen (vgl. Abb. 80 und 81).

[g·m⁻²] Phytoplankton - Biomasse (Frischgewicht)

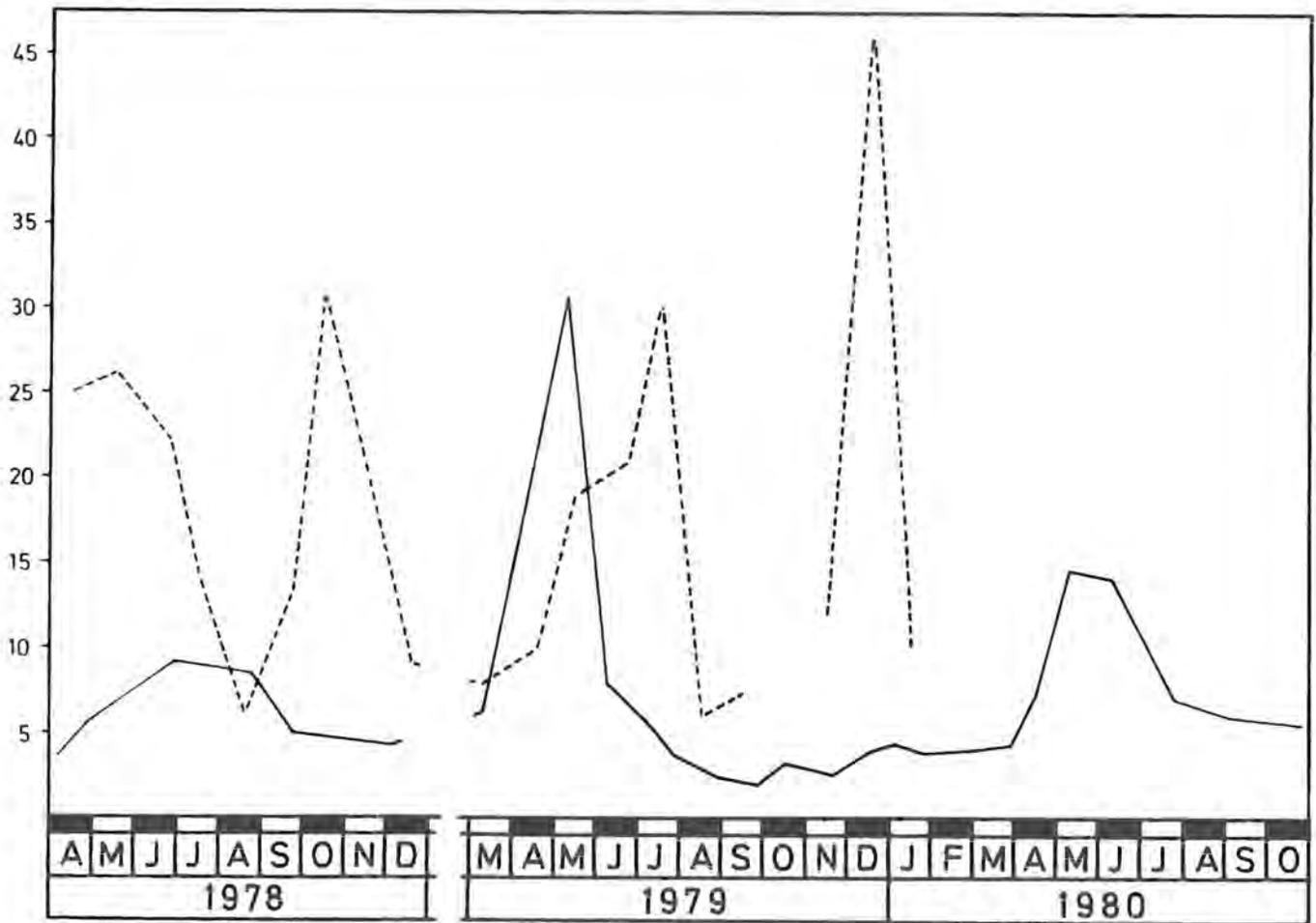


Abb. 80: Jahresverlauf der Biomasse-Entwicklung im Königssee (0–20 m) und Attersee (0–20 m). Man beachte die zweigipfeligen Kurven des Attersees, während die dem Königssee zugehörigen Kurve eingipfelig ist (Königssee: ausgezogene Linie, Attersee: strichliert).

innerhalb eines Epilimnions liegen würde. Um dem unter den gegebenen Bedingungen im Königssee geförderten Absinken entgegenzuwirken, stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung: 1. eine weitgehende Annäherung des spezifischen Gewichts der Phytoplankter an das umgebende Wasser und 2. aktive Ortsbewegungen zur Kompensation bzw. Überkompensation des Absinkens.

Für die im Königssee vorherrschenden Bacillariophyceen ist es vor allem wegen der Kieselshale (Abb. 76) schwierig, eine entsprechende Angleichung des spezifischen Gewichts an das des Wassers zu erreichen. Es bietet sich aber eine andere Möglichkeit an: die Vergrößerung des Formwiderstandes, wodurch die beim Absinken entstehenden Reibungskräfte erhöht werden. Dies kann u. a. durch Verringerung des Körpervolumens erfolgen, wodurch sich das Verhältnis Oberfläche/Volumen zugunsten der Oberfläche verschiebt. Die kleinen Dimensionen der vorherrschenden *Cyclotella comta* könnten in diesem Zusammenhang einen besonderen Stellenwert besitzen. Was die 2. Möglichkeit betrifft, um das Absinken zu bremsen bzw. zu verhindern, so fällt auf, daß eine besonders hohe Zahl der Königssee-phytoplankter beweglich ist (Tabelle 28). Von diesen Arten ist z. T. bekannt, daß sie zu ausgedehnten Verti-

kalwanderungen befähigt sind und so das Absinken vermeiden.

6.2.1.3 Biomasse und Chlorophyll

In diesem Abschnitt betrachten wir das Phytoplankton in seiner Gesamtheit, und zwar durch sein Frischgewicht bzw. durch seine Chlorophyllmenge. Abb. 78 informiert über die jahreszeitlichen Veränderungen der Biomasse. Sie verdeutlicht die bereits früher erwähnte Feststellung, daß die Dichtemaxima der meisten Arten in die Zeit zwischen Mai und Juli fallen. Innerhalb dieser Jahreszeit treffen wir daher die höchste pflanzliche Biomasse an. Darüber hinaus ergibt sich, daß die Hauptmenge der Phytoplanktonbiomasse zwischen 6–18 m anzutreffen ist und daß pro Jahr nur jeweils ein einziges Maximum aufgebaut wird. In den meisten Seen – und das gilt auch für die in diesem Bericht schon mehrmals genannten Seen, wie Attersee (Abb. 80), Mondsee (Abb. 81) und Ammersee (Abb. 81) – beobachtet man jedoch 2 Phytoplanktonmaxima: ein Frühjahrsmaximum und ein Herbstmaximum (Abb. 79). Da sie sich im Anschluß an die Frühjahrs- bzw. Herbstzirkulation entwickeln, geht man wohl nicht fehl in der Annahme, daß das einzige Maximum des Königssees ebenfalls mit seinem Zirkulationsverhalten in Zusammenhang zu brin-

[g m⁻²] Phytoplankton - Biomasse (Frischgewicht)

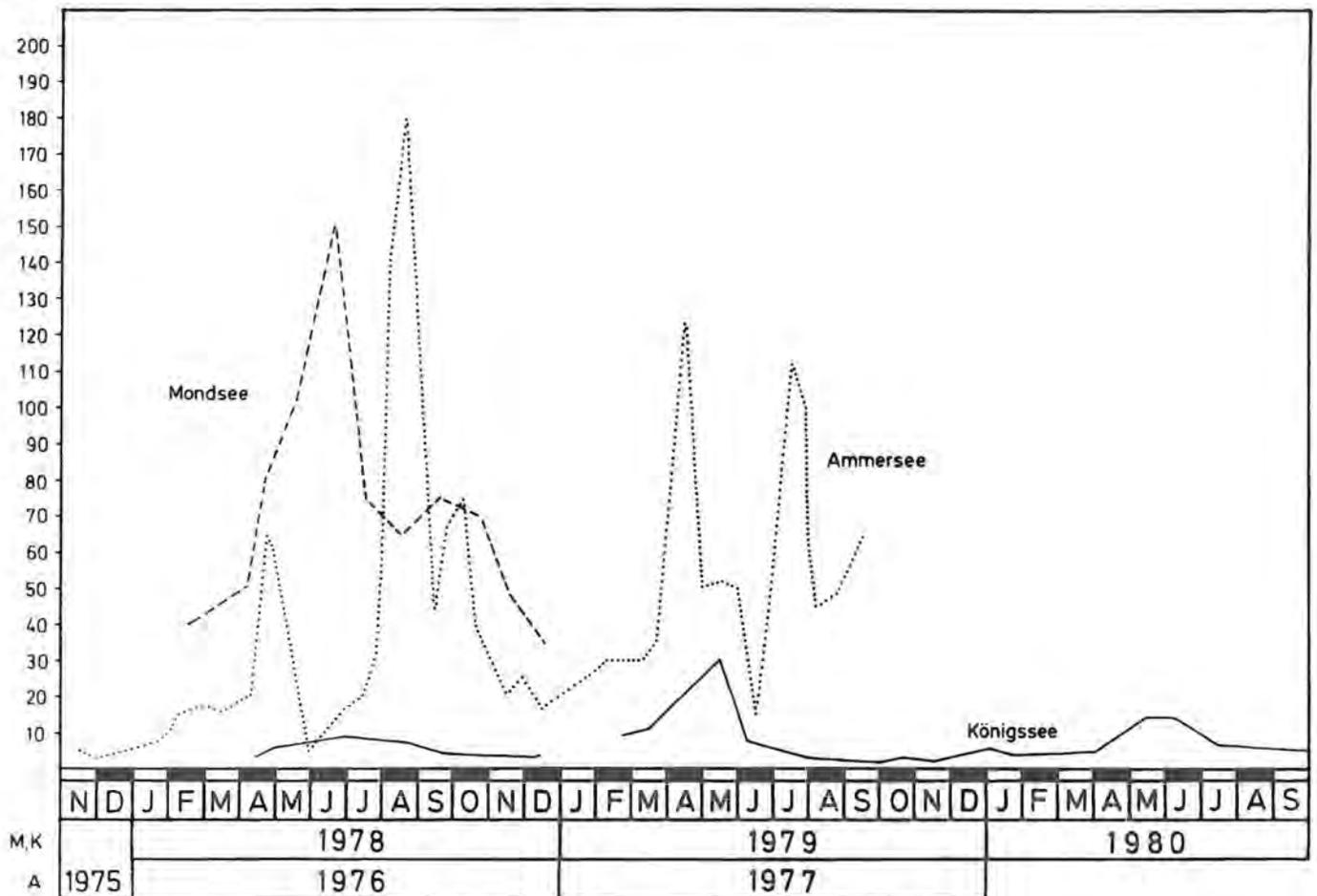


Abb. 81: Jahresverlauf der Biomasse-Entwicklung im Königssee (0–20 m), Mondsee (0–20 m) (Schwartz 1979) und Ammersee (0–20 m) (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 1978).

gen ist. Obgleich seine Entwicklung verhältnismäßig spät einsetzt, entspricht es dem Frühjahrsmaximum anderer Seen, zumal wir es im Anschluß an die Frühjahrszirkulation beobachten. Da die Herbstzirkulation erst im November/Dezember tiefere Schichten erfaßt, dürfte es infolge der ungünstigen Lichtverhältnisse für ein Herbstmaximum zu spät sein. Dieses Verhalten des Königssees schließt Ansätze zu einem Herbstmaximum aber nicht aus, denn es ist denkbar, daß es witterungsbedingt auch schon zu einem früheren Zeitpunkt als im Untersuchungszeitraum beobachtet, Zirkulationen geben kann, durch welche die trophogene Zone entsprechend früher mit Nährstoffen versorgt wird. Die größte Nährstoffversorgung der trophogenen Zone dürfte jedoch im Frühjahr erfolgen, wenn neben dem Nährstofftransport aus tieferen Schichten auch ein Nährstofftransport durch reichlich zufließende Schmelzwasser erfolgt.

In den Abb. 80 und 81 läßt sich der Biomasse-Ertrag des Königssees mit jenem des Attersees, des Mondsees und des Ammersees vergleichen. Vergleichen wir den Königssee zunächst mit dem ebenfalls oligotrophen Attersee (Abb. 80), so zeigt sich, daß die Biomasse des Königssees durchwegs niedriger ist. Nur ein einziges Mal wurde im Königssee eine entsprechend hohe Biomasse beobachtet. Das war im Mai 1979, als *Uroglena*

americana das größte Maximum zwischen 1978–1980 erreicht hatte.

Aus dem Vergleich des Königssees mit zwei eutrophen Seen, dem Mondsee und dem Ammersee, ergibt sich erwartungsgemäß ein auffälliger Unterschied (Abb. 81), denn ihre Phytoplanktonbiomasse übersteigt jene des Königssees über lange Zeiträume hinweg um über 90%. Detaillierte weitere Informationen liefert Tabelle 30, deren Datenzusammenstellung auch einen Vergleich mit dem mesoeutrophen Bodensee (Obersee) gestattet. Schließlich sei anhand von Abb. 82 der mittlere Chlorophyllgehalt des Königssees mit entsprechenden Angaben der über einen langen Zeitraum sehr intensiv untersuchten kanadischen Seen (Lake Superior, Lake Huron, Central Erie, Lake Ontario) verglichen. Daraus folgt, daß der Königssee neben den zahlreichen anderen bisher schon erwähnten Kriterien auch durch seinen Chlorophyll-a-Gehalt von < 2 µg/l (1,5–1,8 µg/l) zu den oligotrophen Seen gehört.

Tabelle 30

Chlorophyll und Biomasse in der trophogenen Zone

See				
Königssee (oligotroph)				
Meßgröße	Biomasse		Chlorophyll	
	(g/m ²)	(g/m ³)	(mg/m ²)	(mg/m ³)
Jahresmittel	6,83	0,31	33,68	1,61
Frühjahrsmittel	10,88	0,47	38,82	1,83
Sommermittel	6,79	0,30	36,23	1,65
Herbstmittel	4,11	0,21	30,37	1,58
maximaler Wert	30,62	3,04	62,83	3,0 *)
minimaler Wert	1,82	0,05	20,22	0,30
Attersee (oligotroph) ¹⁾				
Jahresmittel	9,50	0,40	32,55	1,66
Frühjahrsmittel	18,40	0,82	37,60	1,77
Sommermittel	4,37	0,43	15,40	1,25
Herbstmittel	9,44	0,14	37,00	2,05
maximaler Wert	22,90	1,36	64,20	2,70
minimaler Wert	2,80	0,11	11,20	0,98
Bodensee (Obersee) (meso-eutroph) ¹⁾				
Jahresmittel	10,64	0,97	69,25	6,45
Frühjahrsmittel	15,67	1,76	125,00	14,68
Sommermittel	15,67	1,76	125,00	14,68
Herbstmittel	18,57	1,40	76,00	5,03
maximaler Wert	43,90	3,99	253,00	36,14
minimaler Wert	0,40	0,01	6,00	0,19

1) Aus Swiss Federal Board for Environmental Protection 1980

*) Beim Massenaufreten von *Uroglena americana* 1979 im Juni: 5 mg/m³

6.2.2 Das Crustaceenplankton (Tafel VI)

6.2.2.1 Artenzusammensetzung

Im Gegensatz zu dem in vieler Hinsicht ähnlichen Attersee, in dem zehn pelagische Crustaceenarten vorkommen, gibt es im Königssee nur fünf Arten (Tabelle 31). Die Copepoden werden durch den Diaptomiden *Arctodiaptomus alpinus* und den Cyclopiden *Cyclops abyssorum* vertreten (im Attersee sind es nach Moog [1979] *Eudiaptomus gracilis*, *Mixodiaptomus laciniatus*, *Cyclops abyssorum praealpinus* und *Mesocyclops leuckarti*) und die Cladoceren durch *Daphnia hyalina*, *Ceriodaphnia quadrangula* und *Bosmina longispina* (im Attersee sind es *Diaphanosoma brachyurum*, *Daphnia hyalina*, *Daphnia cucullata*, *Bosmina longispina*, *Leptodora kindtii* und *Bythotrephes longimanus*). Nach den Untersuchungen von Einsle (1975) gehört auch der in der Arbeit von Schindler (1950) mit dem Namen *Cyclops strenuus* Fischer bezeichnete Cyclopoide einer anderen Art an. Sie trägt heute den Namen *Cyclops abyssorum* Sars 1863. Im Königssee handelt es sich nach Einsle (persönl. Mitteilung) um eine verhältnismäßig kleine Form, die jedoch im Experiment bei günstigeren Ernährungsbedingungen die für *Cyclops abyssorum* normalerweise anzutreffende Größe erreicht. Daß *Cyclops abyssorum* im Attersee durch *Cyclops abyssorum praealpinus* vertreten wird, kann als Folge der dort gegebenen günstigeren Ernährungsbedingungen gewertet werden.

Der 2. im Pelagial des Königssees vorkommende Copepode gehört zu den Calanoiden. Er wird bei Schindler (1950) noch als *Diaptomus bacillifer* bezeichnet, doch konnte ihn Kiefer (1971) eindeutig als *Arctodiaptomus* (Rh.) *alpinus* (Imhof 1885) identifizieren. Nach den bisherigen Kenntnissen ist der Königssee der einzige Fundort in Deutschland für diese Art, die anscheinend auch in anderen Ländern Alpengewässer bevorzugt.

Die *Daphnia*-Arten: *D. longispina*, *D. hyalina* und *D. galeata* bilden nach Flößner (1972) eine enge Verwandtschaftsgruppe mit zahlreichen Übergangsformen. Wenn für den Königssee heute die Art *Daphnia hyalina* anstelle der früher angegebenen *D. longispina* O. F. Müller (Schindler 1950) genannt wird, so bedeutet das mit Sicherheit ebensowenig einen Wechsel der betreffenden Arten wie in den oben schon besprochenen Fällen. Es handelt sich vielmehr um die Berücksichtigung einer feineren systematischen Differenzierung, die erst seit einigen Jahren möglich ist.

Daphnia hyalina und *Bosmina longispina* bevorzugen kühles Wasser zwischen 4–15°C. Man kann sie daher beide als gemäßigte Kaltwasserformen bezeichnen. So weiß man von *Bosmina longispina* (Ruttner 1930), daß sie im Lunzer Untersee ihre höchsten Bestandsdichten bei Temperaturen um 11°C erreicht.

Bosmina longispina und *Ceriodaphnia quadrangula* sind nach Flößner (1972) Indikatororganismen für Oli-

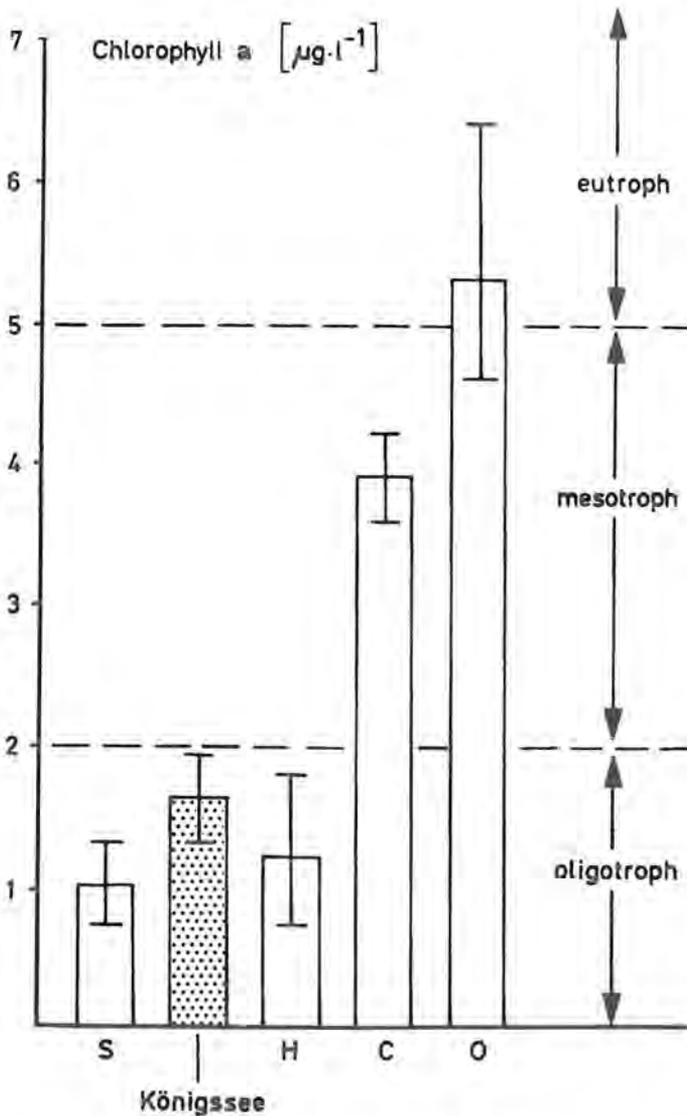


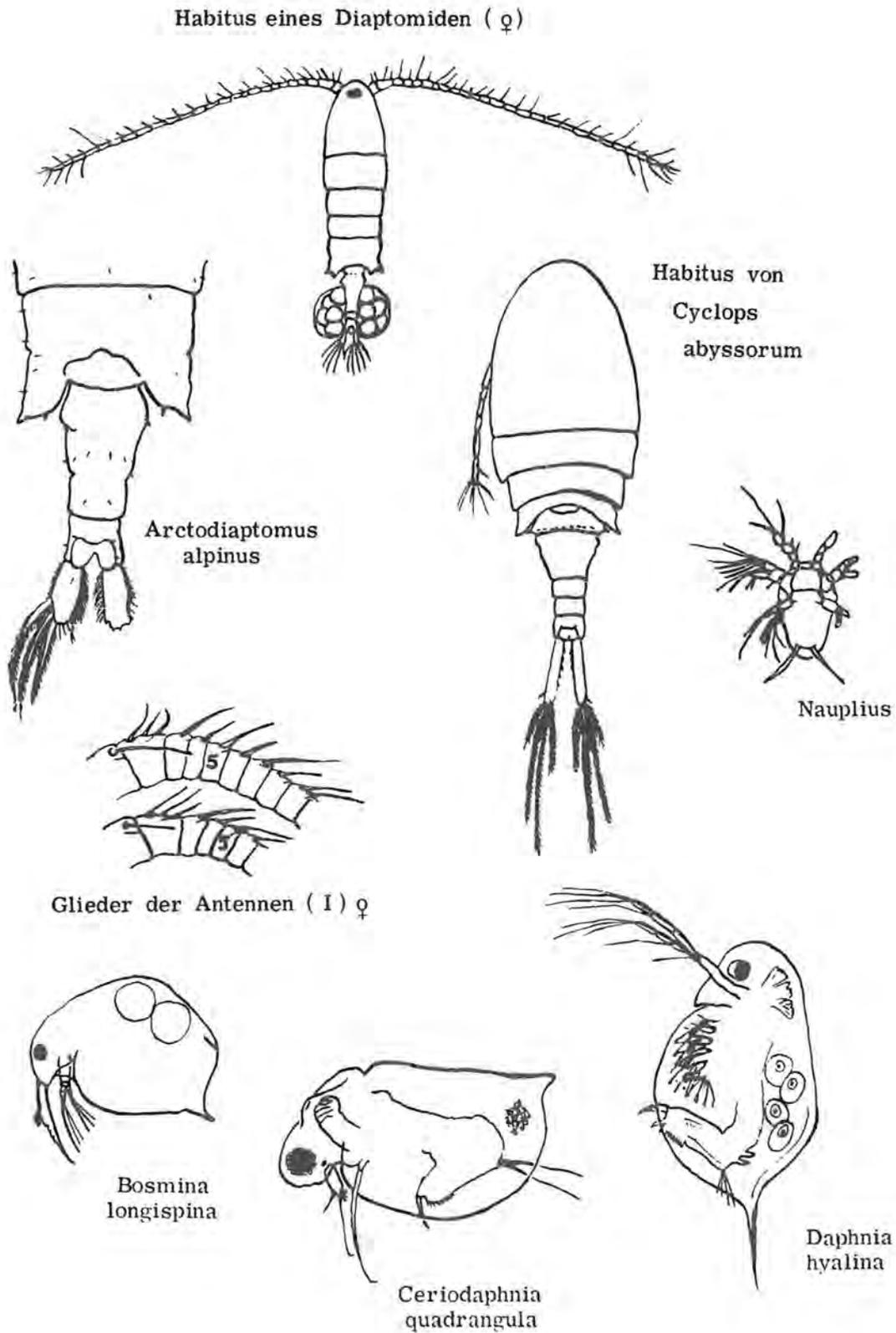
Abb. 82: Chlorophyll-a-Gehalt in The Great Lakes. Mittelwerte aus den Untersuchungsjahren 1967–1975. Die Grenzbereiche enthalten die Mittelwerte aus verschiedenen Jahren. S Superior, H Huron, C Central Erie, O Ontario (nach Angaben von Hugh F. H. Dobson, pers. Mitt. gezeichnet).

Tabelle 31

Artenliste der pelagischen Kleinkrebse des Königssees: Klasse Crustacea¹⁾

Copepoda (Unterklasse)	Branchiopoda (Unterkl.)
DIAPTOMIDAE (Familie):	DAPHNIIDAE (Familie):
<i>Arctodiaptomus alpinus</i> Imhof 1889	<i>Daphnia hyalina</i> (s. str.) Leydig 1860
CYCLOPOIDAE (Familie):	<i>Ceriodaphnia quadrangula</i> (det. Kořinek)
<i>Cyclops abyssorum</i> G.O. Sars 1863	BOSMINIDAE (Familie):
	<i>Bosmina longispina</i> (det. Kořinek)

¹⁾ Copepoda det. U. Einsle, Branchiopoda det. J. Hrbáček



Oben: Habitus eines Diaptomiden (lange Antennulae!); von Arctodiaptomus alpinus sind ein Teil des Thorax und des Pleon mit Furca, sowie die ersten Basalglieder der Antennulae dargestellt. Cyclops abyssorum (kurze Antennulae!) und Nauplius-Larve. Darunter die 3 Cladoceren des Königssees. Die Größenverhältnisse sind nicht maßstabgetreu! (nach Vorlagen aus Kiefer 1978, Flößner 1972 u.a. gezeichnet von Dr. K. Preißler).

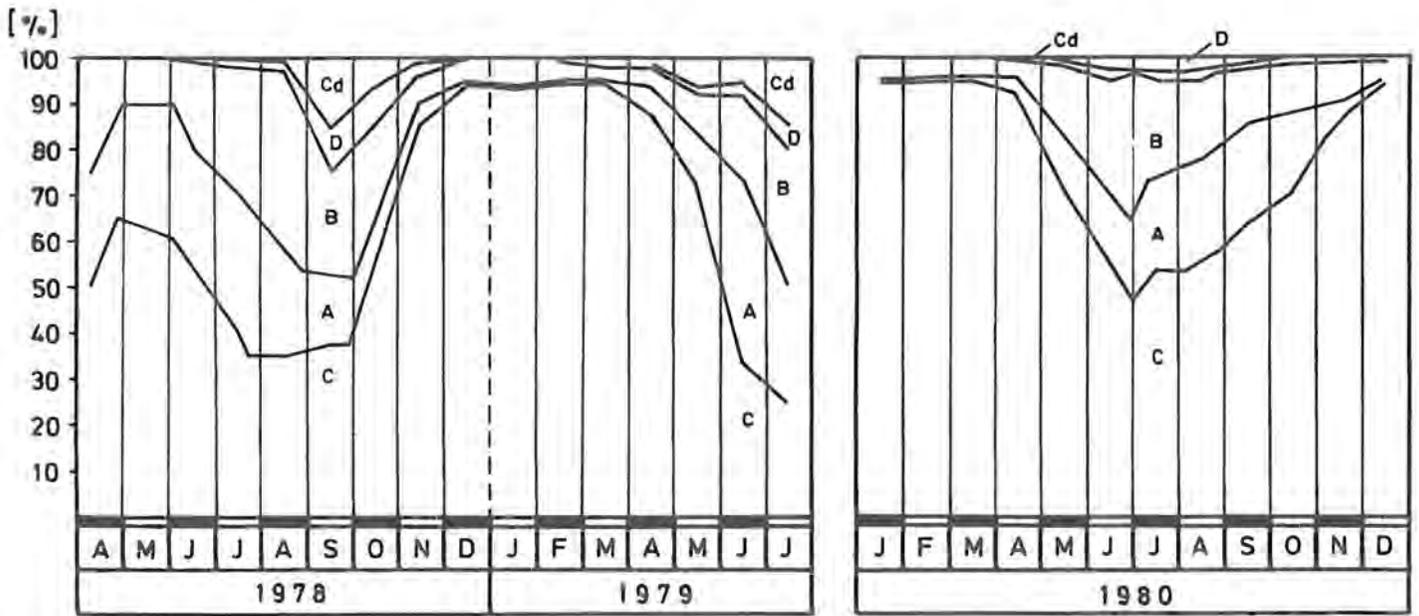


Abb. 83: Der relative Anteil der fünf Arten des pelagischen Crustaceenplanktons vom Königssee im Wechsel der Jahreszeiten. A Arctodiaptomus, B Bosmina, C Cyclops, Cd Ceriodaphnia, D Daphnia.

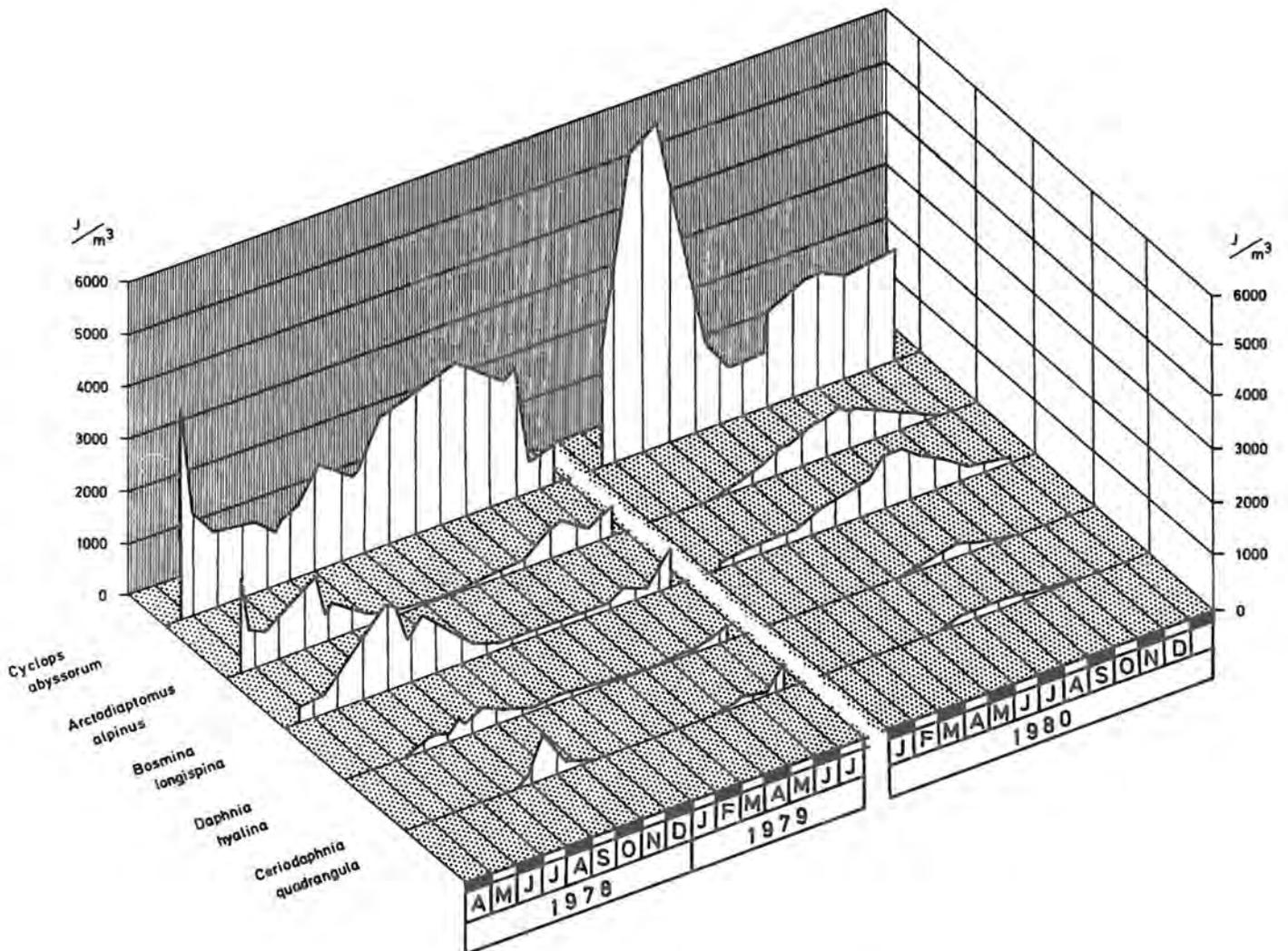


Abb. 84: Die jahreszeitliche Verteilung der fünf pelagischen Crustaceenarten des Königssees.

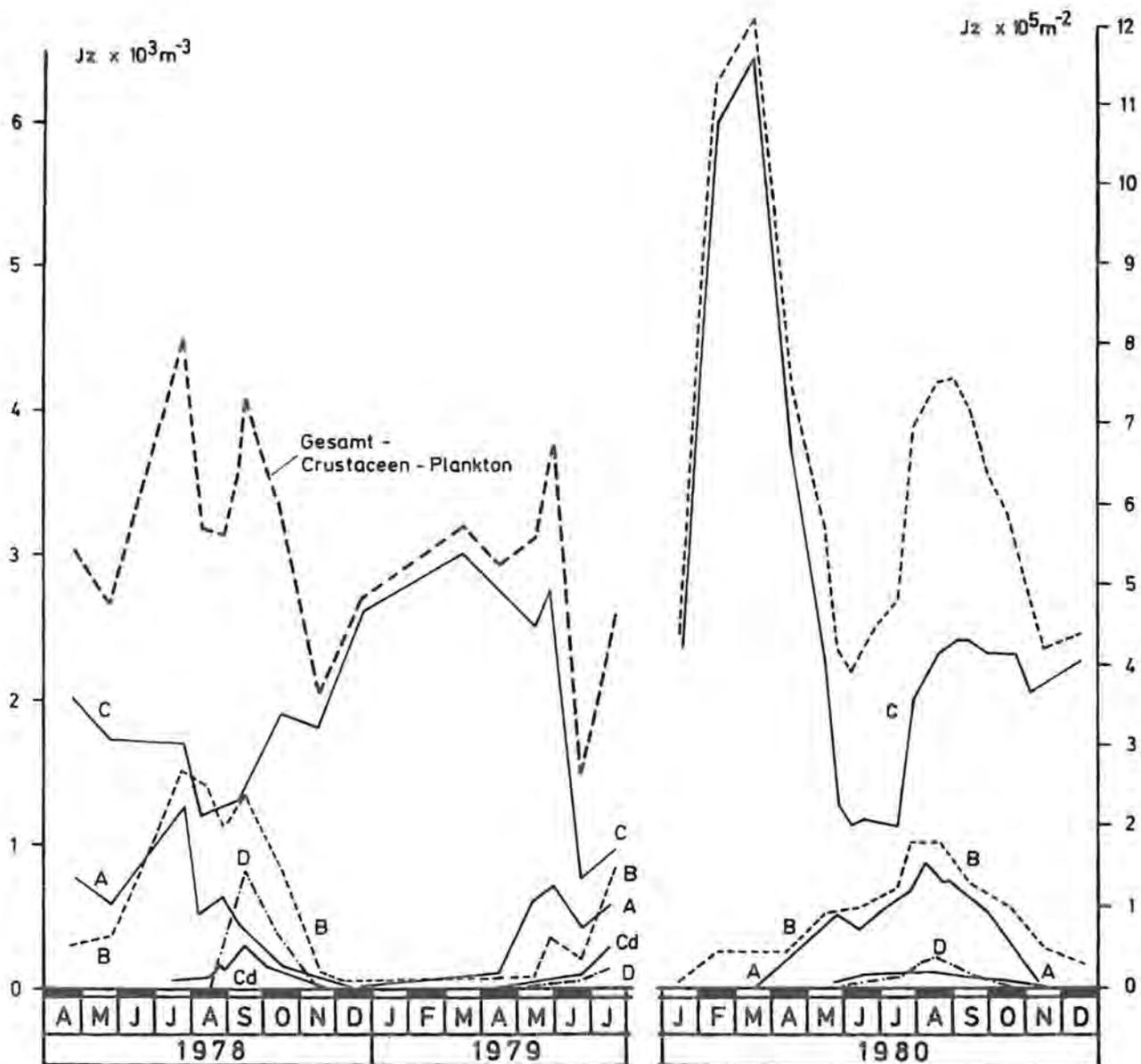


Abb. 85: Jahreszeitliche Verteilung der fünf pelagischen Crustaceen des Königssees einschließlich der Gesamtzahl aller Crustaceen.

gotrophie. Nach den aus anderen Seen gesammelten Erfahrungen wäre für den Königssee im Falle eines reicheren Nahrungsangebots zunächst das Auftreten von *Cyclops abyssorum praealpinus* und später von *Cyclops vicinus* zu erwarten. Unter den Cladoceren würde wahrscheinlich zunächst *Bosmina longispina* durch *Bosmina coregoni* abgelöst werden und *Daphnia hyalina* durch *Daphnia longispina* und/oder *Daphnia cucullata* – vorausgesetzt, daß die niederen Temperaturen des Königssees kein unüberwindliches Hindernis darstellen.

Nach seiner gegenwärtigen Artenzusammensetzung könnte der Königssee als „*Cyclops abyssorum*-See“ bezeichnet werden, denn es ist allein diese Art, die im Crustaceenplankton das ganze Jahr über die beherrschende Rolle spielt (Abb. 84) und dabei Individuenzahlen bis über 6000/m³ erreichen kann. In großem Abstand folgen *Arctodiaptomus alpinus* und *Bosmina longispina* mit jeweils maximal bis zu 1500 Tieren/m³. Die letzten beiden Positionen nehmen *Daphnia hyalina* und *Ceriodaphnia quadrangula* ein, die mit höchstens einigen wenigen hundert Individuen/m³ von verhältnismäßig untergeordneter Bedeutung sind.

Im jahreszeitlichen Auftreten gibt es keine großen Unterschiede zwischen den verschiedenen Arten. Aus Abb. 84 und 85 folgt, daß nur *Cyclops abyssorum* schon im Frühjahr maximale Dichten erreicht, während alle übrigen Crustaceen die wärmere Jahreszeit bevorzugen. Wir werden später sehen, daß dies auch für die Ausgewachsenen von *Cyclops* zutrifft. Das Frühjahrsmaximum kommt vor allem durch seine Jugendstadien zustande.

6.2.2.2 Tiefenverteilung

In den Abb. 86 und 87 sind die Tiefenverteilungen der fünf Crustaceen-Arten dargestellt. Die ihnen zugrunde liegenden Fänge (10-m-Stufenlänge mit Schließnetz) wurden ausschließlich am Tage zwischen 10–15 Uhr durchgeführt. Aus den Vertikalprofilen folgt, daß alle Crustaceen-Arten die trophogene Zone (0–20 m) bevorzugen, obgleich zeitweilig auch in größerer Tiefe erhebliche Mengen festgestellt worden sind. Im großen und ganzen kommen ca. 80% aller Tiere innerhalb der oberen 40-m-Wasserschicht vor. In dieser Schicht haben die Herbivoren unter ihnen zwischen 0–20 m

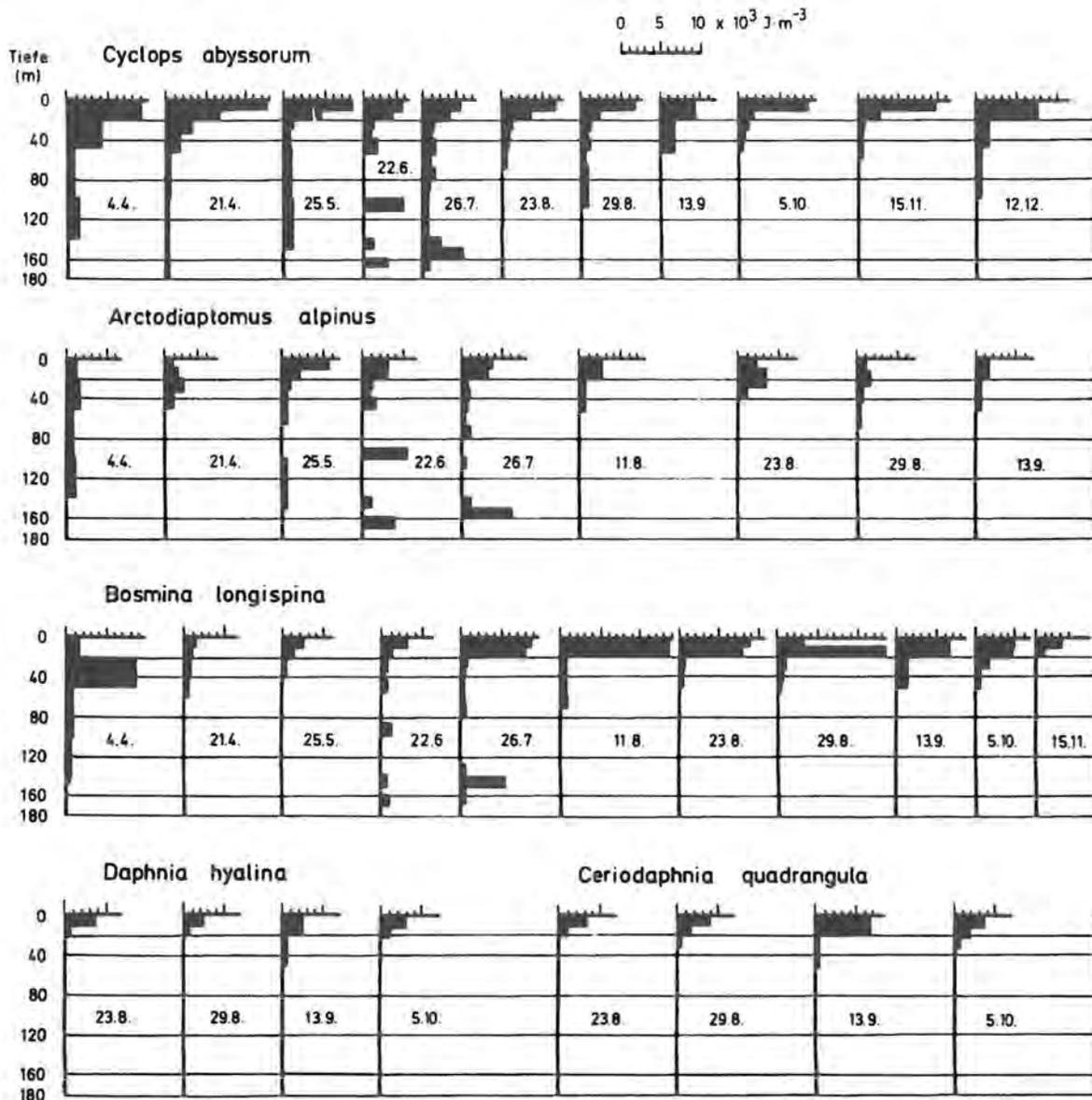


Abb. 86: Vertikalverteilung der pelagischen Crustaceen des Königssees (1978).

das beste Nahrungsangebot. Es ist das mit frischen Assimilationsprodukten beladene Phytoplankton, das aber auch in der folgenden 20- bis 40-m-Schicht immerhin noch zu einem erheblichen Anteil intakt ist. Erst unterhalb dieser Tiefe ist erwiesen, daß der Abbau der abgesunkenen Pelagialalgen schon weit vorangeschritten ist.

In großen Tiefen werden im Königssee im allgemeinen keine nennenswerten Crustaceenmengen angetroffen. Ausnahmen deuten die Fänge vom Juni/Juli 1978 an, durch welche bis in 170 m Tiefe erhebliche Mengen an *Cyclops*, *Arctodiaptomus* und *Bosmina* erbeutet worden sind. Für diesen Einzelbefund gibt es jedoch keine Erklärung. Dasselbe gilt für den verhältnismäßig ergiebigen Tiefenfang vom Februar 1980, der jedoch nur *Cyclops abyssorum* betraf.

Sieht man von diesen Ausnahmeerscheinungen ab, so zeigen die beiden Darstellungen, daß die planktonfressenden Fische des Königssees ihre Nahrung am leichtesten in der oberen 40-m-Schicht finden. Das gilt auch

für andere Tageszeiten, da Voruntersuchungen gezeigt haben, daß die tagesperiodische Vertikalwanderung im wesentlichen innerhalb dieser Schicht erfolgt. Infolge der höheren Tierdichte in 0–20 m ist dort die Trefferwahrscheinlichkeit für planktonsuchende Fische am größten. Es ist sehr wahrscheinlich, daß sich die gefundenen Tierdichten am späten Nachmittag und in den Abendstunden durch die aufwärtswandernden Crustaceen – wie an vielen anderen Seen schon erwiesen ist (z. B. Siebeck 1960) – noch merklich erhöhen. Diese Entwicklung wird von planktonfressenden Fischen bekanntlich ausgenutzt, indem sie erst am späteren Nachmittag oder am Abend bis zum Einbruch der Dunkelheit auf Planktonfang gehen (Seitz 1977).

Es wurde bereits angedeutet, daß sich die tagesperiodische Vertikalwanderung innerhalb der oberen 40-m-Wasserschicht abspielt. Aus stichprobenartigen Untersuchungen folgt, daß die Wanderamplitude der Cladoceren – u. U. auch die von *Arctodiaptomus alpinus* – sogar wesentlich geringer ist – auch im Vergleich mit anderen Seen von ähnlicher spektraler Strahlungstransmission. Es ist daher denkbar, daß das Abwärts-

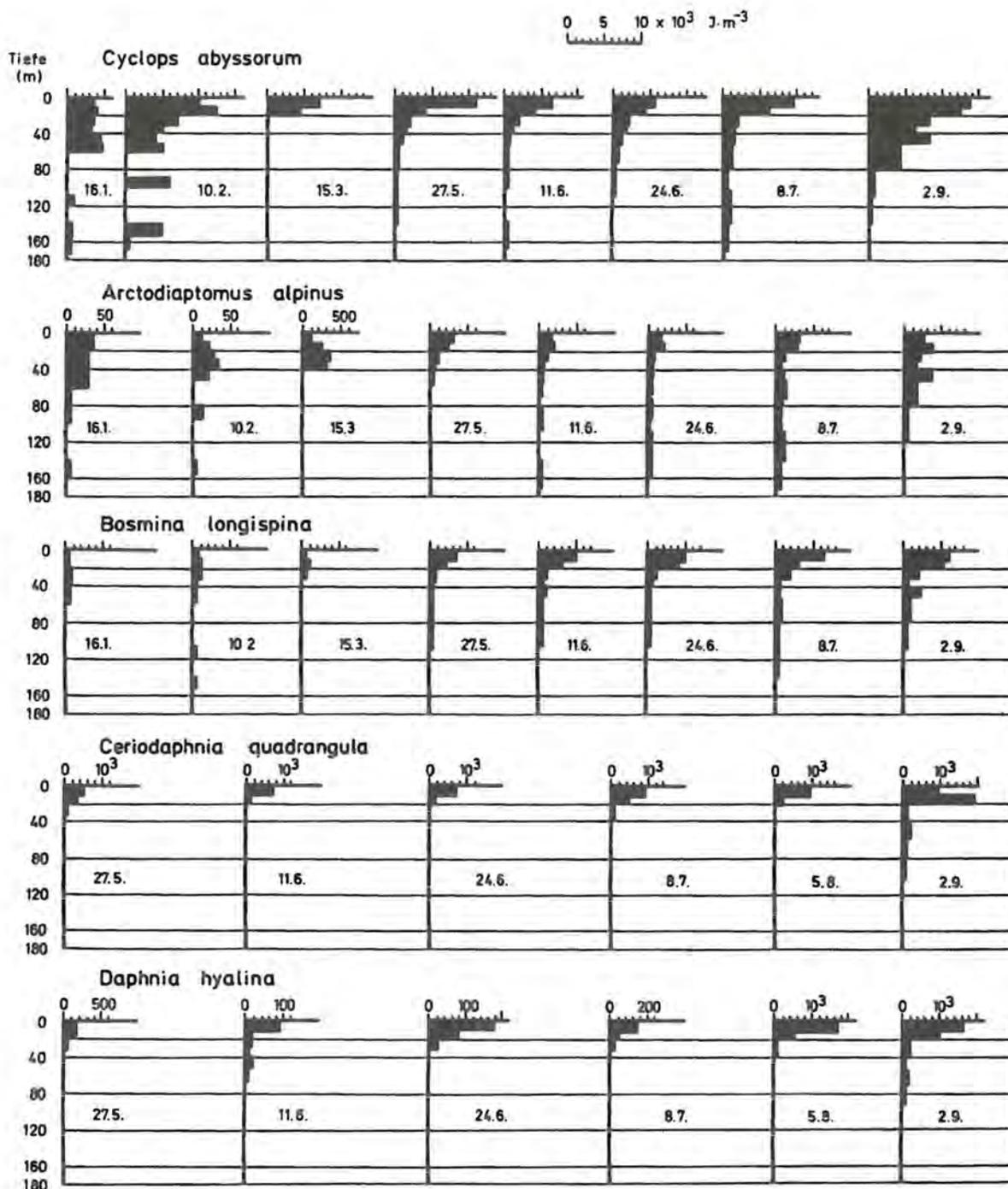


Abb. 87: Vertikalverteilung der pelagischen Crustaceen des Königssees (1980).

wandern durch den raschen Temperaturabfall im Sommer schon nach kurzer Wanderstrecke aufgehalt werden (vgl. Smith und Baylor 1953). Der Effekt einer besseren Nahrungsausnutzung im kühlen Wasser (McLaren 1963) könnte im Königssee somit bereits innerhalb der trophogenen Zone zum Tragen kommen.

6.2.2.3 Populationsdynamik

In den bisher vorgelegten Ergebnissen setzen sich die zu den einzelnen Arten genannten Zahlen jeweils aus verschiedenen Entwicklungsstadien zusammen. Bei den folgenden Betrachtungen wollen wir in der Analyse einen Schritt weiter gehen, indem wir zwischen ausgewachsenen Tieren und Jugendstadien unterscheiden.

Will man den Anfang einer neuen Generation erkennen, so muß man auch die Zahl der Eier/Volumeneinheit berücksichtigen, den Zeitpunkt ihres Erscheinens und ihrer maximalen Dichte. Mit Hilfe der von Caswell (1972), Edmondson (1974) und Paloheimo (1974) entwickelten Beziehungen lassen sich darüber hinaus die Wachstumsraten der Population, die Geburtenrate und aus diesen beiden die Mortalitätsrate abschätzen (Abb. 92).

In den Abbildungen 88 – 91 werden die Ausgangsdaten der Populationsdynamik für die fünf Crustaceenvertreter vorgestellt. Abb. 88 informiert über die Populationsdynamik von *Cyclops abyssorum*. Aus ihr ergibt sich zunächst, daß das Frühjahrsmaximum der Gesamtpopu-

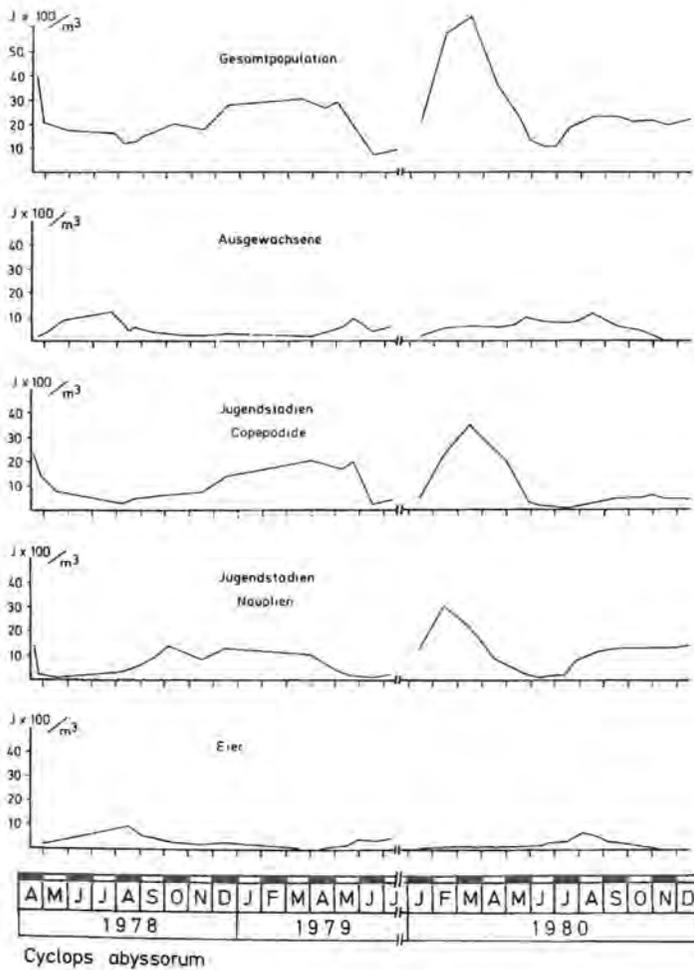


Abb. 88: Populationsdynamik von *Cyclops abyssorum*.

lation durch die Jugendstadien (Nauplien und Copepodide) zustandekommt. Die Erwachsenen erreichen ihr Maximum im Juni-September, also ebenfalls erst in der wärmeren Jahreszeit, in welche auch die Maxima aller übrigen Arten fallen. Gegen Ende des Sommers erreichen die Eizahlen ihre höchste Zahl/Volumeneinheit. Aus ihnen entwickeln sich die Nauplien, die im Winterplankton des Königssees vorherrschen und erst im Februar an Zahl rasch zurückgehen, weil nun die Entwicklung zum Copepodidstadium beschleunigt wird. Aus den Copepodiden entwickeln sich die Erwachsenen zunächst langsam, gegen April zu jedoch schneller, so daß ihre Dichte rasch ab- und die der Erwachsenen zunimmt. Dabei treten anscheinend erhebliche Verluste auf. Dieser Entwicklungsstand zeigt, daß pro Jahr nur eine Generation entsteht. Nach Abb. 92 läßt sich der Populationsanstieg im Sommer aus der wachsenden Geburts- bei gleichzeitig fallender Mortalitätsrate verstehen. Letztere steigt jedoch im Herbst wieder an, um bei fallender Geburtsrate auf hohem Stand zu verweilen. Worauf die hohe Mortalitätsrate im Frühjahr zurückzuführen ist, kann nicht entschieden werden. Vielleicht geben künftige Magenuntersuchungen bei planktonfressenden Fischen darüber Auskunft.

Bei *Arctodiaptomus alpinus* (Abb. 89) gibt es keine so auffällige Verschiebung zwischen dem jeweiligen Maximum der Ausgewachsenen und der Jugendstadien. Die gesamte Entwicklung ist demnach zeitlich

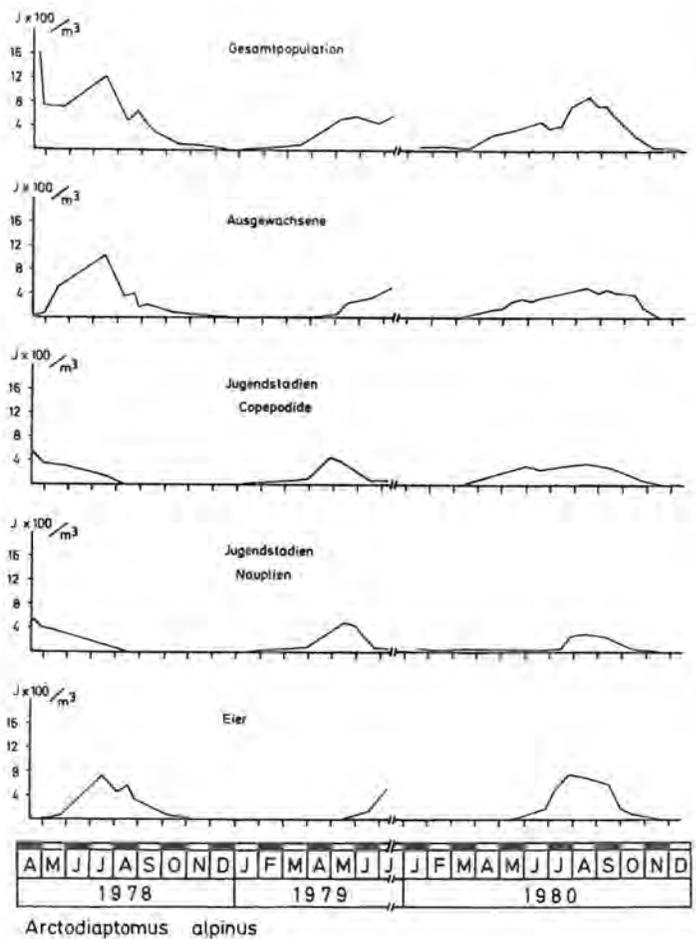


Abb. 89: Populationsdynamik von *Arctodiaptomus alpinus*.

zusammengedrängt. Auf das im Spätsommer zu beobachtende Maximum der Eizahlen folgen die Nauplien relativ rasch. Ihre Zahl nimmt gegen Ende 1980 auffällig schnell ab. Im Jahre 1977 kann das nicht ebenso gewesen sein, wie die hohen Nauplienzahlen im April 1978 zeigen. Das Ergebnis ist somit widersprüchlich und nicht ohne weiteres erklärbar. Wir geben folgender Annahme den Vorzug: Aus den Eiern entstehen noch im Herbst Nauplien, die sich ähnlich wie bei *Cyclops abyssorum* über den Winter halten. Aus ihnen entwickeln sich im folgenden Frühjahr die Copepodide, die neben den Ausgewachsenen das ganze Jahr über im Plankton enthalten sind. Demnach entsteht auch bei *Arctodiaptomus* nur eine Generation pro Jahr. Im Gegensatz zu den bei *Cyclops abyssorum* gefundenen Beziehungen beginnt mit der im Sommer rasch anwachsenden Geburtsrate auch die Mortalitätsrate schnell zuzunehmen (Abb. 92), ohne daß es hierfür derzeit plausible Gründe zu nennen gibt.

Bosmina longispina (Abb. 90) zeigt in der warmen Jahreszeit ein ausgeprägtes Maximum, ist aber dennoch das ganze Jahr über – wenn auch in den Wintermonaten nur durch besonders niedrige Zahlen – im Plankton vertreten. In der warmen Jahreszeit (Juni/Juli) nimmt die Zahl der Eier stark zu, nicht nur, weil es um diese Zeit eine größere Weibchen-Dichte gibt, sondern auch, weil pro Weibchen mehr Eier zur Entwicklung gelangen. Dem Maximum an Eizahlen folgt wenige Wochen dar-

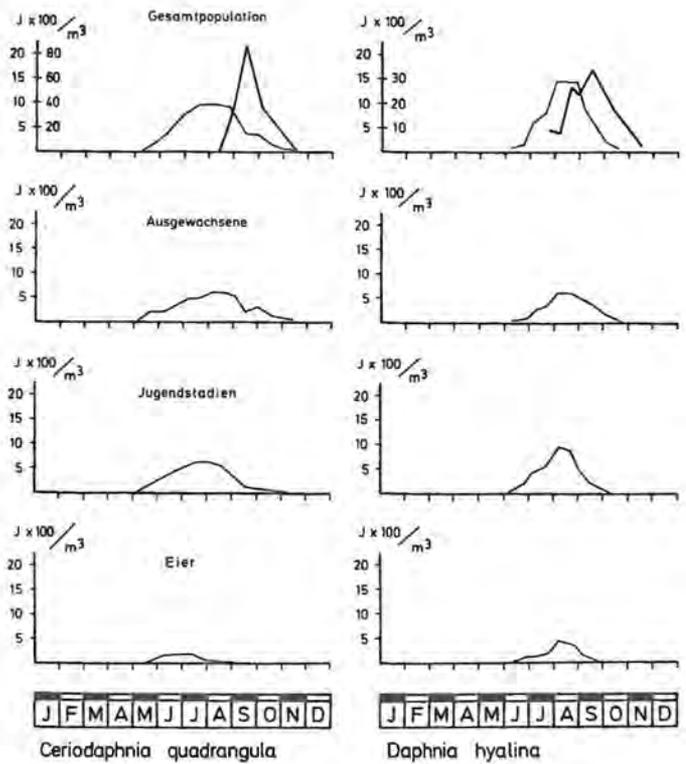
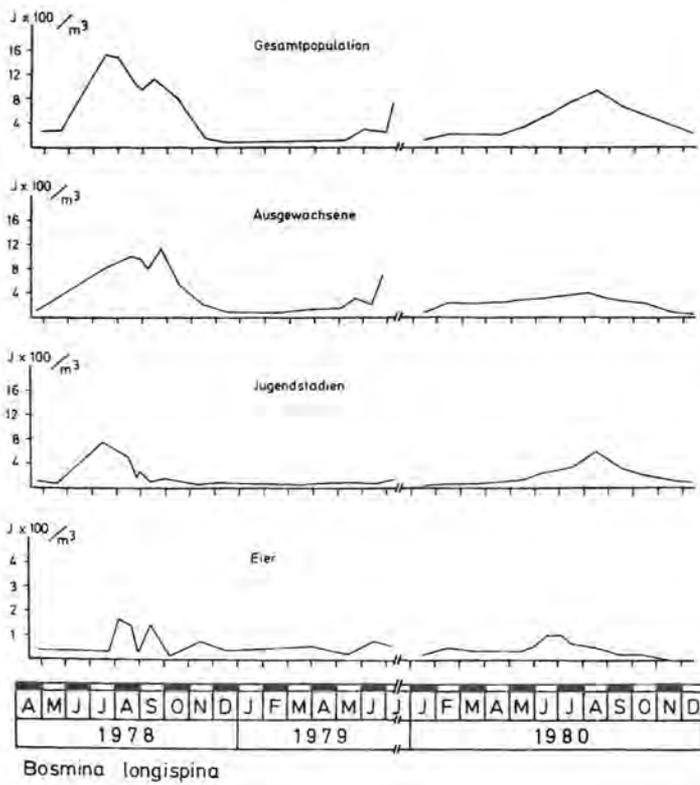


Abb. 90: Populationsdynamik von *Bosmina longispina*.

Abb. 91: Populationsdynamik von *Ceriodaphnia quadrangula* und *Daphnia hyalina* im Jahre 1980 (verstärkte Linie: 1979).

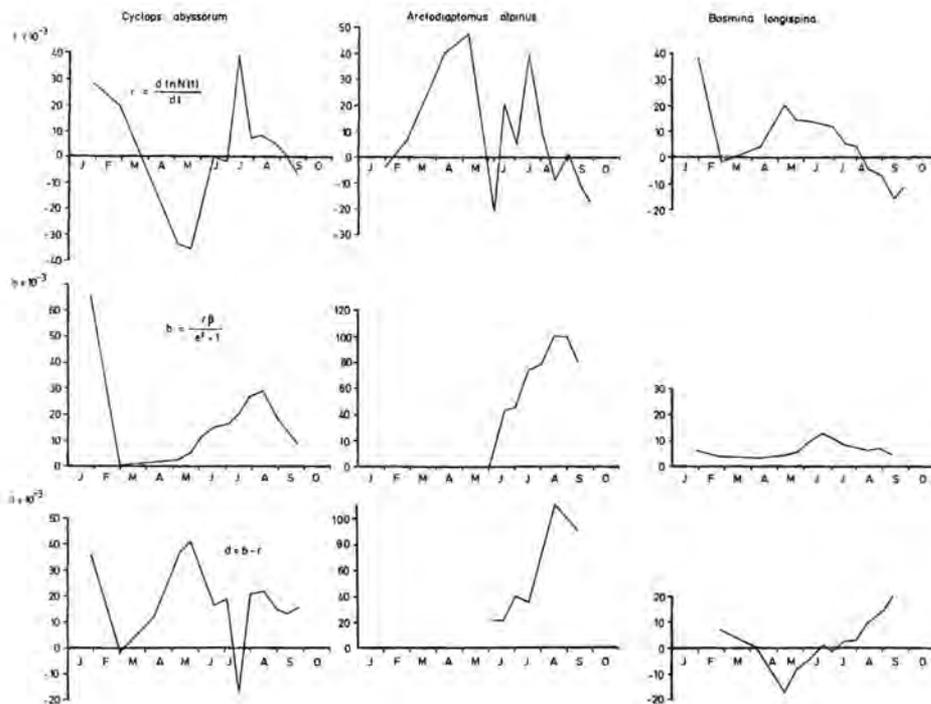


Abb. 92: Demographische Daten (Wachstumsrate r , Geburtsrate b und Mortalitätsrate d) der 3 vorherrschenden Planktoncrustaceen des Königssees.

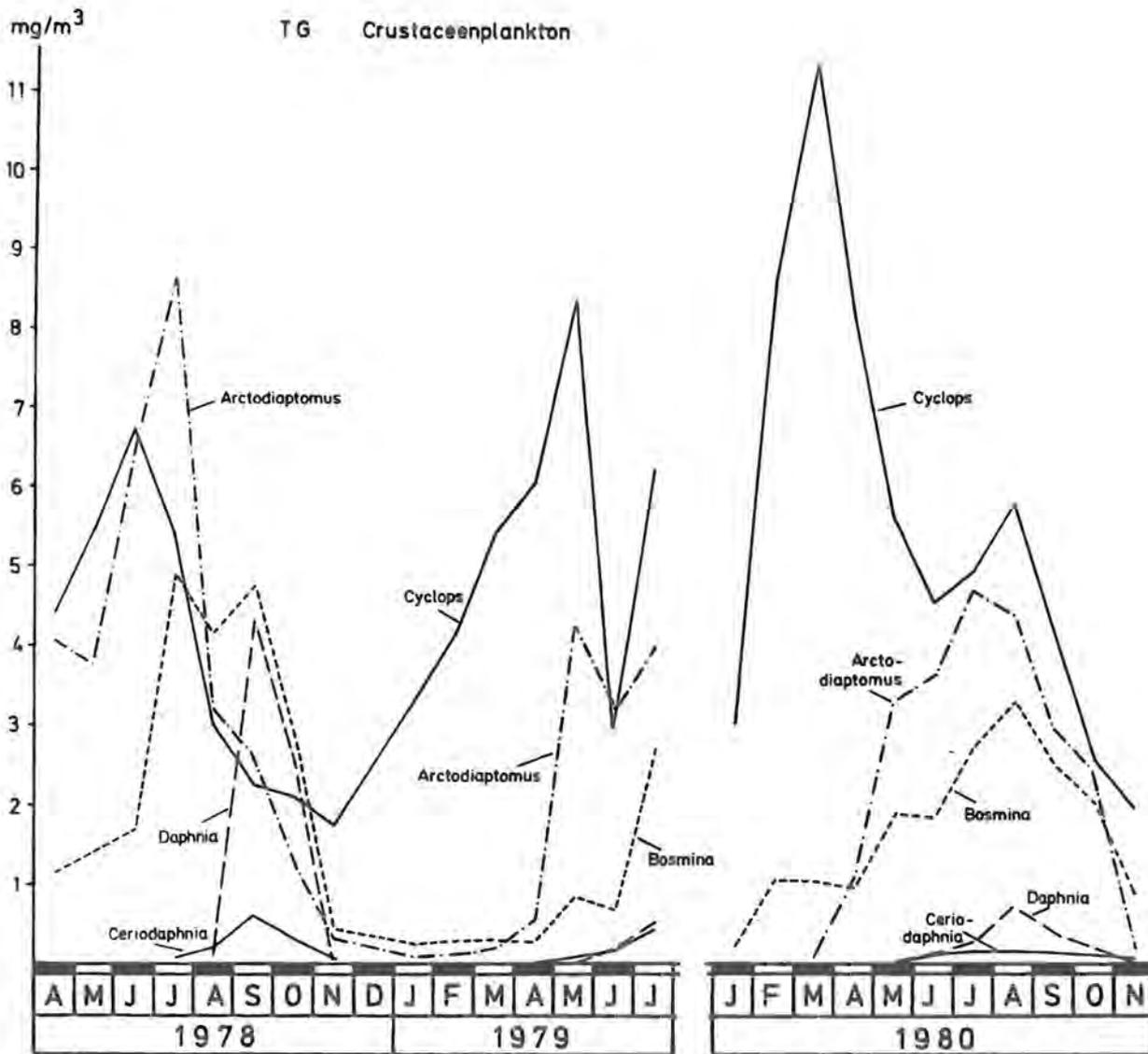


Abb. 93: Jahresverlauf des Crustaceenplanktons in mg/m^3 Trockengewicht (TG), aufgeteilt auf die im Königssee vorkommenden 5 Arten.

Dem Vergleich zwischen Phytoplanktonbiomasse und Crustaceenbiomasse liegt eine Berechnung dieser Größen pro m^2 Seeoberfläche zugrunde, und zwar für die Wasserschicht von 0 bis 40 m. Die Beschränkung auf diese Schicht erscheint im Hinblick auf das Phytoplankton zweckmäßig, weil der Anteil intakter Zellen nach mikroskopischen Untersuchungen in größerer Tiefe nur noch sehr gering ist. Für das Crustaceenplankton wählen wir die gleiche Schicht, erfassen damit aber nur etwa 80% der Gesamtpopulation.

Aus den Veränderungen der beiden Größen Phytoplankton- und Crustaceenbiomasse (Abb. 94) ergibt sich, daß die Maxima der Crustaceenbiomasse in den Zeitabschnitt maximaler Phytoplanktonbiomasse fallen. Zieht man Abb. 93 zum Vergleich hinzu, so kann dieser Befund differenziert werden, denn es folgt nun, daß das Anwachsen der Herbivorenpopulation von *Arctodiaptomus alpinus* und der Cladocerenarten in jedem der drei Untersuchungsjahre mit dem Abfallen der Phytoplanktonbiomasse zusammenfällt. Zu einer befriedigend genauen Analyse der Beziehungen zwischen Her-

bivoren und Phytoplanktonangebot gehören jedoch weitere Analysen. So ist bekannt, daß der Nahrungsanteil herbivorer Zooplankter gerade in oligotrophen Seen nur zu 60% aus dem Phytoplanktonangebot bestritten wird; 40% entfallen auf Bakterien und Detritus (Gliwicz 1969 a, 1969 b). Die vorliegenden Ergebnisse liefern daher nur erste Hinweise für die eigentliche Analyse dieser Nahrungsbeziehungen, die nicht zu den Aufgaben unseres Projekts gehörte.

Interessant ist der Vergleich zwischen Königssee und Attersee anhand der besprochenen Größen (Abb. 94 und 95). Im Attersee erreicht die Crustaceenpopulation eine Biomasse, die zumindest in der Größenordnung der Phytoplanktonbiomasse liegt. In den Sommermonaten kann zeitweilig eine völlige Übereinstimmung zustandekommen (1975) oder sogar ein auffälliges Überwiegen der Crustaceenbiomasse (1976). Letzteres ist auch aus eutrophen Seen bekannt, in welchen hohe Phytoplanktondichten ein starkes Populationswachstum der Herbivoren sichern, in dessen Verlauf der Phytoplanktonbestand schließlich so stark dezimiert wird,

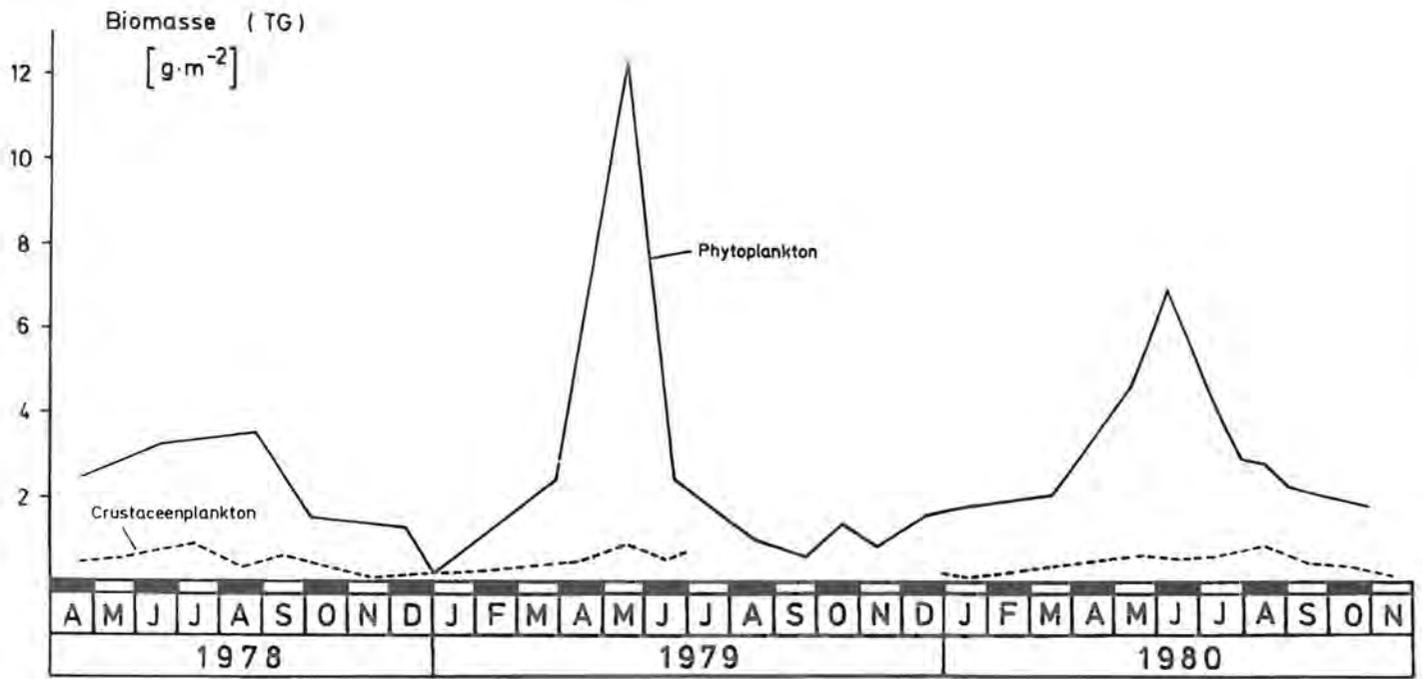


Abb. 94: Phytoplankton- und Crustaceenplankton-Biomasse-Trockengewicht (TG) des Königssees im Jahresverlauf.

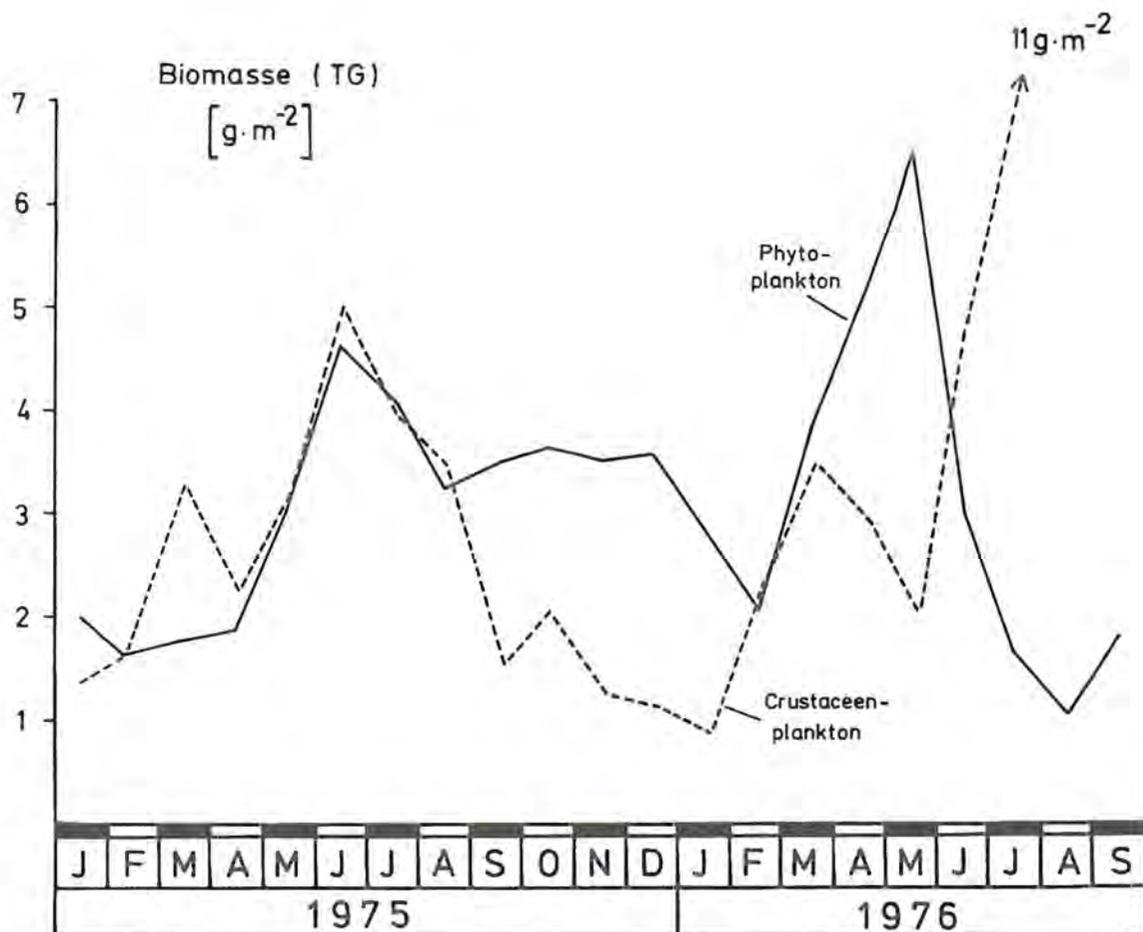


Abb. 95: Phytoplankton- und Crustaceenplankton-Biomasse-Trockengewicht (TG) des Attersees im Jahresverlauf (nach Angaben von Moog 1979, gezeichnet).

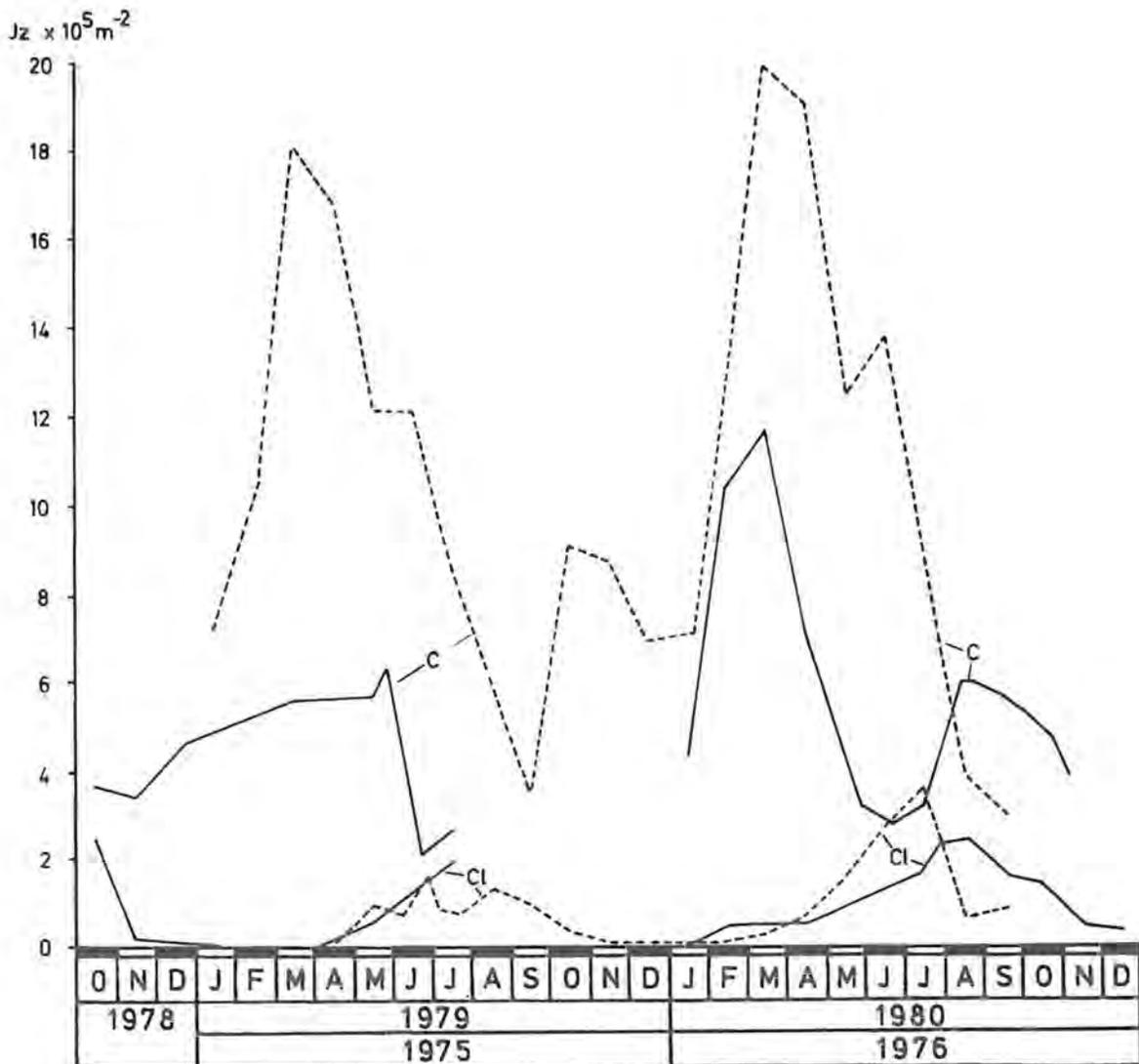


Abb. 96: Individuenzahlen unter 1 m^2 Seeoberfläche im Königssee (ausgezogene Linie) und im Attersee (strichlierte Linie) im Jahresverlauf. C = Copepoden, Cl = Cladoceren (Atterseeangaben nach Moog 1979).

daß es zu einer Umkehrung des Biomasseverhältnisses kommt und das sogenannte „Klarwasserstadium“ des Sees entsteht. Im Königssee sind höchstens Ansätze dieser Entwicklung zu beobachten: die Crustaceenbiomasse erreicht z. Zt. maximaler Tierdichten nur $\frac{1}{10}$ – $\frac{1}{5}$ der vorhandenen Phytoplanktonbiomasse. Das Phytoplankton ist demnach nicht dem gleichen Fraßdruck ausgesetzt wie das Phytoplankton des Attersees, in welchem, im Gegensatz zum Königssee, herbivore Cladoceren und Copepoden stärker vertreten sind. Wie sich aus Abb. 96 ergibt, liegt der Unterschied zwischen beiden Seen vor allem in den Individuenzahlen der Copepoden, die im Attersee eine wesentlich höhere Dichte erreichen. Bei dem Vergleich der Cladocerenzahlen muß bedacht werden, daß sie im Falle des Attersees auch die carnivoren Cladoceren enthalten, die im Königssee durch keine Art vertreten sind.

6.2.3 Rotatorienplankton (Tafel VI)

6.2.3.1 Artenzusammensetzung

Die Rotatorien des Königssees waren nicht Gegenstand eigens durchgeführter Untersuchungen. Um wenig-

stens einen ersten Überblick über die vorkommenden Arten zu erhalten, hat Herr Dr. K. Preißler gelegentlich aus den für die Crustaceenuntersuchungen anfallenden Wasserproben die Rotatorien herausgefangen und sie Herrn Dr. h. c. W. Koste zugeschickt, der sie freundlicherweise bestimmt hat. Schon jetzt ist sicher, daß die Rotatorien (Tabelle 33) die formenreichste Gruppe der pelagischen Zooplankter im Königssee sind. Leider läßt das bisherige Fang- und Ausleseverfahren keine Aussage über ihre quantitative Zusammensetzung zu. Es muß daher bei einer sehr groben Häufigkeitsschätzung bleiben. Nach dieser dominieren zumindest zeitweise *Filinia terminalis*, *Keratella cochlearis*, *Keratella hiemalis*, *Kellicottia longispina*, *Polyarthra vulgaris*, *Polyarthra dolichoptera dolichoptera*, *Collotheca mutabilis* und *Collotheca pelagica*. Von diesen bevorzugen nach Ruttner-Kolisko (1972) und Koste (1978) *Filinia terminalis*, *Keratella hiemalis*, *Kellicottia longispina* und *Polyarthra dolichoptera dolichoptera* niedrige Temperaturen, sofern sie nicht sogar ausgesprochen kaltstenotherm sind, wie *Polyarthra dolichoptera*, *Keratella hiemalis* und *Kellicottia longispina*. Niedrige Temperaturen bevorzugen aber auch mehrere der zumindest zeitweise weniger häufigen Vertreter, wie z. B. *Synchaeta cf. tremula* und *Gastropus stylifer*. Die übrigen in Tabelle 33

(nach verschiedenen Vorlagen von Dr. K. Preißler gezeichnet).

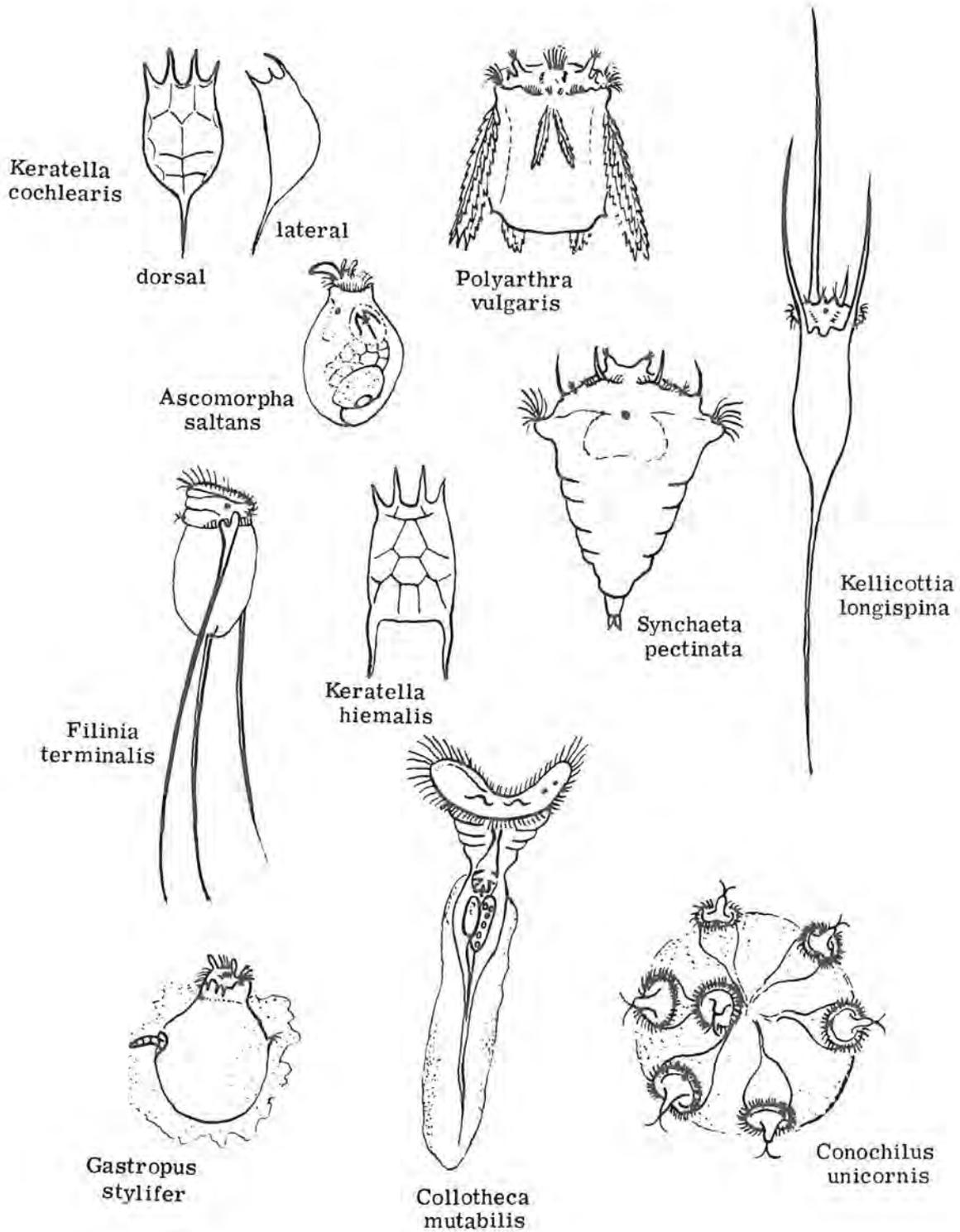


Tabelle 33

**Artenliste der pelagischen Rotatorien (Rädertiere) des Königssees:
Klasse Monogononta ¹⁾**

<p>GASTROPODIDAE (Familie): <i>Ascomorpha ecaudis</i> (Perty 1850) <i>Ascomorpha saltans</i> Bartsch 1870 <i>Gastropus styliifer</i> Imhof 1891</p> <p>COLLOTHECIDALE (Familie): <i>Collothea mutabilis</i> (Hudson 1885) <i>Collothea pelagica</i> (Rousselet 1892) <i>Conochilus unicornis</i> (Rousselet 1892)</p> <p>FILINIDAE (Familie): <i>Filinia terminalis</i> (Plate 1886)</p>	<p>BRACHIONIDAE (Familie): <i>Keratella cochlearis cochlearis</i> (Gosse 1851) <i>Keratella cochlearis robusta</i> (Lauterborn 1900) <i>Keratella cochlearis f. angulifera</i> (Lauterborn 1900) <i>Keratella quadrata</i> (O. F. Müller 1786) <i>Keratella quadrata frenzeli</i> (Eckstein 1895) <i>Keratella hiemalis</i> (Carlin 1943) <i>Kellicottia longispina</i> (Kellicott 1879)</p> <p>SYNCHAETIDAE (Familie): <i>Polyarthra vulgaris</i> (Carlin 1943) incl. forma aptera (vgl. Koste 1978, S. 432) <i>Polyarthra dolichoptera dolichoptera</i> (Idelson 1925) <i>Synchaeta cf. tremula</i> (O. F. Müller 1786) <i>Synchaeta pectinata</i> (Ehrenberg 1832)</p>
<p>¹⁾ leg. K. Preißler 1978–1979, det. W. Koste</p>	

genannten Rotatorien sind aufgrund ihrer Verbreitung in anderen Gewässern als eurytherm zu bezeichnen. Auch hinsichtlich der Bedeutung des Trophiegrades sind einige Aussagen möglich: So bevorzugt die kaltstenotherme *Keratella hiemalis* ebenso wie *Conochilus unicornis* und *Ascomorpha saltans* oligotrophe Seen, während die übrigen Vertreter hinsichtlich dieser Eigenschaft anscheinend weniger wählerisch sind und daher auch in nährstoffreichen Gewässern vorkommen. *Synchaeta cf. tremula* und *Ascomorpha saltans* bevorzugen nach Koste (1978) in anderen Gewässern übrigens die Litoralregion. Zu ihrer Verbreitung im Königssee sind derzeit keine Aussagen möglich.

Bedenkt man den Formenreichtum der Rotatorien und ihre Variabilität, die bekanntlich unter dem Einfluß verschiedener Umweltfaktoren zustande kommt (Ruttner-Kolisko 1972), so sollten zumindest die beiden grundsätzlich wichtigen Umwelteigenschaften des Königssees (niedrige Temperaturen und Nährstoffarmut) gerade auch wegen ihrer Konstanz zur Herausbildung stabiler ökologischer Formen geführt haben. Es besteht daher kein Zweifel, daß die Rotatorien des Königssees aus dieser Perspektive ein besonders interessantes Untersuchungsobjekt sind. Sicher ist aber auch, daß die Rotatorien im Nahrungsgewebe des Königssees eine nicht zu vernachlässigende Funktion ausüben, z. B. als Herbivoren. Zweifellos gilt das nicht für jede der bisher gefundenen Arten. Künftige Untersuchungen müssen daher zunächst klären, welche Rotatorien aufgrund ihrer Verbreitung in Raum und Zeit in diesem Zusammenhang wichtig sind. Das betrifft aber nicht nur die pelagischen Vertreter, sondern auch die im Litoral lebenden, über die bisher überhaupt noch keine Informationen vorliegen.

6.2.4 Fische

6.2.4.1 Artenzusammensetzung

Die Fische des Königssees sind seit 1980 Schwerpunkt wissenschaftlicher Untersuchungen von verschiedenen Institutionen, wobei im wesentlichen fünf Problemkreise im Vordergrund des Interesses stehen: 1) Abschätzung des Artenbestandes und Erarbeitung der Grundlagen für ihre Populationsdynamik (Bearbeitung durch die Bayerische Landesanstalt für Fischerei in Starnberg, Reg. Dir. Dr. v. Lukowicz, Dipl. Biol. Klein). 2) Populationsgenetische Untersuchungen zur Klärung der verwandtschaftlichen Beziehungen zwischen dem sog. Schwarzreuter und Wildfangsaibling (Bearbeitung durch das Institut für Tierzucht der TU, Weihenstephan, Prof. Dr. Pirchner, Dr. Förster). 3) Fischbiologische Untersuchungen zum Gesundheitszustand der Fische, z. B. nach Parasitenbefall, aufgrund morphologischer, histologischer und hämatologischer Kriterien (Bearbeitung durch das Institut für Zoologie und Hydrobiologie der LMU München, Prof. Dr. Hoffmann). 4) Parasitologische Untersuchungen unter besonderer Berücksichtigung des Triaenophorus-Befalls der Saiblinge (Bearbeitung durch die Bayerische Landesanstalt für Wasserforschung, Versuchsanlage Wielenbach, Reg.-Dir. Dr. Bohl und ORR Dr. Negele). 5) Datenerfassung zur Ernährungsbio-logie durch Mageninhaltsuntersuchungen (Bearbeitung durch die Zoologische Staatssammlung, Direktor Doz. Dr. J. Fittkau und Dipl.-Biol. R. Gerstmaier).

Wir beschränken uns hier auf eine kurze Übersicht über die im Königssee vorkommenden Arten, die durch einige Bemerkungen zu ihrer Funktion im Nahrungsgewebe des Königssees ergänzt seien (Tabelle 34). Dominierende Vertreter der Fischfauna des Königssees sind die Salmoniden. Aufgrund ihrer sonstigen Verbrei-

tung und ihrer z. T. gut bekannten physiologischen Ansprüche (vgl. z. B. Fry 1957) gelten sie schon seit langer Zeit als zuverlässige Indikatororganismen für nährstoffarme, sauerstoffreiche und kalte Gewässer. Es ist daher nicht verwunderlich, daß ihr Bestand auch in Bayern durch die Folgen der Eutrophierung in den letzten Jahren überall stark zurückgegangen und der Königssee somit gleichsam als eines der letzten Rückzugsgebiete aufzufassen ist. Es muß jedoch hervorgehoben werden, daß im Falle der Saiblinge und insbesondere der Renken regelmäßiger Besatz erfolgt.

Unter den Salmoniden des Königssees dominiert der Seesaibling, der im allgemeinen als Schwarzreuter, Tiefseesaibling und Wildfangsaibling gefangen wird. Als Jungfische leben sie vor allem vom Crustaceenplankton, später auch von anderen Wirbellosen, die sie im Benthos finden oder als Fluginsekten an der Wasseroberfläche. Der Wildfangsaibling jagt mit fortschreitender Größe aber auch andere Fische, wie z. B. Elritzen und Koppen.

Wie der Seesaibling verlangt auch der im Jahre 1884 aus Nordamerika nach Europa eingeführte Bachsaibling sauerstoffreiches und kaltes Wasser, wobei er anscheinend auch besonders niedrige Wassertemperaturen noch gut verträgt.

Bach- und Seeforelle spielen aufgrund ihres geringen Bestandes eine sehr untergeordnete Rolle, so daß sie hier nur namentlich erwähnt seien. Das gilt auch für die kleine Maräne, während die seit 1940 jährlich in großen Mengen eingesetzten Renken als Planktonfresser mit Sicherheit sehr bedeutend sind.

Die gelegentlich zum Fang gehörenden Brachsen, Aitel und Aale können aufgrund ihrer geringen Zahl vernachlässigt werden. Sie finden im Königssee keineswegs optimale Lebensbedingungen, vor allem zu wenig Nahrung. Ansonsten sind sie wesentlich anspruchsloser in der Wahl ihres Lebensraumes, vor allem hinsichtlich ihres Sauerstoffbedarfs. Das ist einer der Gründe, weshalb sie sich in eutrophierenden Gewässern gegenüber den Salmoniden über kurz oder lang durchzusetzen vermögen. So hat sich gerade auch der Brachsen in vielen Seen, wie z. B. im Chiemsee, Ammersee und Simssee, immer stärker verbreitet, wo früher die Salmoniden die dominierende Rolle gespielt haben (Terofal 1977).

Zu den wichtigen Gliedern im Nahrungsgewebe des Königssees gehören neben den genannten Fischen auch Elritze, Flußbarsch, Koppe, Rutte und Hecht. Unter diesen sind die Koppen auf sauberes und sauerstoffreiches Wasser angewiesen. Zusammen mit den Quappen haben sie sich als Grundfische vor allem auf das Nahrungsangebot des Benthals spezialisiert. Elritze und Flußbarsch hingegen fangen ihre Beute nicht nur im Benthos, sondern auch im Pelagial.

Die größten Raubfische des Königssees sind der bereits erwähnte Wildfangsaibling sowie die Seeforelle und der Hecht. Die Seeforelle spielt wahrscheinlich eine unbedeutende Rolle, weil sie, nach den Fangergebnissen zu urteilen, in den letzten Jahren immer seltener gewor-

Tabelle 34	Artenliste der Fische des Königssees ³⁾
SALMONIDAE (Familie): Salvelinus alpinus salvelinus (Linné 1758) Seesaibling Coregonus macrophthalmus (?) Renke Coregonus albula*) kleine Maräne, Zwergmaräne Salmo trutta forma fario*) (Linné 1758) Bachforelle Salmo trutta forma lacustris*) (Linné 1758) Seeforelle Salvelinus fontinalis (Mitchell 1815) Bachsaibling	
ESOCIDAE (Familie): Esox lucius (Linné 1758) Hecht	
GADIDAE (Familie): Lota lota (Linné 1758) Rutte, Trüsche, Quappe	
COTTIDAE (Familie): Cottus gobio (Linné 1758) Koppe, Groppe, Mühlkoppe	
PERCIDAE (Familie): Perca fluviatilis (Linné 1758) Flußbarsch	
CYPRINIDAE (Familie): Abramis brama*) (Linné 1758) Brachsen, Blei Phoxinus phoxinus (Linné 1758) Elritze Squalius cephalus*) (Linné 1758) Aitel, Döbel	
ANGUILLIDAE (Familie): Anguilla anguilla*) (Linné 1758) Aal	
¹⁾ nach Angaben von H. Klein, Bayer. Landesanstalt für Fischerei ²⁾ nur vereinzelt nachgewiesen	

den ist. So bleibt als größter Räuber der Hecht, der auch verhältnismäßig häufig ist. Sein Einfluß auf das Nahrungsgewebe im Königssee wird nur noch vom Menschen übertroffen, der nicht nur durch den Fang von Fischen, sondern auch durch Besatzmaßnahmen in das Nahrungsgewebe eingreift.

Wenn von den Fischen des Königssees die Rede ist, so darf der auffällig hohe Parasitenbefall der Seesaiblinge durch einen Fischbandwurm (*Triaenophorus nodulosus*) nicht unerwähnt bleiben. Das 2. Zwischenstadium, das sogenannte Plerocercoid dieses Parasiten, findet sich vor allem in der Leber, nach Hoffmann (persönl. Mitteilung) aber auch in der Muskulatur. Wenn ein infizierter Fisch vom Endwirt, einem Hecht oder einer See-

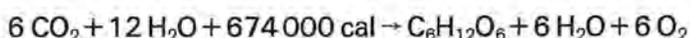
forelle, gefressen wird, so entwickeln sich die Plerocercoiden im Darm dieses Räubers zum geschlechtsreifen Bandwurm. Aus dessen Eiern, die mit den Faeces in das Wasser gelangen, entstehen freischwimmende Larven, die sogenannten Miracidien, die einen Copepoden als 1. Zwischenwirt aufsuchen. Hier bildet sich das Miracidium zum 1. Zwischenstadium, dem Procercoid, um, das zur weiteren Entwicklung in einen Fisch gelangen muß. Da es unter den Königsseefischen viele planktonfressende Fische gibt, ist das kein Problem. Und in Gegenwart der sehr gefräßigen Hechte ist es für den Parasiten auch kein Problem, schließlich seinen Endwirt zu erreichen.

7. Der Aufbau organischer Substanz

7.1 Die photoautotrophe Primärproduktion im Lebensraum Pelagial

7.1.1 Vorbemerkungen

Die Grundvoraussetzung für alles Leben ist bekanntlich die Sonne in ihrer Funktion als Energiequelle. Aber nur ein sehr kleiner Anteil (<1%) der als Strahlung zur Verfügung stehenden Energie wird bei der Bildung der organischen Substanzen in chemische Energie umgewandelt (Photosynthese). Dieser Vorgang kann in einfachster Weise durch folgende Photosynthesegleichung beschrieben werden:



Unter Berücksichtigung der in relativ großer Menge benötigten Nährstoffe (vgl. S. 48) und der Tatsache, daß das Protoplasma den Hauptanteil der organischen Substanzen auf sich vereint, läßt sich diese Gleichung auch folgendermaßen formulieren:

$106 \text{ CO}_2 + 90 \text{ H}_2\text{O} + 16 \text{ NO}_3 + 1 \text{ PO}_4 + \text{ Mineralien} + 1\,300\,000 \text{ kcal} \rightarrow 3258 \text{ g Protoplasma}$ (bestehend aus 106 C, 180 H, 46 O, 16 N, 1 P und 816 g Mineralasche) + $154 \text{ O}_2 + 1\,287\,000 \text{ kcal}$ (freigesetzte Wärmeenergie). In 3258 g Protoplasma sind somit 13000 kcal als chemische Energie gebunden (Odum 1980).

Wie sich aus dieser Gleichung ergibt, können zur Messung der Primärproduktion im Prinzip verschiedene Größen herangezogen werden, z. B. die Freisetzung von Sauerstoff, der Verbrauch von anorganischem Kohlenstoff, Phosphor oder Stickstoff. Bewährt haben sich bisher aber nur die Messung der Sauerstoff-Abgabe und der Kohlenstoff-Aufnahme.

Aus der Photosynthesegleichung ergibt sich weiterhin, daß die von den photoautotrophen Organismen gebildete organische Substanz ein Energiedepot darstellt. Es sichert nicht nur den individuellen Zellstoffwechsel der Primärproduzenten, sondern auch den Zellstoffwechsel aller heterotrophen Organismen des betreffenden Nahrungsgewebes und damit letztlich auch dessen Organisation und Funktion.

Obgleich die gespeicherte Energie schließlich in Wärme umgewandelt wird, kann der Weg bis zu dieser nicht mehr nutzbaren Energieform über eine unterschiedliche Zahl von Stufen erfolgen. In einem Ökosystem, das neben den Pflanzen (Produzenten) keine Pflanzenfresser (Konsumenten I : Herbivoren) und infolgedessen auch keine Fleischfresser (Konsumenten II : Carnivoren) enthält, erfolgt der Energiefluß über einen kurzgeschlossenen Stoffkreislauf: Die pflanzliche Nettoproduktion (= Bruttoproduktion abzüglich des durch den Zellstoffwechsel veratmeten Anteils) fällt ausschließlich dem bakteriellen Abbau anheim. Die von

den photoautotrophen Organismen gespeicherte Sonnenenergie wird so auf relativ kurzem Wege (wenn auch zum Teil zunächst noch über die Bakterienbiomasse) in Wärme transformiert.

Existiert jedoch ein komplexes Nahrungsgewebe aus Produzenten, Konsumenten und Destruenten, so wird ein Teil der zunächst von den Pflanzen gebundenen Energie auf die Herbivoren und von diesen auf die Carnivoren übertragen. Indem sie die Existenz der Organismen verschiedener Trophie-Ebenen sichert, hält sie einen im Vergleich zu dem vorangegangenen Beispiel hohen Organisationsgrad der Organismengesellschaft aufrecht. Je größer der Anteil an chemischer Energie ist, der von Trophiestufe zu Trophiestufe übertragen wird, desto größer ist die ökologische Effizienz (= Lindemanns Effizienz) zwischen diesen Stufen. Es gehört zu den interessantesten Aufgaben der Ökologie, diese Effizienzen in verschiedenen Ökosystemen vergleichend zu analysieren.

Grundlage dieser Betrachtungen ist die Bildung organischer Substanz durch die sogenannten autotrophen Organismen. Die Untersuchungen im Königssee wurden auf diese Aufgabe beschränkt: auf die Primärproduktion des Phytoplanktons im Pelagial.

Unter Primärproduktion versteht man die von einer bekannten Ausgangsmenge pflanzlicher Biomasse innerhalb eines gewissen Zeitraumes gebildete Biomasse. Produktion und Ernte (= verfügbare Biomasse) werden im Sprachgebrauch häufig wie identische Begriffe verwendet. Der Landwirt, der im Frühjahr Kartoffeln ausbringt und im Herbst erntet, kann im allgemeinen so verfahren. Sollten ihm jedoch Schädlinge den größten Teil der Kartoffeln weggefressen haben, so wäre es zur Abschätzung des ihm entstandenen Schadens zweckmäßig, zwischen Produktion und Ernte begrifflich zu trennen, d. h. einzusehen, daß die am Ende der Vegetationszeit verfügbare Biomasse nicht der tatsächlichen Produktion entspricht.

Im Gegensatz zu terrestrischen Ökosystemen erfolgt die Primärproduktion in den Gewässern überwiegend durch einzellige Algen, deren Lebensdauer sich im Zeitraum von Stunden bis zu wenigen Tagen bewegt. Innerhalb der an Land für Produktionsmessungen möglichen Zeitabschnitte (z. B. Frühjahr bis Herbst) können im Pelagial eines Sees von einigen hundert bis zu vielen tausend Generationen aufeinander gefolgt sein. Im gleichen Zeitraum können aber auch einige Arten verschwunden und andere hinzugekommen sein. Schließlich gilt für aquatische Biotope, insbesondere aber für den Lebensraum des Pelagials, daß die Verluste durch Tierfraß in der Regel um ein Vielfaches höher sind als an Land. So ist es verständlich, daß zwischen einem etwaigen Biomassezuwachs innerhalb einer Vegetationsperiode (z. B. Frühjahr–Herbst) und der in diesem Zeitraum erfolgten Produktion keine unmittelbare Beziehung besteht. Produktionsmessungen im Pelagial müssen daher innerhalb möglichst kurzer Zeitspannen erfolgen, z. B. in Stunden. Auf der Grundlage dieser Meßwerte ist dann eine Umrechnung auf Tages-, Monats- oder Jahresproduktion möglich.

Im Gegensatz zu den Gegebenheiten an Land gibt es in aquatischen Biotopen eine vertikale Verteilung der Primärproduktion. Sie hängt im Prinzip von folgenden Faktoren ab: 1. von der Größe des Energieangebots, 2. von der Charakteristik des Strahlungsabfalls mit wachsender Tiefe und 3. von der Größe der Maximalproduktion im Optimum des Strahlungsangebots.

Wenn wir eine über alle Tiefen identische Artenzusammensetzung annehmen, so wird sich die Zunahme des

Nährstoffangebotes bei vorgegebener Sonneneinstrahlung folgendermaßen auswirken: In der Tiefe des Strahlungsoptimums wird die Produktion und damit die Individuendichte besonders stark zunehmen und das Strahlungsangebot in den darunter liegenden Wasserschichten vermindern. Dort wird die weitere Produktion somit abnehmen. Da die Produktion mit zunehmendem Nährstoffangebot aber nicht nur innerhalb des Strahlungsoptimums, sondern auch in den darüber liegenden Schichten zunimmt (und infolgedessen auch die Phyto-

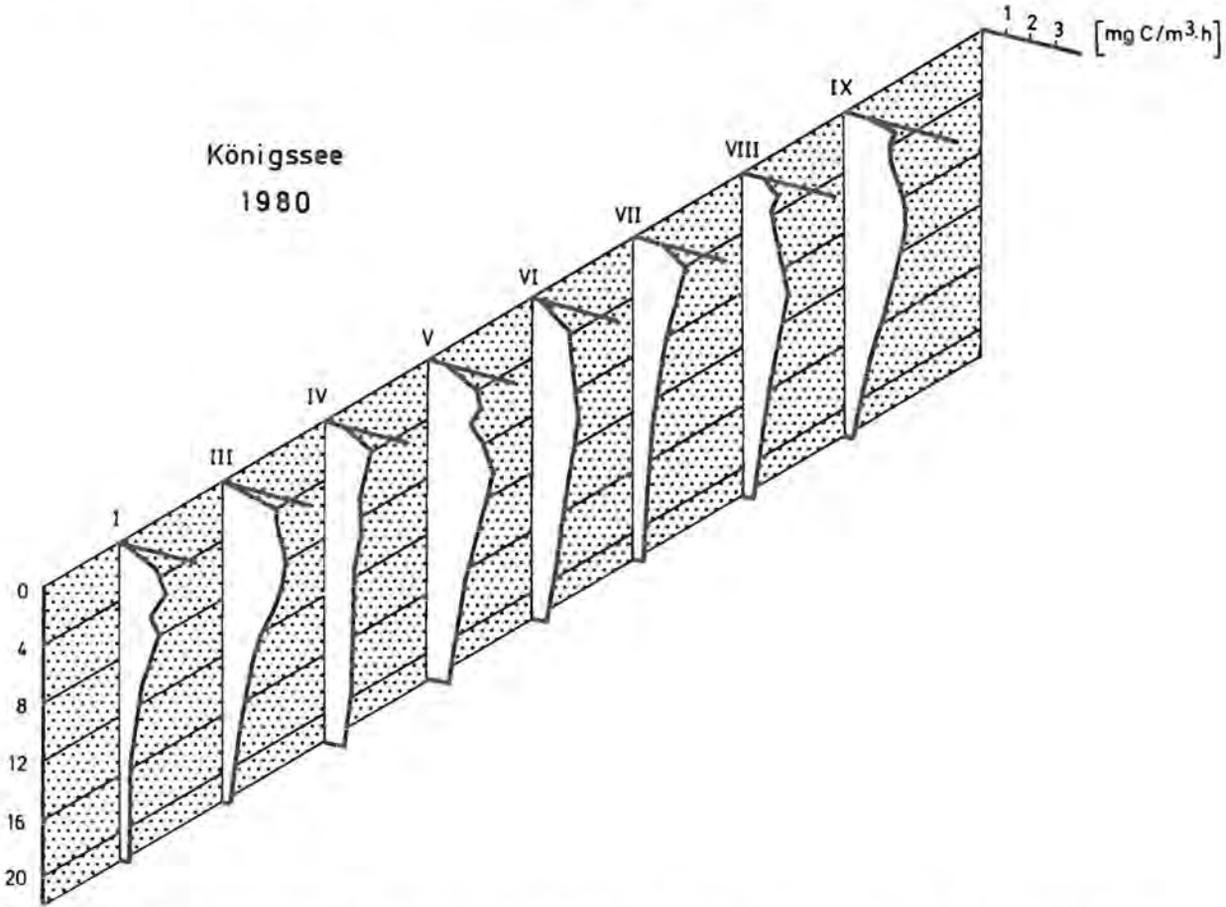


Abb. 97: Vertikalverteilung der Primärproduktion ($\text{mg C/m}^3 \cdot \text{Stunde}$) an ausgewählten Tagen im Jahre 1980.

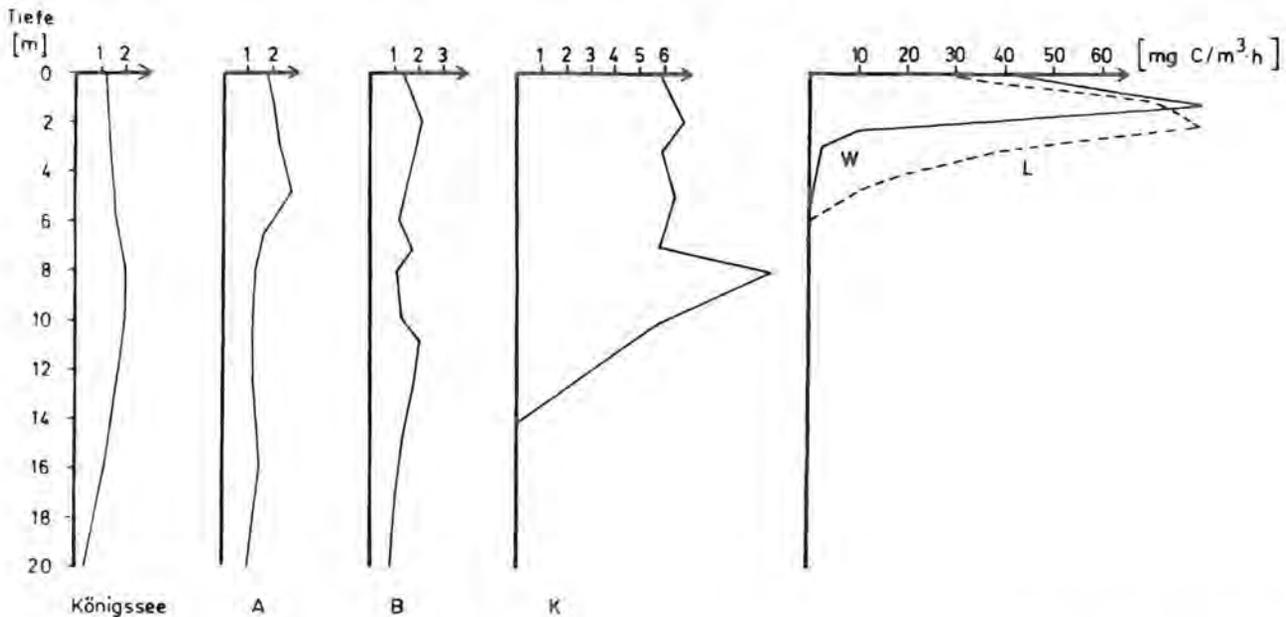


Abb. 98: Vertikalverteilung der sommerlichen Primärproduktion ($\text{mg C/m}^3 \cdot \text{Stunde}$). A Attersee, B Brunnsee (Seon), K Klostersee (Seon), W Waginger See, L Lerchenauer See (Baggersee München) im Vergleich zum Königssee.

planktondichte!), wird die Lage des Strahlungsoptimums bzw. des Produktionsmaximums immer weiter zur Wasseroberfläche wandern. Selbstverständlich rückt durch diese Entwicklung auch das Ende der Produktionszone nach oben: die trophogene Zone reicht somit immer weniger weit in die Tiefe.

Es ist leicht einzusehen, daß die auf 1 m^2 Seeoberfläche bezogene Produktion durch die geschilderte Entwicklung in einem nährstoffreichen See niedriger sein kann als in einem nährstoffarmen See. Denn im nährstoffarmen See bleibt eine tiefreichende Produktionszone erhalten. Es fehlt aber auch das ausgeprägte Produktionsmaximum in der Schicht des optimalen Strahlungsangebots, weil es infolge des knappen Nährstoffangebots nicht zum Tragen kommt. So ergibt sich folgendes: Im nährstoffarmen See zeigt die vertikale Produktionsverteilung einen verhältnismäßig einförmigen Verlauf (orthograde Produktionskurve). Die vertikale Produktionsverteilung des eutrophen Sees ist hingegen durch einen mehr oder minder ungleichförmigen Verlauf (klinograde Produktionskurve) gekennzeichnet.

7.1.2 Vertikale Produktionsverteilung

Im Königssee zeigen die Produktionswerte – ausgedrückt in $\text{mg Kohlenstoff/m}^3 \times \text{Stunde}$ – in vertikaler Richtung das ganze Jahr über keine auffälligen Unterschiede (Abb. 97). Ähnlich gleichförmig sind die vertikalen Produktionsverteilungen in anderen oligotrophen Seen (Abb. 98 und 99), z. B. im Attersee und im Brunsee bei Seon. Im eutrophen Seeoner Klostersee fallen zunächst die wesentlich höheren Produktionswerte und ein tief liegendes Maximum auf, das in diesem See vor allem durch photoautotrophe Bakterien (u. a. Thiorhodaceen) zustande kommt. Im hocheutrophen Waginger und Lerchenauer See liegen die Produktionswerte um das 40–80fache über jenen, die im Königssee festgestellt worden sind. In diesen beiden Seen ist die

Phytoplanktendichte bereits so hoch, daß die gesamte Produktion auf die obere 6-m-Schicht beschränkt wird.

In Abb. 100 sind vertikale Produktionsverteilungen aus allen Jahreszeiten nach erfolgter Standardisierung dargestellt. Zu diesem Zweck sind die in verschiedener Tiefe gemessenen Produktionswerte jeweils auf den maximalen Produktionswert (= 1) der betreffenden Serie bezogen worden. Diese Darstellung zeigt, daß die Hauptproduktion zwischen 0–20 m Wassertiefe erfolgt und daß das Produktionsmaximum meist in Tiefen um 4–5 m anzutreffen ist.

Je größer der Anteil des Produktionsmaximums an der Gesamtproduktion unter 1 m^2 Seeoberfläche, desto ausgeprägter ist der klinograde Verlauf der Produktionsverteilung. Rodhe (1958) hat zur Kennzeichnung dieses Verhältnisses den V_{max}/O -Quotienten verwendet (V_{max} = Produktionsmaximum: $\text{mg C/m}^3 \cdot \text{Stunde}$, O = Gesamtproduktion unter 1 m^2 Seeoberfläche: $\text{mg C/m}^2 \cdot \text{Stunde}$). Bei den von ihm untersuchten Seen lagen die V_{max}/O -Werte der oligotrophen Seen zwischen 0,08–0,17, d. h. 8–17% der Gesamtproduktion entfielen auf den Kubikmeter, in welchem die maximale Primärproduktion gemessen worden ist. Für eutrophe Seen liefert Rodhe Beispiele mit V_{max}/O -Werten zwischen 30–33%. Der V_{max}/O -Quotient des Königssees beträgt $0,085 \pm 0,015$, d. h. daß nur etwa 6–10% der Gesamtproduktion unter 1 m^2 auf den Höchstproduktions-Kubikmeter entfallen. Das ist ein für oligotrophe Seen charakteristischer Wert.

Stellt man die Isoplethen der relativen Primärproduktionsrate (A_z/A_{max}) in Abhängigkeit zur Strahlungsintensität dar (Abb. 101), so läßt sich der Intensitätsbereich ablesen, innerhalb dessen sich der maximale Produktionswert und z. B. die Grenzen der Produktion im Jahresverlauf bewegen. Diese Beziehung kann für die Prognose der Produktionsgröße eine wichtige Rolle

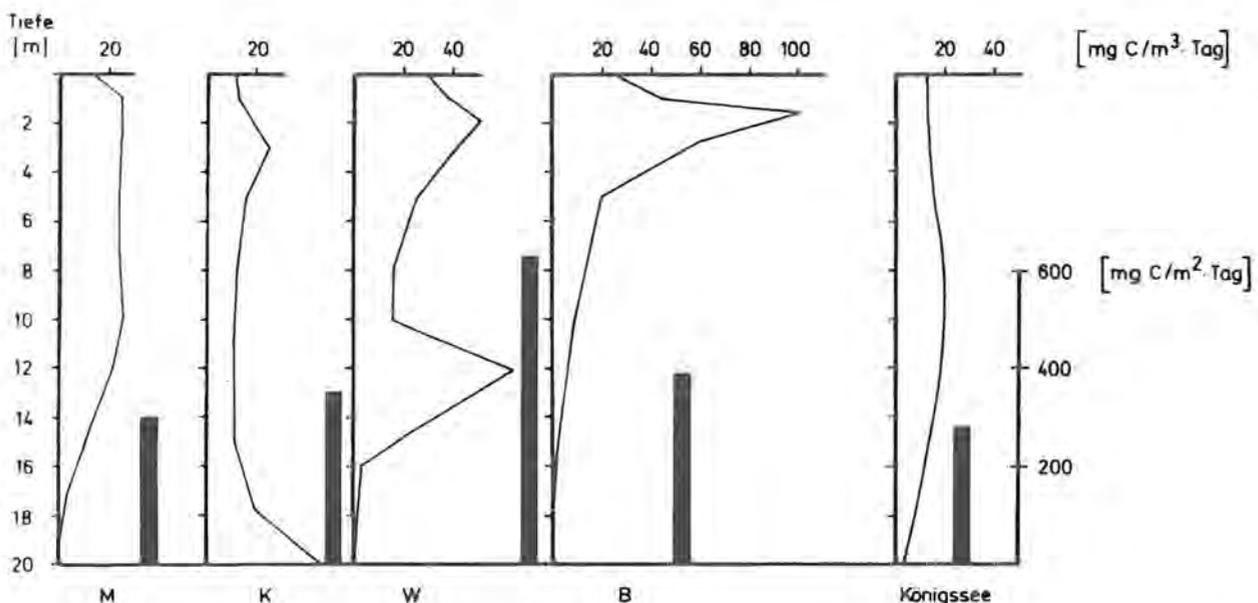


Abb. 99: Vertikalverteilung der sommerlichen Tages-Primärproduktion ($\text{mg C/m}^3 \cdot \text{Tag}$). Die schwarzen Säulen geben die Tagesprimärproduktion/ $\text{m}^2 \cdot \text{Tag}$ an. M Müllstätter See, K Klopeiner See, W Wörther See, B Bodensee (Untersee) (alle nach Findenegg 1964) im Vergleich zum Königssee.

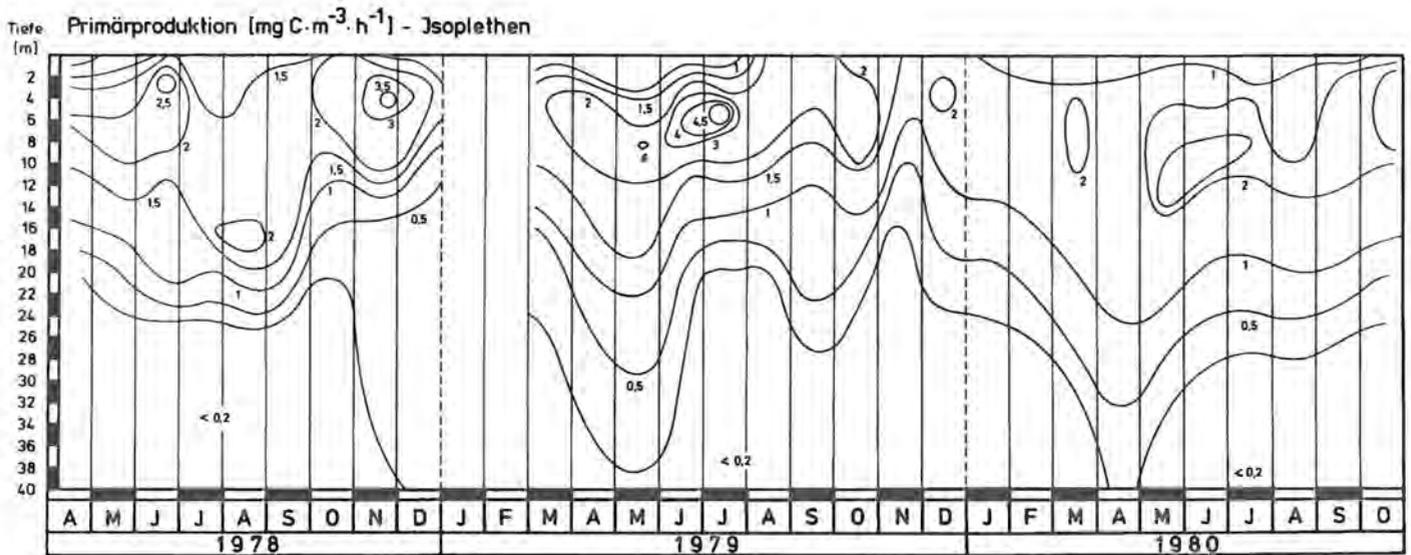


Abb. 102: Isolethendarstellung der Primärproduktion im Königssee.

spielen, die wir jedoch nicht weiter verfolgt haben. Darüber hinaus ergeben sich Hinweise, die u. U. als Anpassungserscheinungen gedeutet werden können und gegebenenfalls zu entsprechenden Spezialuntersuchungen führen (Tilzer 1978).

Auch aus unserer Darstellung folgt, daß sich das Produktionsmaximum im Verlaufe des Sommers in Richtung höherer Strahlungsintensität bewegt. Dafür kann es verschiedene Ursachen geben, die hier jedoch nicht zu diskutieren sind.

Nach der Isolethendarstellung der Produktionsrate/ $m^3 \cdot Stunde$ (Abb. 102) fallen die höchsten Produktionsraten in die Zeit zwischen Frühjahr/Sommer (1978, 1979, 1980) bzw. in den Spätherbst (1978). Im Frühjahr/Sommer kommt es nach erfolgter Zirkulation und schmelzwasserbedingten Nährstoffschüben so zu einer raschen Zunahme des Phytoplanktons. Dies dürfte für den Königssee charakteristisch sein. Zu einer entsprechenden, wenn auch abgeschwächten Entwicklung, kann gelegentlich aber auch die spätherbstliche Zirkulation führen, vorausgesetzt, daß die Strahlungsverhältnisse günstig sind, was in dieser Jahreszeit aber nicht die Regel ist.

7.1.3 Schätzung der Tages- und Jahresproduktion

Aus den in verschiedenen Tiefen in $mg\ C/m^3 \cdot h$ ermittelten Produktionsraten läßt sich die Produktionsrate unter $1\ m^2$ Seeoberfläche berechnen ($mg\ C/m^2 \cdot h$). Für die Umrechnung auf Tagesproduktionswerte werden in der Literatur verschiedene Methoden angegeben, die auf empirischer Basis ermittelt worden sind. Unseren Angaben liegt das von Gächter (1972) erarbeitete Verfahren zugrunde. Danach bewegen sich die Tagesproduktionsraten zwischen den Größen $0,008-0,46\ g\ C/m^2$ (Mittelwert: $0,23 \pm 0,1\ g\ C/m^2$).

In Abb. 103 sind die Minimum- und Maximumwerte aller Seen dargestellt, die im Rahmen des „OECD-Eutrophication Program Regional Project Alpine Lakes“ zwi-

schen 1972 und 1976 untersucht worden sind. Wir haben sie durch die am Königssee ermittelten Werte ergänzt, und man sieht, daß sie sich ganz am Anfang dieser Reihung einordnen lassen, d. h. in einem Bereich, in dem sich auch die anderen untersuchten oligotrophen Seen (Lunzer Untersee 1976, Attersee 1976 bzw. 1975 und Lac Tazenat 1972) befinden.

Aus der Datenzusammenstellung zur phytoplanktischen Jahresproduktion in Tabelle 35 folgt, daß nur der als ultra-oligotroph eingestufte Lake Tahoe einen noch wesentlich geringeren Produktionswert aufweist als der Königssee. Gemeinsam mit dem Attersee setzt sich der Königssee jedoch klar von den als mesotroph bzw. eutroph zu bezeichnenden Seen ab, wobei die Jahresproduktion des Königssees mit ca. $77\ g\ C/m^2 \cdot Jahr$

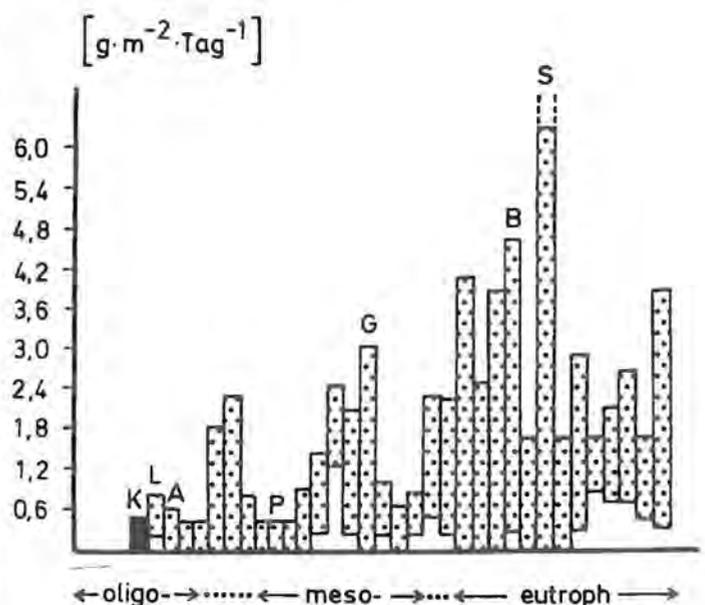


Abb. 103: Maximum-Minimumwerte der Primärproduktion/Tag in Seen mit verschiedenem Trophiegrad. Der schwarze Balken (K) entspricht den Königsseewerten. Die punktierten Balken entsprechen Seen, die im Rahmen des OECD-Eutrophication Program untersucht worden sind, z. B. L Lunzer See, A Attersee, P Piburger See, G Greifensee, B Baldeggersee, S Sempacher See (SFBfEP 1980).

Tabelle 35 Phytoplanktische Jahresproduktion in einigen Seen mit verschiedenem Trophiegrad

See	Trophiegrad	Primärproduktion (gC/m ² · Jahr)
Lake Tahoe ¹⁾	ultra-oligotroph	60
Ontario ³⁾	eutroph	220
Piburger See ²⁾	mesotroph	201
Attersee ²⁾	oligotroph	108
Bodensee ¹⁾	meso-eutroph	250
Königssee	oligotroph	77

¹⁾ Tilzer, persönl. Mitteilung ²⁾ Fricker 1980
³⁾ Vollenweider und Dillon 1974

noch erheblich unter jener des Attersees (ca. 108 g C/m² · Jahr) liegt.

Setzt man nach Odum (1980) 1 g C = 2 g phytoplanktischer Trockensubstanz, so läßt sich die Tagesproduktion durch anschaulichere Werte ausdrücken. Es werden demnach pro Tag und unter 1 m² Seeoberfläche im Mittel etwa 460 mg Phytoplankton (TG) produziert. Berücksichtigen wir die Ausdehnung der trophogenen Zone (0–20 m), so errechnet sich eine mittlere Tagesproduktion von ca. 23 mg/m³. Berücksichtigen wir nun, daß das Volumen des Königssees zwischen 0–20 m : 91,9 × 10⁶ m³ beträgt, so kommen wir auf eine tägliche Produktion von ca. 2 Tonnen Trockensubstanz.

7.1.4 Aktivität, photosynthetische Kapazität, Turnover und Effektivität

Unter Aktivität (= photosynthetische Aktivität) versteht man das Verhältnis Produktionsrate/Biomasse. Beide Größen werden in mg Kohlenstoff ausgedrückt, wobei der Umrechnung vom phytoplanktischen Frischgewicht in Kohlenstoff ein Umrechnungsfaktor von 0,1 zugrunde gelegt wird.

Tabelle 36 Primärproduktion im Königssee

Jahresproduktion	(gC/m ²)	77
Minimale Produktionsrate	(gC/m ² Tag)	0,082
Maximale Produktionsrate	(gC/m ² Tag)	0,464
Maximale Produktion der Volumeneinheit	(gC/m ³ Tag)	0,21
Mittlere Produktionsrate im Frühling	(gC/m ² Tag)	0,276
Mittlere Produktionsrate im Sommer	(gC/m ² Tag)	0,283
Mittlere Produktionsrate im Herbst	(gC/m ² Tag)	0,186
Mittlere Produktionsrate im Winter	(gC/m ² Tag)	0,129 (1 Wert)

In Tabelle 37 ist die photosynthetische Aktivität nach Jahreszeiten bzw. nach drei verschiedenen Tiefenschichten aufgeteilt: a) 0–4 m: Zone der strahlungsbedingten Hemmung, b) variable Tiefenschicht des Produktionsmaximums, c) 6–20 m: Zone der strahlungsbedingten Produktionsabnahme).

Aus dem Vergleich der Zahlenwerte folgt, daß die photosynthetische Aktivität in den oberen Wasserschichten einschließlich der Tiefe des Produktionsmaximums im Verlaufe des Jahres zunimmt, während in der tieferen Schicht (6–20 m) anscheinend keine entsprechende Veränderung erfolgt. Auf Erklärungsversuche sei verzichtet, weil sie ohne weitere Spezialinformationen, die im Rahmen unseres Projektes aber nicht erarbeitet werden konnten, spekulativ bleiben müßten.

Die Umsatzzeit (Turnover) des Phytoplanktons läßt sich aus dem Kehrwert der photosynthetischen Aktivität abschätzen. Da sich das Phytoplankton des Königssees aus zahlreichen Arten mit unterschiedlichen Umsatzzeiten zusammensetzt, sind diese Werte lediglich als

Tabelle 37 Aktivität (A), Umsatzzeit des Phytoplanktons (U) und Effizienz der photosynthetisch nutzbaren Strahlung (E) – Königssee

Jahreszeit	0–4 m			6–20 m			Produktionsmaximum		
	A (mgC/mgC · h)	U (Stunden)	E (%)	A (mgC/mgC · h)	U (Stunden)	E (%)	A (mgC/mgC · h)	U (Stunden)	E (%)
Frühling	0,037	35,22	0,041	0,041	32,65	0,331	0,051	25,27	0,209
Sommer	0,109	14,24	0,034	0,040	32,94	0,502	0,101	14,00	0,148
Herbst	0,111	10,89	0,069	0,065	31,43	0,304	0,153	7,13	0,139

Tabelle 38		Mittlere photosynthetische Kapazität in Seen mit unterschiedlichem Trophiestatus und klimatischer Region auf vergleichbaren Temperaturbereich ($\sim 10^\circ\text{C}$) umgerechnet – P_{\max} ($\text{mg C} \cdot \text{mg}^{-1} \text{ chl a} \cdot \text{h}^{-1}$)		
See	Geographische Lage	Trophiezustand	P_{\max}	Autor
Kilotes	Äthiopien	hypereutroph	4,36	Talling et al. 1973
Leven	Schottland	eutroph	2,25	Bindloss 1974
Vombsjön	Schweden	eutroph	2,30	Gelin 1975
Finstertaler See	Österreich	oligotroph	2,30	Tilzer 1977
Königssee	Deutschland	oligotroph	1,72	
Tahoe	USA	ultra-oligotroph	0,87	Tilzer 1977

Richtgrößen zu verstehen. Sie besagen, daß die jeweils vorhandene Phytoplanktonmischpopulation innerhalb einer Zeitspanne von wenigen Stunden bis zu $1\frac{1}{2}$ Tagen umgesetzt wird. Die jeweils produzierende Algenbiomasse kann sich somit in diesem Zeitabschnitt verdoppeln, sofern sie selbst keinerlei Verluste erlitten hat. Sie kann aber auch ihre Ausgangsbiomasse wieder ersetzt haben, falls diese vollständig verlorengegangen ist.

Obgleich diese beiden Annahmen unrealistische Grenzsituationen markieren und der wirkliche Sachverhalt nicht ohne weiteres analysierbar ist, ergeben sich aus der Umsatzzeit, ganz besonders auch aus ihrer Veränderung in der Zeit und aus ihren tiefenabhängigen Unterschieden, wichtige Informationen für die Populationsdynamik des Phytoplanktons. Sie erhalten ihre Bedeutung aber erst dann, wenn die Bestandsaufnahmen des Phytoplanktons in wesentlich kürzeren als in den von uns gewählten Zeitabständen stattgefunden haben.

Wird die produzierte Biomasse in Energie-Einheiten ausgedrückt und auf die im Produktionszeitraum eingestrahlte Energiemenge bezogen, so erhält man den Anteil des durch Photosynthese gebundenen Energieangebots. Das Verhältnis beider Größen wird als Effektivität oder Energieaufnahme – Effizienz bezeichnet. Die Umrechnung von Biomasse in Energie-Einheiten erfolgt über den Kohlenstoffgehalt der Biomasse, wobei $1 \text{ g Kohlenstoff} \approx 10 \text{ kcal}$. Die in Tabelle 37 zusammengestellten Werte liegen zwischen 0,03–0,5% und sind damit erwartungsgemäß niedrig (Tabelle 37).

Ähnlich der eingangs definierten photosynthetischen Aktivität ist der Begriff der „mittleren photosynthetischen Kapazität“. Darunter versteht man das Verhältnis zwischen der Produktionsrate und dem Chlorophyllgehalt der produzierenden Biomasse. Die betreffenden Größen werden jedoch lediglich aus der Schicht maximaler Produktion entnommen. Geht man davon aus, daß die maximale Produktion jeweils im Strahlungsoptimum erfolgt, so hängt ihre Größe vor allem vom Nährstoffangebot in dieser Schicht ab. Die „mittlere

photosynthetische Kapazität“ ist somit in nährstoffarmen Seen niedriger als in nährstoffreichen. Aus den in Tabelle 38 zusammengestellten Daten ist zu entnehmen, daß die „mittlere photosynthetische Kapazität“ des Königssees mit einem Wert von 1,72 $\text{mg C/mg Chl a} \cdot \text{h}$ verhältnismäßig niedrig ist. Sie kann daher als ein weiteres Kriterium für den oligotrophen Zustand des Königssees herangezogen werden.

8. Zusammenfassung

8.1 Entstehung, Geologie, Hydrologie, Morphometrie

8.1.1 Der Königssee existiert seit ca. 10 000 Jahren. Sein in Dachsteinkalk liegendes Seebecken ist wahrscheinlich im ausgehenden Jura vor ca. 140 Millionen Jahren als Grabenbruch angelegt worden. Die endgültige Trogform erhielt es durch Eiserosion während der Würmeiszeit. Obersee und Königssee waren von Anfang an durch eine Wallmoräne getrennt.

8.1.2 Das orographische Einzugsgebiet (131,13 km²) ist um den Faktor 25,2 größer als das Seeareal. Es läßt sich in 5 Zuflußgebiete aufteilen: Schrainbach (50,4 km²), Obersee (39,32 km²), Kesselbach (15,5 km²), Eisgraben (14,7 km²) und Königsbach (11,23 km²).

8.1.3 Das Jahresmittel der Zuflüsse aus dem orographischen Einzugsgebiet und durch Niederschläge auf die Seeoberfläche beträgt 213,68 x 10⁶ m³ bzw. 8,48 x 10⁶ m³.

8.1.4 Im Einzugsgebiet des Königssees dominieren Dachsteinkalk (> 90%) und Dolomit (< 10%). Nur im Bereich des Eisgrabens gewinnt Dolomit (≈ 50%) an Bedeutung. Kieselgesteine kommen vor allem im Einzugsgebiet des Kesselbachs vor.

8.1.5 Das Einzugsgebiet des Königssees ist zu 63,6% mit natürlichen Pflanzengesellschaften, zu 28% mit Wald und zu 8,4% mit Wirtschaftswiesen (Almen) bedeckt.

8.1.6 Mit einer maximalen Tiefe von 190 m und einer Seeoberfläche von 5,21 km² umfaßt der Königssee eine Wassermenge von 511 x 10⁶ m³, die aufgrund der Abflußmenge in die Königsseeache in 2,3 Jahren (theoretische Wassererneuerungszeit) austauschbar wäre.

8.1.7 Ein besonderes morphometrisches Kennzeichen des Königssees ist seine in bezug auf die Seeoberfläche große Tiefe. Mit der relativen Tiefe von 7,4% steht der Königssee an der Spitze der meisten Seen mit gleicher oder größerer Seeoberfläche und ähnelt damit den Krater- und Fjordseen.

8.2 Hydrographie

8.2.1 Mit einer Lichttransmission von 85–90% im Bereich der blaugrünen Strahlung gehört der Königssee zu den klarsten Gewässern Europas. Seine optische Kennzahl ist 798; die 1%-Grenze der photosynthetisch nutzbaren Strahlung liegt im Jahresmittel bei 20 m Wassertiefe. Die Sichttiefen variieren zwischen 6–18 m.

8.2.2 Infolge seiner fjordartigen Einbettung in das Gebirge ist der Königssee von der Sonnenstrahlung

stark abgeschirmt. Sein Jahreswärmegewinn von ca. 12 000 cal/cm² ist daher im Vergleich zu den Voralpenseen gering (Tabelle 12).

8.2.3 Infolge seiner fjordartigen Einbettung in das Gebirge ist der Königssee stark windgeschützt. Die für die Voralpenseen typische windbedingte Wärmeverteilung, die in der warmen Jahreszeit zur Bildung des Epilimnions führt, unterbleibt daher weitgehend. Die thermische Dichteschichtung beginnt knapp unter der Seeoberfläche und reicht bis ca. 20 m.

8.2.4 Das höchste Temperaturmonatsmittel der Seeoberfläche wird im August mit 16°C erreicht. In 5 m Wassertiefe steigt das Monatsmittel der Temperatur nicht über 12°C, in 10 m Wassertiefe nicht über 8°C und in 20 m Wassertiefe nicht über 6°C.

8.2.5 Im Tiefenbereich zwischen 75–100 m Wassertiefe erfolgt ab 4,2°C eine Temperaturinversion: Die Temperatur steigt bis zum Grund um 0,2–0,3°C an. Die thermisch bedingte Dichteverminderung wird durch den konzentrationsbedingten Dichtegradienten überkompensiert.

8.2.6 Infolge der windgeschützten Lage des Königssees werden im Verlauf der Herbstzirkulation die Wasserschichten in Tiefen über 20–30 m erst im Spätherbst bis Winteranfang erfaßt. Bei nachfolgender Eisbedeckung kann diese Zirkulationsphase unterbrochen und nach dem meist späten Eisbruch für einige Zeit fortgesetzt werden.

8.2.7 Der Königssee ist kein holomiktischer See. Es lassen sich drei Wasserschichten unterscheiden: a) eine Oberschicht von ca. 0–20 m, die während jeder Zirkulationsphase voll durchmischt wird, b) eine Übergangsschicht von 20–125 m, die mit wachsender Tiefe immer weniger in den Durchmischungsprozeß einbezogen wird, und c) eine Tiefenschicht ab 125 m, die am Austauschgeschehen nur noch wenig beteiligt ist (ca. einmal in sechs Jahren).

8.3 Chemische Eigenschaften

8.3.1 Mit einer Härte von 4,3–6,1° dH (1,5–2,2 mval/l) ist der Königssee ein im Vergleich zu den Voralpenseen weiches Gewässer, in welchem unter den Kationen Ca²⁺ (25–36,5 mg/l) und Mg²⁺ (1,9–6,9 mg/l) und unter den Anionen HCO₃⁻ (60–80 mg/l) vorherrschen. Der Gesamtsalzgehalt beträgt ca. 156 mg/l.

8.3.2 Die chemischen Meßdaten sind in den Tabellen 16 und 17 zum Vergleich mit anderen Seen zusammengestellt. Insgesamt erweist sich der Königssee als verhältnismäßig nährstoffarmes Gewässer, vor allem hinsichtlich des NO₃-N (0,3–0,6 mg/l) und des reaktiven PO₄-P (n.n.–2,0 µg/l).

Lediglich im Raum St. Bartholomä und Sallet wurden gelegentlich bis zu 7 µg/l nachgewiesen. NH₄⁺ und NO₂⁻ liegen unter der Nachweisgrenze (<0,02 mg/l). Mit Silikatkonzentrationen zwischen 0,2–5,3 mg/l unterscheidet sich der Königssee jedoch nicht wesentlich vom Starnberger See, Ammersee und Bodensee.

8.3.3 Der Königssee ist bis zum Seegrund (6–7 mg/l) mit Sauerstoff versorgt. Die Entstehung des mä- ßig klinograden Verlaufs der Sauerstoff-Vertei- lung im Sommer wird durch die Temperaturschichtung in der trophogenen Zone begünstigt.

8.3.4 Infolge der sommerlichen Temperaturschichtung in der trophogenen Zone ist im anschließenden Hypolimnion eine relativ ungestörte Sauerstoff- Zehrung mit einer Rate von 0,029 mg/cm²/Tag nachweisbar. Im Jahre 1980 führte sie innerhalb der Sommerstagnation (154 Tage) zu einem hypolimnischen Sauerstoff-Verbrauch von 185,6 Tonnen.

8.3.5 Das im Verlauf der sommerlichen Sauerstoff- Zehrung entstehende „relative Sauerstoff-Defi- zit“ ist nur bis in Tiefen um 60–90 m nachweis- bar. Aus experimentellen Zehrungsmessungen, Sedimentationsmessungen und Messungen zur Vertikalverteilung von Chlorophyll a und partiku- lärem organischem Kohlenstoff wird der Schluß gezogen, daß die aerobe Dekomposition der ab- sinkenden, leicht abbaubaren organischen Sub- stanzen nach Erreichen dieser Tiefenzone im wesentlichen abgeschlossen ist. Der restliche Anteil (40–60%) schwer abbaubarer organischer Sub- stanzen erreicht den Seegrund.

8.3.6 Die jährlichen Nährstoffimporte in den See aus seinem Einzugsgebiet und über die Niederschlä- ge und die Nährstoffexporte in die Königssee- ache wurden geschätzt. Danach beträgt der Net- toimport für PO₄-P_{total}: 0,04–0,07 g/m², für NO₃- N: 7,6–9,6 g/m² und für SiO₂: 13,2 g/m².

8.4 Organismengesellschaften

8.4.1 Im Litoral des Königssees kommen zehn sub- merse Makrophyten vor, unter welchen die Cha- raceen mit *Chara strigosa* und *Chara aspera* und die Ranunculaceenart *R. trichophyllus* vorherr- schen (Tabelle 26).

8.4.2 Im Profundal des Königssees dominieren bei Ver- nachlässigung wesentlich kleinerer Formen (z. B. Nematoden) die Oligochaeten (bis 800/m²) und die Chironomiden (bis 300/m²).

8.4.3 Unter Einbeziehung früherer Sammelergelbnisse aus dem Litoral und Profundal wurden bisher 30 Chironomidenarten nachgewiesen, über deren quantitative Zusammensetzung keine Informatio- nen vorliegen (Tabelle 27).

8.4.4 Im Pelagial des Königssees wurden 49 Phyto- planktonarten nachgewiesen. Die höchsten Ar-

tenzahlen (17) entfallen auf die Chrysophyceen und Bacillariophyceen (8). Die vorherrschende Art ist *Cyclotella comta* (maximal bis 6 x 10⁶ Zel- len/l). Sie kann gelegentlich von *Uroglena ameri- cana* (maximal bis 15 x 10⁶ Zellen/l) übertroffen werden. In diesem Fall sind Vegetationsfärbun- gen bemerkbar (Tabelle 28).

8.4.5 Im Pelagial des Königssees existieren 5 Crusta- ceenarten. 2 Copepoden: *Arctodiaptomus alpi- nus* und *Cyclops abyssorum* und 3 Cladoceren: *Bosmina longispina*, *Daphnia hyalina* und *Ceriodaphnia quadrangula*. Die Copepoden übertref- fen die Cladoceren an Zahl und Biomasse. Unter den Copepoden dominiert *Cyclops abyssorum* (Tabelle 31).

8.4.6 Unter den pelagischen Rotatorien des Königssees wurden bisher 19 Arten bzw. Vertreter von For- menkreisen nachgewiesen, unter welchen zeit- weise u. a. *Filinia terminalis*, *Keratella cochlearis*, *Keratella hiemalis* und *Kellicottia longispina* vor- herrschen (Tabelle 33).

8.4.7 Der Königssee ist ein Salmoniden-Gewässer. Es gibt 6 Salmonidenarten, unter welchen Seesaib- linge und Renken dominieren. Unter den übrigen Fischen spielt der häufig vorkommende Hecht als größter Raubfisch und als Endwirt des Fisch- bandwurmes *Triaenophorus nodulosus* eine be- sondere Rolle.

8.5 Populationsdynamik der Plankton- crustaceen

8.5.1 Alle Crustaceenarten bilden pro Jahr nur eine Generation aus.

8.5.2 Die Maxima der ausgewachsenen Crustaceen fallen bei allen Arten in die Zeit zwischen Juli/Au- gust. *Daphnia hyalina* und *Ceriodaphnia qua- drangula* sind nur zwischen Juni bis Mitte No- vember in nennenswerter Menge vertreten. Sie überwintern vor allem durch Ehippien. *Bosmina longispina* ist ganzjährig, in den Wintermonaten aber nur in sehr geringer Dichte (0,2/l) nachweis- bar. *Cyclops abyssorum* und *Arctodiaptomus al- pinus* sind im Winter und Frühjahr durch ihre Ju- gendstadien vertreten.

8.5.3 Aufgrund von Trockengewichtsberechnungen ergibt sich folgende Reihung in der Crustaceen- biomasse:

<i>Cyclops abyssorum</i>	1,5–8,7 mg/m ³
<i>Arctodiaptomus alpinus</i>	> 0,1–8,7 mg/m ³
<i>Bosmina longispina</i>	> 0,01–4,7 mg/m ³
<i>Daphnia hyalina</i>	0–4,2 (0,5) mg/m ³
<i>Ceriodaphnia quadrangula</i>	0–0,5 mg/m ³

8.6 Phytoplanktonbiomasse und Primär- produktion

Die Phytoplanktonmasse der trophogenen Zone beträgt im Jahresmittel 0,31 g/m³ bzw. 6,83 g/

m^2 Frischgewicht und $1,61 \text{ mg}/m^3$ bzw. $33,7 \text{ mg}/m^2$ Chlorophyll a.

8.6.2 Die Vertikalverteilung der Primärproduktion ist orthograd bis mäßig klinograd. Der V_{max}/O -Wert liegt zwischen 6–10%.

8.6.3 Die mittlere Tagesproduktion beträgt $0,23 \pm 0,1 \text{ g C}/m^2$. Die Jahresproduktion wird auf $77 \text{ g C}/m^2$ geschätzt. Der maximale Produktionswert/ m^2 betrug $6 \text{ mg C}/h$.

8.6.4 Die photosynthetische Aktivität beträgt: $0,03$ – $0,15 \text{ mg C}/\text{mg C} \cdot h$; die Umsatzzeit: $0,3$ – $1,5$ Tage und die mittlere photosynthetische Kapazität: $1,72 \text{ mg C}/\text{mg Chl a} \cdot h$.

8.7 Anthropogene Beeinflussung des Königssees

8.7.1 Es wird zwischen folgenden Einflüssen unterschieden:

- Nährstoffimporte über die Zuflüsse
- Nährstoffimporte über die Niederschläge
- Nährstoffimporte über das Sickerwasser („diffuse Belastung“)
- Herabsetzung der spektralen Transmission durch den Schiffsverkehr (Aufwirbelung des Seegrundes in hinreichend flachen Teilen des Seebeckens)
- Fischfang und Fischbesatz

8.7.2 Die Nährstoffimporte aus den Zuflüssen und Niederschlägen lassen hinsichtlich ihrer naturgegebenen bzw. anthropogenen Herkunft keine Differenzierung zu. Sie wurden mit $0,23 \text{ g P}/m^2 \cdot \text{Jahr}$ und $24,6 \text{ g N}/m^2 \cdot \text{Jahr}$ geschätzt.

8.7.3 Der Mittelwert der nach vier verschiedenen Verfahren berechneten kritischen Belastungsgrenzen (Tabelle 24) des Königssees beträgt: $0,741 \pm 0,04 \text{ g P}/m^2 \cdot \text{Jahr}$.

8.7.4 Es liegen keine Informationen über Nährstoffimporte durch das Sickerwasser vor. Nach Schätzungen (vgl. Tabelle 22) werden im Raum Sallet und St. Bartholomä jährlich ca. 507 kg Phosphor und $2,9 \text{ t}$ Stickstoff unweit des Ufers im schotterhaltigen Untergrund deponiert.

8.7.5 Es gibt Hinweise für eine mögliche Düngung des Königssees aus dem Nährstoffdepot bei St. Bartholomä und Sallet:

- die höchsten im Untersuchungszeitraum ermittelten Konzentrationen von reaktivem $PO_4\text{-P}$ ($\leq 7 \mu\text{g}/l$) wurden im Litoralbereich um St. Bartholomä und Sallet gefunden.
- Der Seeboden ist in den Flachwasserbereichen um die Sallet-Landungsstege im Sommer mit ausgedehnten Algenwatten (Spirogyra) überzogen.
- Durch *Uroglena americana* hervorgerufene Vegetationsfärbungen nehmen mit großer

Wahrscheinlichkeit vom Südtail des Königssees ihren Ausgang.

8.7.6 Baumaßnahmen am Ufer von St. Bartholomä bewirkten zeitweise starke Wassertrübungen, durch welche die Transparenz herabgesetzt und damit das untere Ende der trophogenen Zone in Richtung Seeoberfläche verlagert wird. Spuren von Schiffsschrauben in den Seekreidebänken bei Sallet sprechen für einen ähnlichen Effekt durch Fahrgastschiffe. Seine Folgen lassen sich noch nicht abschätzen. Aufgrund der beobachteten Tendenz zur Meromixie ist jedoch eine über die thermische Schichtung hinausgehende sauerstoffproduzierende Schicht erwünscht.

8.7.7 Über den Einfluß von Fischfang und Fischbesatz auf das Ökosystem Königssee liegen bisher keine Informationen vor.

8.8 Indikatoren für den gegenwärtigen oligotrophen Status des Königssees

8.8.1 Blaugrüne Eigenfarbe des Wassers. Optische Kennzahl 798. Tiefenausdehnung der trophogenen Zone ($\sim 20 \text{ m}$).

8.8.2 Niedrige phytoplanktische Biomasse (Chlorophyll-a-Werte): $1,5$ – $1,8 \mu\text{g}/l$.

8.8.3 Niedrige hypolimnische Rate der Sauerstoff-Zehrung: $0,029 \text{ mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{Tag}$.

8.8.4 Niedrige Primärproduktionsrate: $0,008$ – $0,46 \text{ g C}/m^2 \cdot \text{Tag}$.

8.8.5 Niedriger Anteil der maximalen volumenbezogenen Produktion an der flächenbezogenen Produktion $V_{max}/O = 6$ – 10% .

8.8.6 Niedrige „mittlere photosynthetische Kapazität“: $1,72 \text{ mg C}/\text{mg Chl a} \cdot h$.

8.8.7 Zahlreiche Indikatororganismen für Oligotrophie:

- | | |
|--------------------------|---|
| a) Phytoplankton: | <i>Cyclotella</i> -Arten
<i>Uroglena americana</i> |
| b) Submerse Makrophyten: | <i>Chara strigosa</i> |
| c) Chironomiden: | <i>Macropelopia fehlmanni</i>
<i>Protanypus caudatus</i>
<i>Paracladopelma nigrifulva</i> |
| d) Planktonrotatorien | <i>Keratella hiemalis</i>
<i>Conochilus unicornis</i>
<i>Ascomorpha saltans</i> |
| e) Planktoncrustaceen: | <i>Bosmina longispina</i>
<i>Ceriodaphnia quadrangula</i> |
| f) Fische: | alle Salmoniden und die Koppe |

9. Literaturverzeichnis

- AMT DER TIROLER LANDESREGIERUNG, 1979: Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan. Grossacke 5. Gewässerschutz, 104 S.
- AMTSBLATT DES BStMLU, 1981: Drei Jahre Alpen- und Nationalpark Berchtesgaden (MR Dr. A. Lang)
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT, 1978: Geologische Karte von Bayern 1:100 000 Nr. 667 Bad Reichenhall, Verlag BGL München
- BAYERISCHE LANDESSTELLE FÜR GEWÄSSERKUNDE, 1955: Verzeichnis der Flächeninhalte der Bach- und Flußgebiete in Bayern mit einem Flußgebietsatlas 1:200 000 Stromgebiet der Donau. Q. Inn
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT, 1976: Gewässeratlas von Bayern 1:200 000, CC 8742 Bad Reichenhall; Bayerisches Landesvermessungsamt München
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT, 1976: Gewässerschutztechnische Studie der Reinhaltung des Chiemsees, München
- BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT 1982: Seenreinhaltung in Österreich, H. Sampl, R. Gusinde, H. Tomek et al. Schriftenreihe »Wasserwirtschaft«, H. 6, 256 S.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT, 1978: Limnologische Untersuchungen des Ammersees Sept. 1975 bis Dez. 1976; Dr. C. Steinberg
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT, 1983: Verzeichnis der Seen in Bayern, Teil II
- BOTRELL, H. H., 1975: The relationship between temperature and duration of egg development in some epiphytic cladocera and copepoda in the River Thames. Reading with a discussion of temperatur functions. *Oecologia (Berl.)* 18, 63–84
- CASWELL, H., 1972: On instantaneous and finite birth rates. *Limnol. Oceanogr.* 17, 787–791
- COWGILL, U. M. and G. E. HUTCHINSON, 1970: Chemistry and mineralogy of the sediments and their source materials. In: *Janula: An account of the history and development of the Lago di Monterosi, Latium, Italy* Trans. Amer. Phil. Soc. n. s. 60, 37–107
- DILLON, P. J. and F. RIGLER, 1974: A test of a simple nutrient budget model predicting the phosphorus concentration in lake water. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, 31, 1771–1778
- DYCK, S., 1978: Gegenstand und Ziel von Wasserhaushaltsberechnungen. In: *Angewandte Hydrologie* S. Dyck (Hrsg.), S. 15–36, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin
- EDMONDSON, W. T., 1974: Secondary production. *Mitt. Internat. Ver. Limnol.* 20, 229–272
- ENDERS, G., 1979: Theoretische Topoklimatologie. Nationalpark Berchtesgaden, Forschungsberichte 1, 92 S.
- EINSLE, U., 1975: Revision der Gattung Cyclops s. str., speziell der Abyssorum-Gruppe. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 32, 57–219
- FINDENEKG, I., 1964: Produktionsbiologische Planktonuntersuchungen an Ostalpenseen. *Intern. Rev. ges. Hydrobiol.* 49, 381–416
- FINDENEKG, I., 1964: Bestimmung des Trophiegrades von Seen nach der Radiocarbonmethode. *Naturw.* 51, 15, 368 S.
- FINDENEKG, I., 1965: Die Eutrophierung des Klopeiner Sees. *Österr. Wasserwirtsch.* 17, 175–181
- FLÖSSNER, D., 1972: Krebstiere, Crustacea, Kiemen- und Blattfüßer, Branchiopoda, Fischläuse Branchiura, aus: *Die Tierwelt Deutschlands*, Gustav-Fischer-Verlag, Jena, 501 S.
- FRIMMEL, F. H., 1979: Die hydrochemischen Verhältnisse in der Münchner Schotterebene. *Schriftenreihe d. Sonderforschungsbereichs 81 der TU München*, 53–63
- FRY, F. E. J., 1957: The aquatic respiration of fish. In: *The physiology of fishes* M. E. Brown ed. Vol. 1 metabolism, Academic Press N. Y. and London, 1–63
- GÄCHTER, R., 1972: Die Bestimmung der Tagesraten der planktischen Primärproduktion — Modelle und In-situ-Messungen. *Schweiz. Z. Hydrol.* 34, 211–244
- GANSS, O., 1977: Geologisches O-W-Profil vom Fagstein über Königssee–Watzmann–Wimbachtal–Hochkalter–Reiteralpe. In: *Exkursionsführer der Nationalparkverwaltung Berchtesgaden*, 1981
- GANSS, O., 1979: Geologie der Berchtesgadener und Reichenhaller Alpen. 3. Aufl., Verlag A. Plenk, Berchtesgaden, 152 S.
- GLIWICZ, Z. M., 1969 a: Studies on the feeding of pelagic Zooplankton in lakes with varying trophy. *Ekol. Polka, Ser. A* 17, 663–708
- GLIWICZ, Z. M., 1969 b: The share of algae, bacteria and trypton in the food of the pelagic zooplankton of lakes with various trophic characteristics. *Bull. Acad. Polon. Sci. Cl. II*, 17, 159–165
- GODE, P. and J. OVERBECK, 1972: Untersuchungen zur heterotrophen Nitrifikation im See. *Z. Allg. Microbiol.* 12, 567–574
- GRIM, J., 1939: Beobachtungen am Phytoplankton des Bodensees (Obersee) sowie deren rechnerische Auswertung. *Int. Revue Ge Hydrobiol. Hydrogr.* 39, 193–315
- HÖLTING, B., 1980: Hydrogeologie. Verlag Enke, Stuttgart, 339 S.
- HUTCHINSON, G. E., 1938: Chemical stratification and lake morphology. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 24, 63–69
- HUTCHINSON, G. E., 1957: A treatise on limnology. Vol. I. John Wiley & Sons, Inc. N.Y., 1015 S.
- IDSO, S. B., 1973: On the concept of lake stability. *Limnol. Oceanogr.* 18, 681–683
- IMBODEN, D. M., R. F. WEISS, H. CRAIG, R. L. MICHEL und Ch. R. GOLDMAN, 1977: Lake Tahoe geochemical study. 1. Lake chemistry and Tritium mixing study. *Limnol. Oceanogr.* 22, 6, 1039–1051
- INTERNATIONALE GEWÄSSERSCHUTZKOMMISSION FÜR DEN BODENSEE, 1978: Jahresbericht über den limnologischen Zustand des Bodensees Nr. 3, 52 S.
- JACOBS, W. und M. RENNER, 1974: Taschenlexikon zur Biologie der Insekten. Gustav Fischer Verlag Stuttgart, 635 S.
- JUNGE, Ch., 1981: Die Entwicklung der Erdatmosphäre und ihre Wechselbeziehungen zur Entwicklung der Sedimente und des Lebens. *Verh. d. Ges. Deutsch. Naturf. u. Ärzte* 1980, 62–70
- KIEFER, F., 1971: Revision der Bacillifer-Gruppe der Gattung Arctodiaptomus Kiefer (Crustacea Copepoda: Calanoida). *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 27, 113–267
- KIEFER, F., 1978: Das Zooplankton der Binnengewässer, 2. Teil: Freilebende Copepoda. In: *Die Binnengewässer*, Bd. XXVI. 1–343, Verlag Schweizerbart, Stuttgart
- KOSTE, W., 1978: Rotatoria. Die Rädertiere Mitteleuropas. Ein Bestimmungsbuch begr. v. M. Voigt. Überordnung Monogononata. 2. Aufl. Gebr. Borntraeger, Berlin-Stuttgart, 673 S.
- KOTS, H. und O. MOOG, 1980: Die Phytoplanktonentwicklung im Attersee. *Arb. Lab. Weyregg* 5, 148–155

- KOTSCHENREUTHER, R., 1981: Untersuchungen zur Populationsdynamik des Crustaceenplanktons vom Königssee. Dipl. Arbeit d. Fachbereichs Biologie der LMU München, 109 S. + Anhang
- KRAUSE, W. u. H., 1979–1981: Exsikkate europäischer Characeae, im Selbstverlag des Autors.
- LEAN, D. R. S., 1973: Movements of phosphorus between its biologically important forms in lake water. *J. Fish. Res. Bd. Canada* 30, 1525–1536
- LEHMANN, R., 1981: Sedimentationsmessungen im Königssee. Dipl. Arbeit d. Fachbereiches Biologie d. LMU München, 167 S.
- LEMMER, H., 1979: Das Crustaceenplankton im Königssee, Vertikalverteilung und Populationsdynamik. Dipl. Arbeit d. Fachbereiches Biologie d. LMU München, 72 S. + Anhang
- LIPPERT, W., 1966: Die Pflanzengesellschaften des Naturschutzgebietes Berchtesgaden. *Ber. d. Bayer. Bot. Gesellsch.* 39, 67–122
- McLAREN, I. A., 1963: Effects of temperature on growth of zooplankton and the adaptive value of vertical migration. *J. Fish. Res. Bd. Canada* 20, 685–727
- MEISTER, G., 1976: Nationalpark Berchtesgaden. Begegnung mit dem Naturparadies am Königssee. Kindler Verlag München, 151 S.
- MELACK, J. M., 1978: Morphometric, physical and chemical features of the volcanic crater lakes of western Uganda. *Arch. Hydrobiol.* 84, 4, 430–453
- MELZER, A., A. MARKL und J. MARKL, 1981: Die submerse Makrophytenvegetation des Königssees in ihrer quantitativen Verbreitung. *Ber. Bayer. Bot. Ges.* 52, 99–107
- MIGULA, W., 1897: Die Characeen Deutschlands, Österreichs und der Schweiz. In: Dr. L. Rabenhorst's Kryptogamenflora V, Verlag E. Kummer, Leipzig
- MOOG, O., 1977: Jahreszyklus, Vertikalverteilung, Biomasse, Populationsdynamik und Produktionsbiologie des Crustaceenplanktons im Attersee. *Atterseejahresbericht 1977*, 90–108
- MOOG, O., 1979: Das Crustaceenplankton des Attersees – Bemerkungen zur Populationsökologie und Stellung in der limnischen Nahrungskette. *Arb. Lab. Weyregg* 3, 178–187
- MOOG, O., 1979: Zur Populationsökologie des Crustaceenplanktons im Attersee, OÖ. Inaug. Diss. a. d. Form. u. Naturw. Fak. d. Univ. Wien, 255 S.
- MOOG, O., 1980: Die Phytoplanktonentwicklung im Attersee 1979 und die Diatomeen-Kieselsäure-Beziehung. *Arb. Lab. Weyregg* 4, 173–194
- MÜLLER, R., 1981: Die Verteilung des Sauerstoffs im Königssee und ihre Ursachen. Dipl. Arbeit d. Fachbereiches Biologie der LMU München, 131 S. + Anhang
- NEUHUBER, F., H. BROSSMANN, P. ZAHRADNIK, 1980: Chemische Untersuchungen des Attersees 1979. *Arb. Lab. Weyregg* 4, 153–172
- NATIONALPARK BERCHTESGADEN, 1981: Landschaftsanalyse Alpenpark Berchtesgaden. 179 S.
- NYDEGGER, P., 1957: Vergleichende Limnologische Untersuchungen an sieben Schweizer Seen. *Beitr. Geol. d. Schweiz – Hydrol.* 9, 80 S.
- ODUM, E. P., 1980: Grundlagen der Ökologie, Bd. I: Grundlagen, Bd. II: Standorte und Anwendungen. Verlag Georg Thieme Stuttgart N. Y. 836 S.
- ODUM, H. T., 1957: Trophic structure and productivity of Silver Springs, Florida. *Ecol. Monogr.* 27, 55–112
- OHLE, W., 1971: Gewässer und Umgebung als ökologische Einheit in ihrer Bedeutung für die Gewässereutrophierung. *Gewässerschutz-Wasser-Abwasser*, 4, 437–456
- PALOHEIMO, J. E., 1974: Calculation of instantaneous birth rate. *Limnol. Oceanogr.* 19, 692–694
- PANZA, G. F., G. CALCAGNILE, P. SCANDONE and S. MUELLER, 1982: Die geologische Tiefenstruktur des Mittelmeerraumes. *Spektrum d. Wissenschaft* 1, 18–28
- PICHLER, H., 1963: Geologische Untersuchungen im Gebiet zwischen Roßfeld und Marktschellenberg im Berchtesgadener Land. *Beitr. Geol. Jb.* 48, 129–204
- RODHE, W., 1948: Environmental requirements of freshwater plankton algae. Experimental studies in the ecology of phytoplankton. *Symbol. Bot. Upsalien* 10, 1, 149 S.
- RODHE, W., 1958: Primärproduktion und Seentypen. *Verh. Int. Ver. Limnol.* 13, 121–141
- ROETHER, W., 1970: Tritium und Kohlenstoff 14 im Wasserkreislauf. *Z. Dtsch. Geol. Ges., Sonderheft Hydrogeol. – Hydrogeochemie*, 183–192
- RUTTNER, F., 1930: Das Plankton des Lunzer Untersees, seine Verteilung in Raum und Zeit während der Jahre 1908–1913. *Int. Rev. Ges. Hydrobiol.* 23, 1–138 u. 161–287
- RUTTNER-KOLISKO, A., 1972: III. Rotatoria. In: Die Binnengewässer XXVI. Das Zooplankton der Binnengewässer, 1. Teil, Verlag Schweizerbart Stuttgart, 99–234
- SAUBERER, F., 1962: Empfehlungen für die Durchführung von Strahlungsmessungen an und in Gewässern. *Mitt. Int. Ver. Limnol.* 11, 77 S.
- SCHARF, B., 1982: Das Meerfelder Maar. Zur Entwicklungsgeschichte eines Eifelmaares. Aus: *Negendank*, J. F. W. und G. Irion (in Vorbereitung)
- SCHIEFFER, F., 1979: Lehrbuch der Bodenkunde. Scheffer/Schachtschabel, Enke Verlag Stuttgart, 394 S.
- SCHINDLER, O., 1950: Der Königssee als Lebensraum. Erste Mitteilung über die bisherigen Ergebnisse. *Ver. Zool. Staatss. München*, 1, 97–129
- SCHRÖDER R. und H. SCHRÖDER, 1978: Ein Versuch zur Quantifizierung des Trophiegrades von Seen. *Arch. Hydrobiol.* 82, 1/4, 240–262
- SCHULZE, R., 1970: Strahlenklima der Erde. Dr. Dietrich Steinkopff Verlag Darmstadt, 217 S.
- SCHWARTZ, K., 1979: Das Phytoplankton im Mondsee. *Arb. Lab. Weyregg* 5, 110–119
- SEITZ, A., 1977: Die Bedeutung von Umweltfaktoren, Konkurrenz und Räuber-Beute-Beziehungen für die Koexistenz dreier Daphnienarten. Eine Freilandanalyse im Seener Klostersee. Inaug. Diss. d. Fachb. Biol. a. d. LMU München, 161 S.
- SEITZ, G., 1979: Untersuchungen zum Nitrat-, Phosphat- und Silikat-haushalt im Königssee. Dipl.-Arbeit des Fachbereiches Biologie der LMU München, 75 S. + Anhang
- SIEBECK, O., Untersuchungen über die Vertikalwanderung planktischer Crustaceen unter Berücksichtigung der Strahlungsverhältnisse. *Int. Rev. Hydrobiol.* 45, 381–454

- SIEBECK, O., 1975: Vergleichende Limnologische Untersuchungen an vier Baggerseen im Naherholungsgebiet der Landeshauptstadt München. Unpubl. Arbeitsbericht, 120 S.
- SWISS FEDERAL BOARD FOR ENVIRONMENTAL PROTECTION (SFBfEP), 1980, OECD-Eutrophication Programme Regional Project Alpine Lakes, 234 S.
- SMITH, F. E. and E. R. BAYLOR, 1953: Color responses in the Cladocera and their ecological significance. *Amer. Naturalist* 87, 549–555
- STEINBERG, C., 1978: Limnologische Untersuchung des Ammersees. Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft 6, 78 S.
- STREIL, J., C. STEINBERG und T. SCHAUER, 1979: Großer Alpsee bei Immenstadt – Eine Gewässerkundliche Studie – Schriftenr. Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft 11, VIII, 44 S.
- STUMM, W., 1978: Die Beeinträchtigung aquatischer Ökosysteme durch die Zivilisation. *Verh. d. Ges. Deutscher Naturf. u. Ärzte* 109. Vers. 1976, 25–33
- TEROFAL, F., 1977: Das Artenspektrum der Fische Bayerns in den letzten 50 Jahren. *Ber. ANL* 1, 9/22, 2–15
- TILZER, M., 1978: Importance of mixing, thermal stratification and light adaption for phytoplankton productivity in Lake Tahoe (Calif. – Nevada). *Ecol.* 59, 4, 810–821
- TILZER, M., 1979: Limnische Produktionsbiologie. Skript. zur Vorlesung Freiburg und Konstanz, 147 S.
- UHLMANN, D., 1975: Hydrobiologie. Gustav Fischer Verlag Stuttgart, 345 S.
- VALLENTYNE, J. R., 1957: Principles of modern limnology. *Amer. Sci.* 45, 218–244
- VALLENTYNE, J. R., 1974: The algal bowl-lakes and man. *Misc. Spec. Publ. 22, Departm. of the Environment Fisheries and Marine Service Ottawa*, 186 S.
- VOLLENWEIDER, R., 1976: Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 33, 53–83
- VOLLENWEIDER, R., 1968: Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. *OECD Technical Report DAS/CSI/68.27*, 159 S.
- VOLLENWEIDER, R., and P. DILLON, 1974: The application of the phosphorus loading concept to eutrophication research. *NRCC Report Nr. 13960*, 42 S.
- VÖLKL, G., 1977: Markierungsversuch Hagengebirge 1976. Sonderheft „Hagengebirge 1976 – Dokumentation einer Expedition“. *Vereinsmitt. d. Landesvereins f. Höhlenkunde Salzburg*, 46 S.
- VOLLMANN, F., 1914: Flora von Bayern. Verlag E. Ulmer, Stuttgart.
- WETZEL, R. G., 1975: Limnology. W. B. Saunders Comp. Philadelphia London Toronto, 743 S.
- WILHELM, F., 1972: Verbreitung und Entstehung von Seen in den Bayerischen Alpen und im Alpenvorland. *gwf* 113, 9, 393–444
- WOLDSTEDT, P., 1954–1965: Das Eiszeitalter. 3 Bde. Verlag Enke Stuttgart
- ZANKL, H., 1962: Die Geologie der Torrener-Joch-Zone in den Berchtesgadener Alpen. *Z. Dt. Geol. Ges.* 113, 446–462
- ZANKL, H., 1969: Der Hohe Göll. Aufbau und Lebensbild eines Dachsteinkalk-Riffes in der Obertrias der nördlichen Kalkalpen. *Abh. d. Senckenberg. Naturf. Ges.* 519, 123 S.
- ZANKL, H., 1981: Der Watzmann – ein geologischer Überblick. In: *Der Watzmann. Hrsg. Nationalparkverwaltung Berchtesgaden. Rundschau* 2, 9–25
- ZIERL, H., 1981: Nationalpark Berchtesgaden: Geschichte eines Schutzgebietes. *Nationalparkverw. Berchtesgaden (Hrsg.) Rundschau* 1, 131 S.

In der Reihe Forschungsberichte sind erschienen:

Nr. 1 Theoretische Topoklimatologie

Nr. 2 Humus und Humusschwund im Gebirge

Nr. 3 Zur Situation der Greifvögel im Alpenraum

Nr. 4 Theoretische Topoklimatologie – Kartenteil

Nr. 5 Der Königssee – Eine limnologische Projektstudie