

Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern

Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft in Bern

Band: 55 (1998)

Artikel: Sedimentation und Verlandungstendenzen im Inkwilersee

Autor: Binderheim-Bankay, Evi / Volkmann, Holger

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-318602>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 01.02.2026

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

E. BINDERHEIM*

H. VOLKMANN**

Sedimentation und Verlandungstendenzen im Inkwilersee

Inhalt

1. Einleitung und Problemstellung	86
2. Das Untersuchungsgebiet	86
3. Methoden	87
4. Resultate	89
4.1 Sedimentkerne	89
4.2 Sedimentfallen	94
4.3 Kartenvergleich	96
5. Diskussion	98
5.1 Sedimentliefernde Prozesse	98
5.2 Sedimentationsmodell	99
6. Schlussfolgerungen	100
7. Literatur	101

Adresse der Autoren:

* Evi Binderheim-Bankay, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), 8600 Dübendorf.

** Holger Volkmann, Institut für Ingenieurbiologie und Biotechnologie des Abwassers (IBA), Postfach 6980, Universität, D-76128 Karlsruhe.

1. Einleitung und Problemstellung

Seen sind einem langsamen Alterungsprozess durch Verlandung, d.h. durch das allmähliche Auffüllen mit partikulärem Material aus seeinternen (autochthonen) und seeexternen (allochthonen) Quellen, unterworfen. Am Ende dieser natürlichen Sukzession stehen Moore oder Ökosysteme mit terrestrischer Vegetation. Diese natürliche Entwicklung wurde in unserem Jahrhundert durch immer intensivere Nutzung des Menschen stark beschleunigt. Die erhöhte Verlandungsgeschwindigkeit hat bei Kleinseen, welche naturgemäß in der Sukzession weiter fortgeschritten sind als grosse Seen, grössere Auswirkungen und kann zu ihrem schnellen Verschwinden führen. RÖSCH (1983) führte pollenanalytische Untersuchungen am Nussbaumersee (TG) durch und rekonstruierte auf diese Weise die Sedimentationsraten der letzten 13 000 Jahre. Er konnte am Beispiel des Nussbaumersees zeigen, dass die Sedimentationsraten in den letzten hundert Jahren besonders stark angestiegen sind, v.a. seit der Melioration unter dem Plan Wahlen während des Zweiten Weltkrieges. Auch ZINTZ (1986), der verschiedene Seen der Blitzenreuter Seenplatte (Landkreis Ravensburg, Südwürttemberg) untersuchte, weist auf eine starke Verlandung hin. So hat sich beispielsweise die Wasserfläche des Schreckensees in den letzten 75 Jahren (1910–1985) um 37% von 44 Hektaren auf 32 Hektaren verringert. Die Hauptursachen für diese erhöhte Verlandungsgeschwindigkeit der Seen in Mitteleuropa sind zunehmende Eutrophierung, vermehrter Partikeleintritt durch Erosion aus dem Einzugsgebiet und Wasserspiegelabsenkungen.

Die Kenntnis des Sedimentationsverhaltens eines Sees ermöglicht es, die Art und Weise der Verlandung zu beschreiben, die Verlandungsgeschwindigkeit abzuschätzen sowie die dominierenden sedimentliefernden Prozesse zu eruieren und zu quantifizieren. Gestützt auf diese Grundlagen können dann Massnahmen ergriffen werden, die den Verlandsprozess bremsen und somit die Lebensdauer der Seen verlängern. Dies wird am Beispiel des Inkwilersees, im Mittelland an der Kantongrenze zwischen Bern und Solothurn gelegen, aufgezeigt.

2. Das Untersuchungsgebiet

Der Inkwilersee ist ein kleiner polytropher See des schweizerischen Mittellandes ($47^{\circ} 12' \text{ N}$, $7^{\circ} 40' \text{ E}$) mit einer Fläche von 10 ha und einer maximalen Tiefe von 4.9 m (Tab. 1). Er liegt in der Moränenlandschaft von Äschi-Wangen, die vom Rhonegletscher zur Zeit seiner grössten Ausdehnung geschaffen worden ist (VON BÜREN 1949). Nach der Würm-Eiszeit hinterliess der zurückweichende Gletscher Eisblöcke, die Vertiefungen aussparten, in denen sich das abgeschmolzene Wasser über der tonreichen Grundmoräne sammeln konnte. Der Inkwilersee ist einer dieser so entstandenen «Toteisseen». Mit seiner Grösse und Tiefe nimmt er eine Zwischenstellung zwischen Weiher und See ein. Zeitweise ist seine gesamte Tiefe wie bei einem Weiher durchlichtet, eine Schichtung mit echtem Tiefenwasser fehlt. Dennoch lässt sich der Wasserkörper in ein Litoral (durch den Bewuchs von Makrophyten charakterisiert) und ein

Tabelle 1: Morphologische und hydrologische Daten des Inkwilersees (nach MARRER 1994).

Höhe des Wasserspiegels [m ü.M.]	461
Volumen [m ³]	227 210
Oberfläche [ha]	10
mittlere Tiefe [m]	2.2
maximale Tiefe [m]	4.9
Grösse des Einzugsgebietes [km ²]	3.2
mittlere jährliche Abflussmenge [l/s]	36
Erneuerungszeit [d]	73

Pelagial einteilen. Der Röhrichtgürtel ist nur schwach ausgeprägt und fehlt vor allem am Südufer stellenweise völlig. Er erreicht eine maximale Breite von ca. 10 m. Der Schwimmblattgürtel hingegen dominiert das Bild des Litorals. Das Ufer wird von einem schmalen Gehölzstreifen, der überwiegend aus Schwarzerlen und Weiden besteht, gesäumt. Dahinter grenzt direkt landwirtschaftlich intensiv genutzte Fläche an den See, die sich durch Entwässerungen über ehemalige Seefläche und Moorlandschaft ausdehnen konnte.

Der Inkwilersee wurde durch den Menschen stark verändert. Die wohl gravierendsten Eingriffe stellen die Seespiegelabsenkungen von 1818/19, 1891/99 und 1961 um insgesamt über 3 m im Zuge von Trockenlegung und Melioration (SCHWALLER 1991) dar, wodurch die intensive landwirtschaftliche Bewirtschaftung bis fast unmittelbar an das Ufer des Sees vorrücken konnte. Die dadurch erhöhten Nährstoffeinträge kurbeln die Eutrophierung des Inkwilersees immer mehr an.

3. Methoden

Zur Messung der Sedimentation im Inkwilersee wurden zwei Sedimentfallen am 29.8.1995 im Pelagial und vier Sedimentfallen am 4.9.1995 im Litoral exponiert (Abb. 5). Die Fallen bestanden aus 70 cm hohen Plexiglasröhren mit einem Durchmesser von 7 cm. Im Litoral wurden sie an einem Stab so ins Sediment eingesetzt, dass der obere Rand etwa 20 cm über das Sediment herausragte. Im Pelagial wurden sie nach der Methode von BLOESCH & BURNS (1980) aufgehängt. Die Sedimentationsmessungen dauerten bis zum 9.9.1996, wobei die Fallen zweiwöchentlich geleert wurden. Das Material der Sedimentfallen wurde bei 75 °C getrocknet und gewogen.

Vier 17–35 cm lange Sedimentkerne wurden von Hand am 29.8.1995 im Litoral und sechs 60–80 cm lange Sedimentkerne (Durchmesser 6.3 cm) wurden mit Hilfe eines Sedimentlotes (gravity corer) am 22.5.1996 an verschiedenen Stellen im Pelagial genommen (Abb. 2). Die Litoralkerne wurden sofort an Ort und Stelle ausgestossen. Die

Kerne #3 und #6 des Pelagials wurden doppelt genommen und zur Bestimmung des Wassergehaltes an Ort und Stelle ausgestossen. Die übrigen Kerne des Pelagials wurden im Labor der Länge nach aufgeschnitten und fotografiert. Sie wurden zentimeterweise bzw. 5-cm-weise im Tiefenprofil beprobt, und das Material wurde gefriergetrocknet.

3–4 g der gefriergetrockneten Proben des Kernes #3 (tiefste Stelle) wurden eingewogen und zur Datierung mit ^{137}Cs benutzt. ^{137}Cs wurde mittels Gamma-Spektroskopie gemessen. Die Sedimentationsraten wurden gemäss Formel [1] bestimmt. Dabei wurden die Raten F schichtweise mit dem jeweils gemessenen Wassergehalt und der aus der Sedimentzusammensetzung für jede Schicht ermittelten Dichte berechnet, wobei ρ_s (HCl-unlös. Asche bzw. Tonminerale) = 2.65 g/cm³, ρ_s (Karbonate) = 2.7 g/cm³, ρ_s (organische Substanz) = 1.15 g/cm³ (WEAST 1972). Die Kompaktierung des Sedimentes mit der Tiefe wird mit dieser Berechnungsart berücksichtigt.

$$F = (1-\Phi) \cdot \rho_s \cdot R \quad [\text{g/cm}^2\text{a}] \quad [1]$$

wobei:

Φ : Porosität des Sedimentes (berechnet aus Wassergehalt) [%]

ρ_s : Sedimentfeststoffdichte [g/cm³]

R : Sedimentzuwachs [cm/a]

Die Proben der gefriergetrockneten Sedimentkerne und des getrockneten Sedimentfallenmaterials wurden auf die Gehalte an Phosphor, Stickstoff und organischem Kohlenstoff analysiert (Tab. 2). Der Glühverlust (organische Substanz) wurde bei 540 °C bestimmt. Der Anteil an HCl-unlöslicher Asche (mineralische Grundsubstanz) wurde nach Ansäuern des verglühten Sedimentes mit einer 12%-igen Salzsäurelösung und anschliessendem Verglühen bei 800 °C bestimmt.

Tabelle 2: Chemische Analysemethoden.

Parameter	Methoden	Literatur
PN (partikulärer Stickstoff)*	Kolorimetrie nach Filter Aufschluss mit K ₂ SO ₄	EDI (1983)
PP (partikulärer Phosphor)*	Kolorimetrie nach Filter Aufschluss	VOGLER (1965)
POC (partikulärer organischer Kohlenstoff)*	Infrarot-Spektroskopie nach Verbrennung in O ₂ -Atmosphäre	EAWAG-Vorschrift
organische Substanz	Gravimetrie (Glühverlust bei 540 °C)	UNGEMACH (1960)
Karbonate	Gravimetrie (Trockensubstanz – Glühverlust – Glührückstand)	UNGEMACH (1960)
HCl-unlös. Asche	Gravimetrie (Glührückstand bei 800 °C)	UNGEMACH (1960)

* benutzter Filter: Glasfaser GF-C mit einer maximalen Porengröße von ca. 0,7 µm

Mit Hilfe von alten topografischen Karten können Veränderungen durch Auflandung erkannt bzw. quantifiziert werden. Für den Inkwilersee wurden folgende Grundlagen verwendet:

- Lageplan des Inkwilersees mit 24 eingetragenen Lotungen aus VON BÜREN (1951);
- Topografische Karte des Inkwilersees aus MARRER (1994).

Beim Vergleich der zwei Karten wurden zuerst alle Tiefenangaben der alten Karte von 1949 gemäss dem angegebenen mittleren Wasserstand auf die Höhe über Meer umgerechnet. Die Höhen über Meer wurden um die Differenz von 3.26 m (neuer Horizont RPN) korrigiert, da sich der mittlere Wasserstand des Inkwilersees zur Zeit der Vermessung (VON BÜREN 1951) auf den alten Horizont bezieht. Aufgrund der relativ grossen Ungenauigkeit des alten Lageplans wurden beim Vergleich der zwei topografischen Karten die Koordinaten des Zu- und Abflusses als Fixpunkte angenommen. Um die Ungenauigkeiten der alten Karte und die Ablesefehler zu berücksichtigen, wurde ein horizontaler Fehler von 5 mm auf der Karte 1:5000 angenommen. Dies entspricht einem Horizontalfehler von 10 m im Feld, was bei einer Neigung des Seebodens von 1–2.5° einen vertikalen Fehler von 20–50 cm für die Abschätzung der Auflandung ergibt. Der Fehler liegt im Bereich der in VON BÜREN (1951) angegebenen Seespiegelschwankungen von ca. 40–50 cm zur Zeit der Vermessung.

4. Resultate

4.1 Sedimentkerne

Im Sediment des Litorals war unter der Lupe ein hoher Anteil an pflanzlichen Faserresten sichtbar. Sie ähnelten den Fasern von abgestorbenen Stengeln der Teich- und Seerosen. Die aufgeschnittenen Kerne des Pelagials (Abb. 1) zeigen eine homogene Struktur und weisen keine erkennbare lamellierte Schichtung auf, wie dies an Sedimenten grösserer Seen häufig beobachtet wird (NIESSEN & STURM 1987). Die eher dunkle Farbe des Sedimentes deutet auf einen hohen Anteil an organischer Substanz hin. Die Schwarzfärbung röhrt von Sulfidverbindungen her, welche unter anoxischen Bedingungen entstehen und beim Aufschneiden der Kerne einen Geruch nach faulen Eiern verbreiteten. Auswirkungen des seit 1993 in Betrieb genommenen Belüftungsaggregates sind in den Sedimentkernen nicht erkennbar.

Die durchschnittliche chemische Zusammensetzung der Sedimente des Litorals und des Pelagials ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Anteil der Tonmineralien (HCl-unlös. Asche), welche hauptsächlich allochthon eingeschwemmt werden, ist im Sediment des Kernes #5 am höchsten und nimmt mit zunehmendem Abstand vom Einflussbereich der Zuflüsse ab. Die Sedimente des Litorals weisen den geringsten Anteil an Tonmineralien auf, dagegen ist der organische Anteil (34–45% der Trockensubstanz [TS]) im Vergleich zu den Pelagalsedimenten (16–22% der TS) wesentlich höher. Ebenfalls ist das Verhältnis von organischer Substanz zu Tonmineralien im Litoral (1.1–1.4) deutlich höher als im Pelagial (0.4–0.8). Weil die Tonmineralien inert (reaktionsträge)

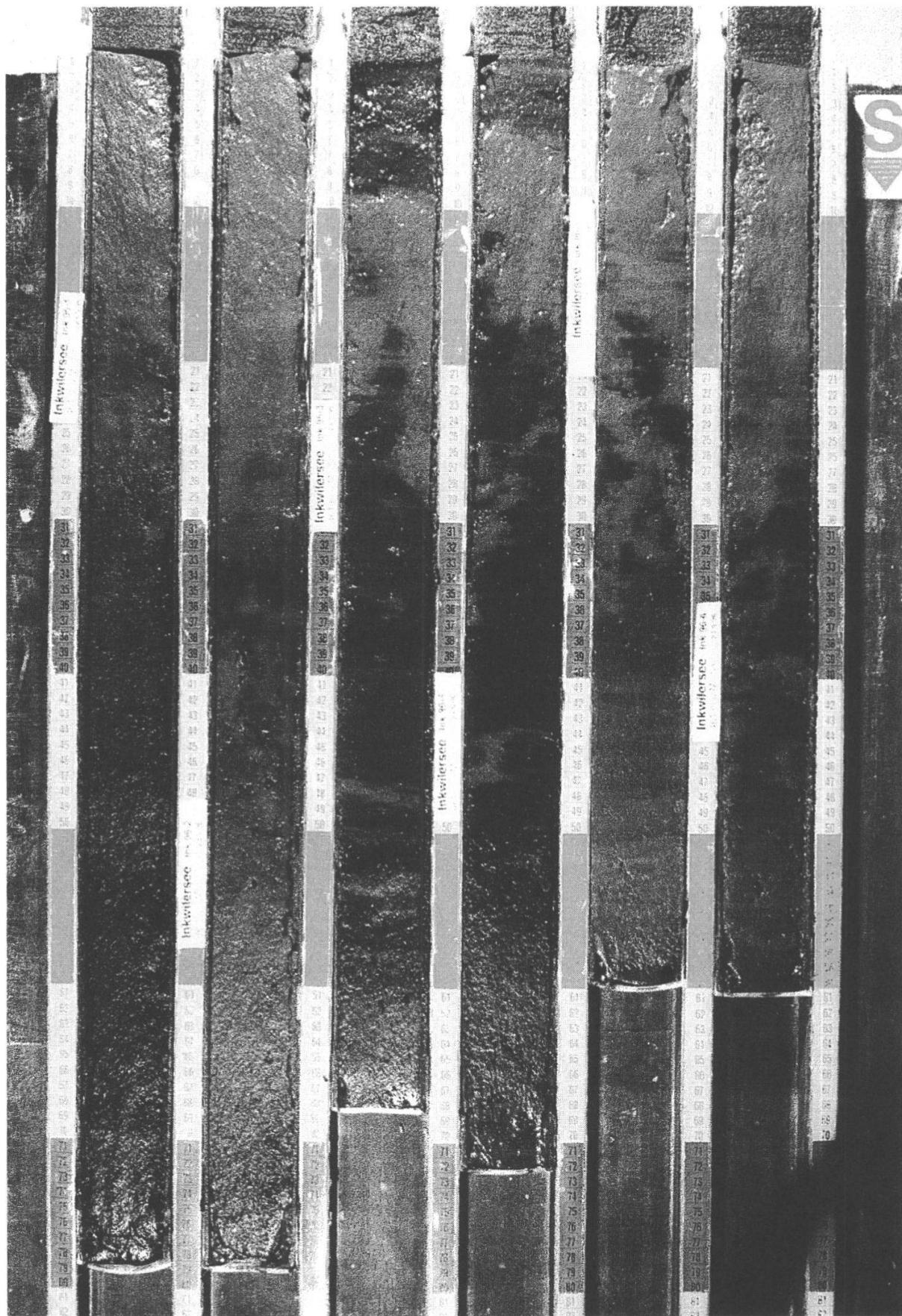


Abbildung 1: Aufgeschnittene Sedimentkerne des Inkwilersees.

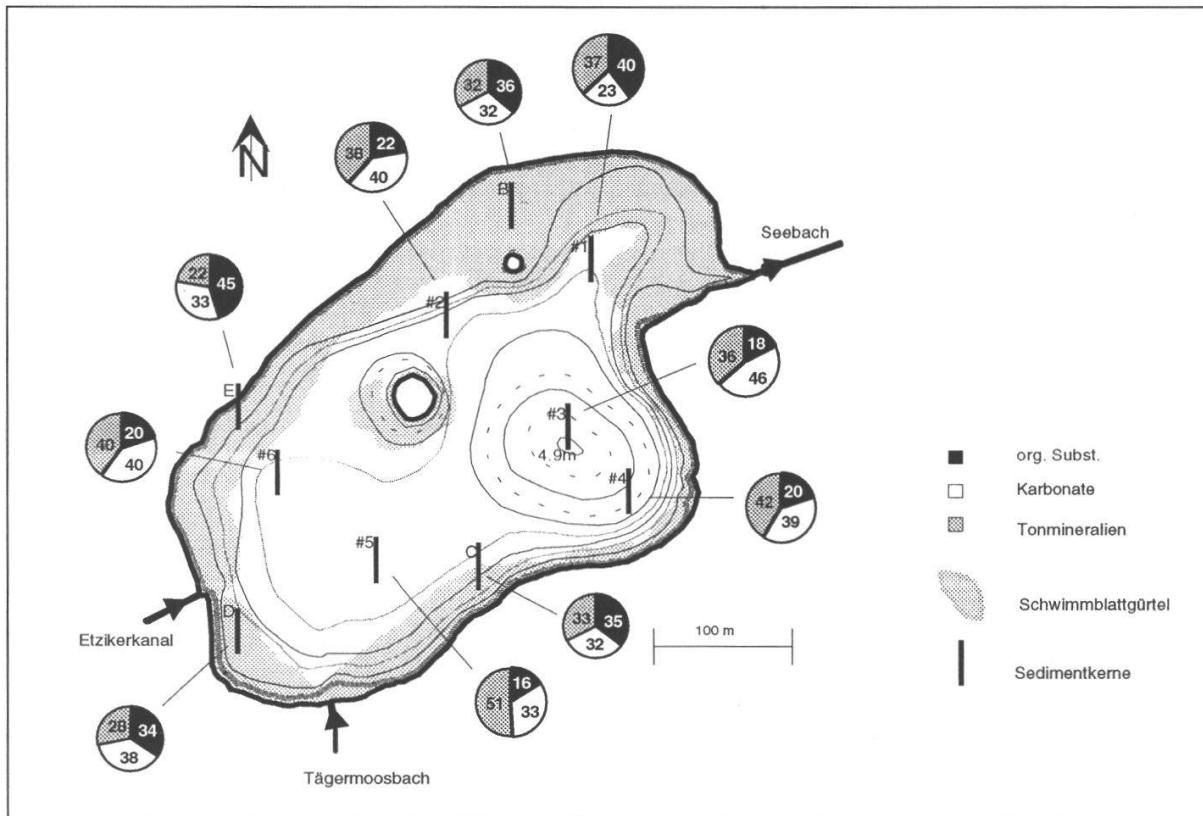


Abbildung 2: Mittlere chemische Zusammensetzung der Sedimente im Inkwilersee.

gegenüber der Diagenese (biologischer Abbau und chemische Umwandlung des Sedimentes) sind, ist dieses im Litoral höhere Verhältnis einerseits auf einen höheren Input von organischem Material durch die Teichrosen zurückzuführen. Andererseits zeigt es, dass die organische Substanz im Pelagial wesentlich besser bzw. schneller abgebaut wird als im Litoral, was durch die unterschiedliche Zusammensetzung des organischen Materials im Litoral und Pelagial erklärt werden kann. Während im Litoral die organische Substanz zu einem grossen Teil aus Teichrosenmaterial besteht, wird das organische Material im Pelagial v.a. durch das Phyto- und Zooplankton gebildet, welches leichter abbaubar ist (KOK 1990; ULÉN 1978).

Die chemische Zusammensetzung im Tiefenprofil der Pelagialkerne zeigt deutliche Einschnitte, welche jedoch in den Litoralkernen nicht ersichtlich waren (Abb. 3). Kern #1 weist einen auffällig hohen Anteil an Tonmineralien in einer Tiefe von ca. 70–75 cm auf (Abb. 3a). Dieser Peak wird auf die Aufschüttung mit Sand und Kies beim Errichten des Badeplatzes am Inkwilersee im Jahre 1955 zurückgeführt. Derselbe Zeitmarker wurde auch in den Tiefenprofilen der POC- und PN-Anteile im Sediment gefunden. Mit diesem Zeitmarker lässt sich somit ein mittlerer Sedimentzuwachs von 1.5–1.8 cm/Jahr schätzen. Ebenfalls auffallend bei Kern #1 ist der Anteil an organischer Substanz, der mit der Tiefe zunimmt (Abb. 3b). Diese Zunahme an organischem Material ist auch in der Abbildung 1 am Übergang von hellerem zu dunklerem Sediment sichtbar. Wahrscheinlich erstreckte sich das Litoral, wo die Sedimentation an organischem Material höher ist als im Pelagial, einmal bis zur Entnahmestelle des Kernes. Auffällig bei den

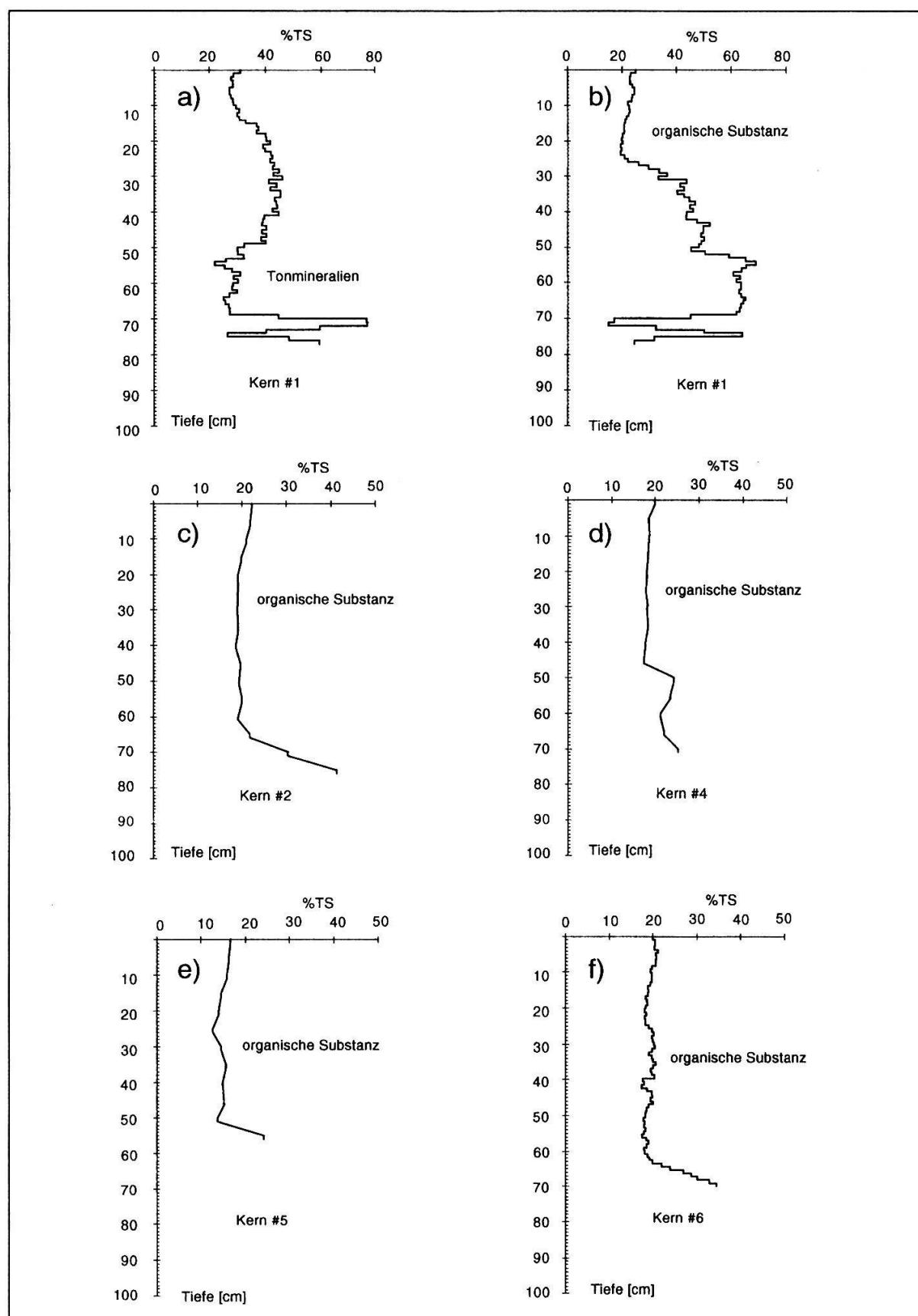


Abbildung 3: Anteil der Tonmineralien im Tiefenprofil des Kernes #1 und Anteil der organischen Substanz im Tiefenprofil der Kerne #2, #4, #5, #6 des Inkwilersees.

Kernen #2, #4, #5, #6 sind die Anstiege der organischen Substanz in einer Sedimenttiefe zwischen 45 und 65 cm (Abb. 3c–3f). Das gleiche Muster zeigten ebenfalls die Anteile an POC und PN. Diese markanten Veränderungen in der Sedimentzusammensetzung könnten auf die Verkleinerung des Einzugsgebietes in den Jahren zwischen 1965 und 1968 zurückgeführt werden. Damals wurde ein Grossteil der Abwässer der angrenzenden Gemeinden in den Seeausfluss umgeleitet (GÄCHTER 1970), womit die Nährstoffbelastung reduziert wurde, was wiederum in der Nährstoffzusammensetzung des Sedimentes sichtbar wird. Benutzt man das Ereignis der Einzugsgebietsverkleinerung für eine Datierung, so lassen sich Sedimentzuwachsrate im Bereich von 1.5–2.2 cm/a bestimmen.

Zur Bestimmung der Jahressedimentationsraten wurde am Kern #3 (tiefste Stelle) eine ^{137}Cs -Datierung vorgenommen. ^{137}Cs ist ein Radioisotop, welches häufig zur Datierung von Sedimentkernen verwendet wird. Atombombentests in den Jahren 1954–1963 und der Reaktorunfall in Tschernobyl 1986 setzten global deutlich messbare Mengen davon frei. Via Atmosphäre gelangte es – adsorbiert an Partikel in der Luft – in die Seen, wo es sedimentierte. Das Maximum erhöhter ^{137}Cs -Ausfällungen durch Atombombentests war 1963 zu messen (ERTEN et al. 1985). Die zwei Peaks der ^{137}Cs -Aktivität im Tiefenprofil von Kern #3 des Inkwilersees lassen die beiden Ereignisse von 1963 und 1986 erkennen (Abb. 4). Auffällig sind die nach einem scharfen Anstieg der ^{137}Cs -Aktivitätskonzentration asymmetrisch über mehrere Zentimeter verlaufenden Peaks. Dieses Muster lässt darauf schliessen, dass nach dem atmosphärischen Eintrag über einen längeren Zeitraum ^{137}Cs aus dem Einzugsgebiet in den See geschwemmt wurde. Die ^{137}Cs -Datierung ergab einen mittleren Sedimentzuwachs von 2.3 cm/a bzw. eine mittlere Sedimentationsrate von ca. $4000 \text{ g}/(\text{m}^2\text{a})$ seit 1986. Der Sedimentzuwachs bzw. die Sedimentationsrate zwischen 1963 und 1986 betrug 1.3 cm/a bzw. $3100 \text{ g}/(\text{m}^2\text{a})$. Die Jahressedimentationsrate hat also seit 1963 um ca. 30% zugenommen, wobei der Anteil der organischen Substanz im Vergleich zu den übrigen Komponenten überproportional war. Dies lässt darauf schliessen, dass die erhöhte Sedimentationsrate nicht nur auf eine Zunahme von eingeschwemmten Parti-

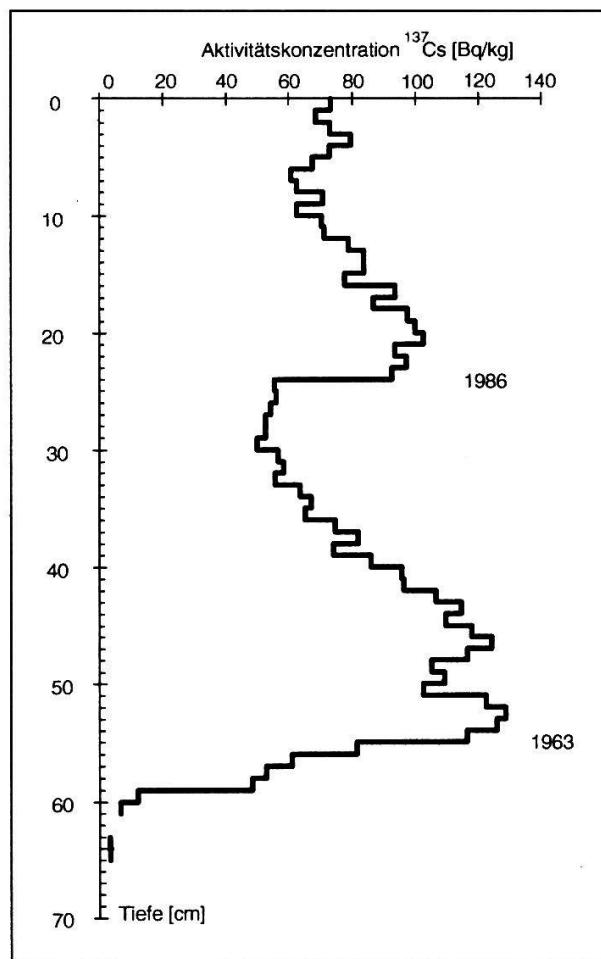


Abbildung 4: Aktivitätskonzentration von ^{137}Cs im Tiefenprofil von Kern #3 des Inkwilersees.

keln durch Erosion aus dem Einzugsgebiet, sondern auch auf weniger fortgeschrittene Abbauprozesse innerhalb des Sedimentes zurückgeführt werden kann.

4.2 Sedimentfallen

Die durchschnittliche chemische Zusammensetzung des Fallenmaterials (Abb. 5) zeigt das gleiche Muster wie diejenige des Sedimentes. Der organische Anteil war im Litoral mit 34–38% der TS deutlich höher als im Pelagial mit 25% der TS. Ebenfalls der Anteil der Tonmineralien lag im Pelagial mit 34–35% der TS höher als im Litoral mit 26–31% der TS. Die Resultate aus den Sedimentfallen zeigen somit ebenfalls einen höheren organischen Eintrag und einen aufgrund der geringeren Aufenthaltszeit der Partikel im Wasser weniger fortgeschrittenen Abbaugrad der organischen Substanz. Die Sedimentation im Litoral wurde offensichtlich von organischen Quellen dominiert.

Die Jahressedimentation betrug im Pelagial 3400–3900 g/(m²a), im Litoral 4900–6300 g/(m²a) (Abb. 5). Die Jahressedimentationsrate im Litoral war demnach höher als diejenige im Freiwasser. Um die Ergebnisse aus den Sedimentfallen mit denen aus dem Kartenvergleich und aus den Sedimentkerndatierungen vergleichbar zu machen, wurden die gemessenen Sedimentationsraten gemäss Formel [1] in Sedimentzuwachsraten umgerechnet. Bei den Berechnungen wurde eine Porosität $\Phi = 93\%$ angenommen, welche der durchschnittlichen Porosität der obersten 24 cm der Sedimentkerne

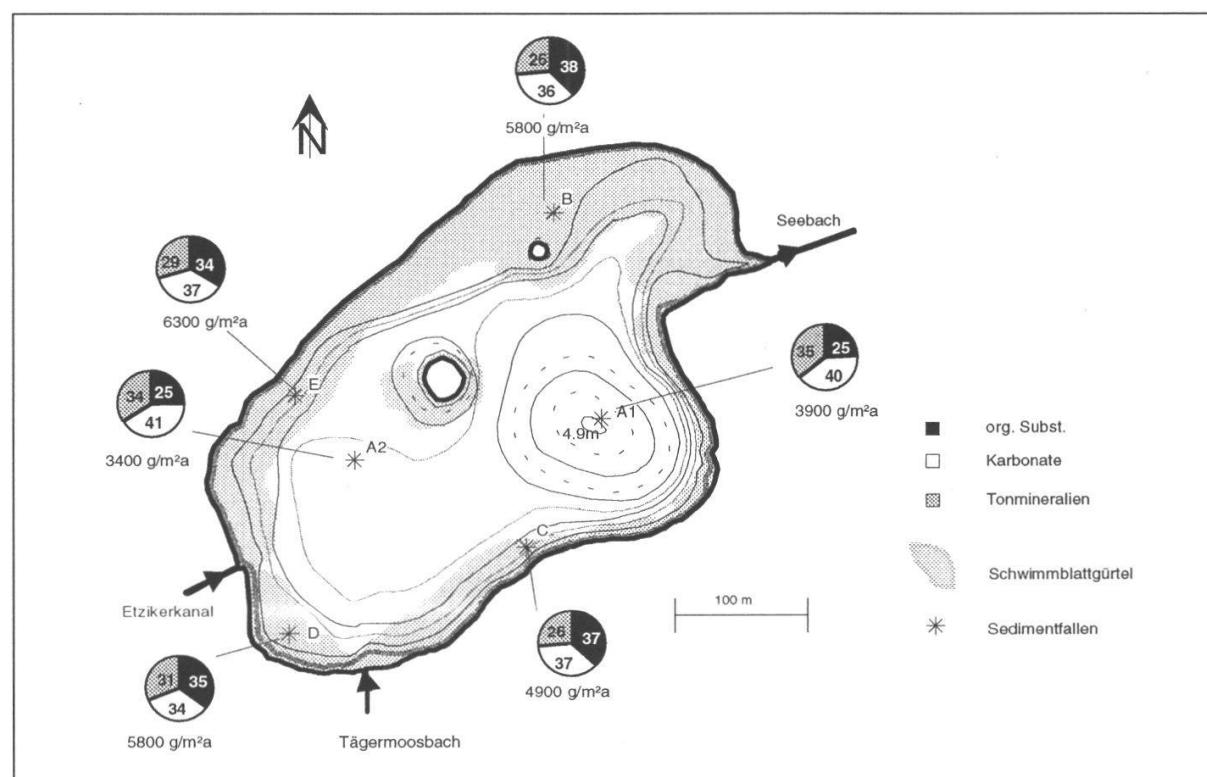


Abbildung 5: Zeitlich gewichtete mittlere chemische Zusammensetzung des Fallenmaterials sowie gemessene Jahressedimentation im Untersuchungszeitraum 1995/96 im Inkwilersee.

entspricht. Weiterhin wurde die Sedimentfeststoffdichte ρ_s aus der durchschnittlichen zeitlich gewichteten Sedimentzusammensetzung des Fallenmaterials berechnet. Dies ergibt einen aus den Sedimentfallen berechneten Sedimentzuwachs von 2.2–2.5 cm/a im Pelagial bzw. 3.1–4.0 cm/a im Litoral. Die Teichrosenbiomasse, welche mit den Fallen nicht oder nur zu einem geringen Teil erfasst wurde und wesentlich zur Auflandung im Litoral beiträgt, wurde gestützt auf die Daten von VOLKMANN (1996) in die Berechnung miteinbezogen. VOLKMANN (1996) gibt den Beitrag an organischer Substanz durch die Teichrosen im Inkwilersee mit 923–1177 g TS/(m²a) an. Dies ergibt mit den obigen Annahmen einen zusätzlichen Sedimentzuwachs von 1.1–1.4 cm/a. Der totale Sedimentzuwachs im Litoral des Inkwilersees kann somit auf 4.2–5.4 cm/a geschätzt werden, wobei dieser nach gemachter Fehlerrechnung mit einem Fehler von 13% behaftet ist (Fehler von $\rho_s = 8\%$; $F = 10\%$; $\Phi = 3\%$).

In der Abbildung 6 sind die Durchschnittswerte der Sedimentationsraten und der chemischen Zusammensetzung des Fallenmaterials während Zeitperioden mit und ohne Vegetation 1995/96 dargestellt. Im Pelagial war eine deutliche Saisonalität bezüglich der sedimentierten Menge wie auch bezüglich der chemischen Zusammensetzung des Fallenmaterials erkennbar, was jedoch nicht zu einer Warvenbildung führte. Die Sedimentationsrate war aufgrund der höheren Biomasseproduktion während der Vegetationsperiode ca. 1.5–2mal höher als im Winter. Die chemische Zusammensetzung wurde während der Vegetationsperiode von den Karbonaten dominiert, die hauptsächlich aus der biogenen Kalzitfällung stammen. Im Winter hingegen überwogen die Tonminerale, was auf eine stärkere allochthone Prägung der Sedimentation hindeutet. Im Litoral hingegen war weder bezüglich der Menge noch bezüglich der chemischen Zusammensetzung des Fallenmaterials eine Saisonalität erkennbar (Abb. 6). Die durchschnittliche Sedimentationsrate lag während der Vegetationsperiode 1995 mit

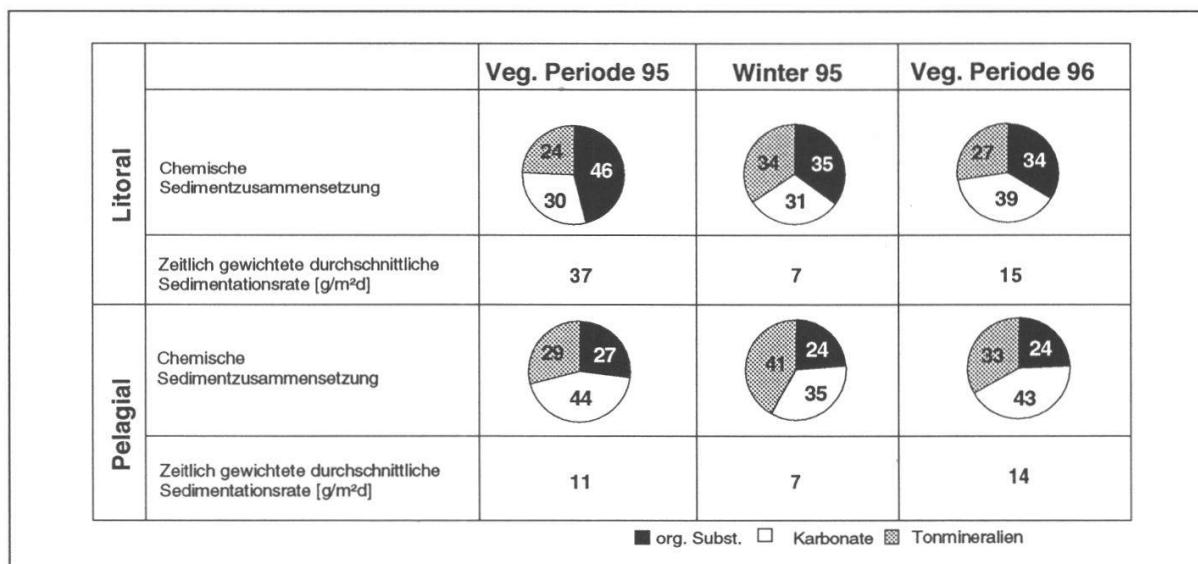


Abbildung 6: Durchschnittliche zeitlich gewichtete Sedimentationsraten und chemische Sedimentzusammensetzung aller Stellen des Litorals und des Pelagiels im Inkwilersee während der Vegetationsperioden 1995 und 1996 sowie im Winter 1995/96.

37 g/(m²d) deutlich höher als während der Vegetationsperiode 1996 mit 15 g/(m²d). Die chemische Zusammensetzung war 1995 deutlich stärker von organischer Substanz geprägt (46% der TS), als dies 1996 der Fall war (34% der TS). Ebenfalls im Jahresverlauf zeigte die sedimentierte Menge eine viel höhere Dynamik im Litoral als im Pelagial (Abb. 8). Dieselbe hohe Dynamik zeigte sich auch in der chemischen Zusammensetzung des Sedimentfallenmaterials im Jahresverlauf. Die Wetterbedingungen in diesen beiden Jahren unterschieden sich stark, was sich auch im Fehlen eines für den Inkwilersee üblichen Fischsterbens zeigte. Der Schluss liegt deshalb nahe, dass die Sensitivität gegenüber veränderten Wetterbedingungen im Litoral offensichtlich höher ist als im Pelagial.

4.3 Kartenvergleich

Ein Vergleich von zwei in verschiedenen Jahren aufgenommenen Tiefenkarten wurde zur Beschreibung der Entwicklung der Topografie des Seebeckens im Zeitraum zwischen den beiden Zeitpunkten der Seevermessung vorgenommen. Damit wurde der Sedimentzuwachs im See grob abgeschätzt. Die Abbildung 7 zeigt, dass die Tiefenabnahmen während der letzten 50 Jahre in der Größenordnung von 0.5–2 m lagen. Zwischen den beiden Inseln und innerhalb des Teichrosengürtels war die Verlandung am grössten. Die Auflandung an der tiefsten Stelle war am geringsten. Ein Trichtereffekt, wie er oft in grösseren Seen beobachtet wird (HILTON et al. 1986), fehlt im Inkwilersee.

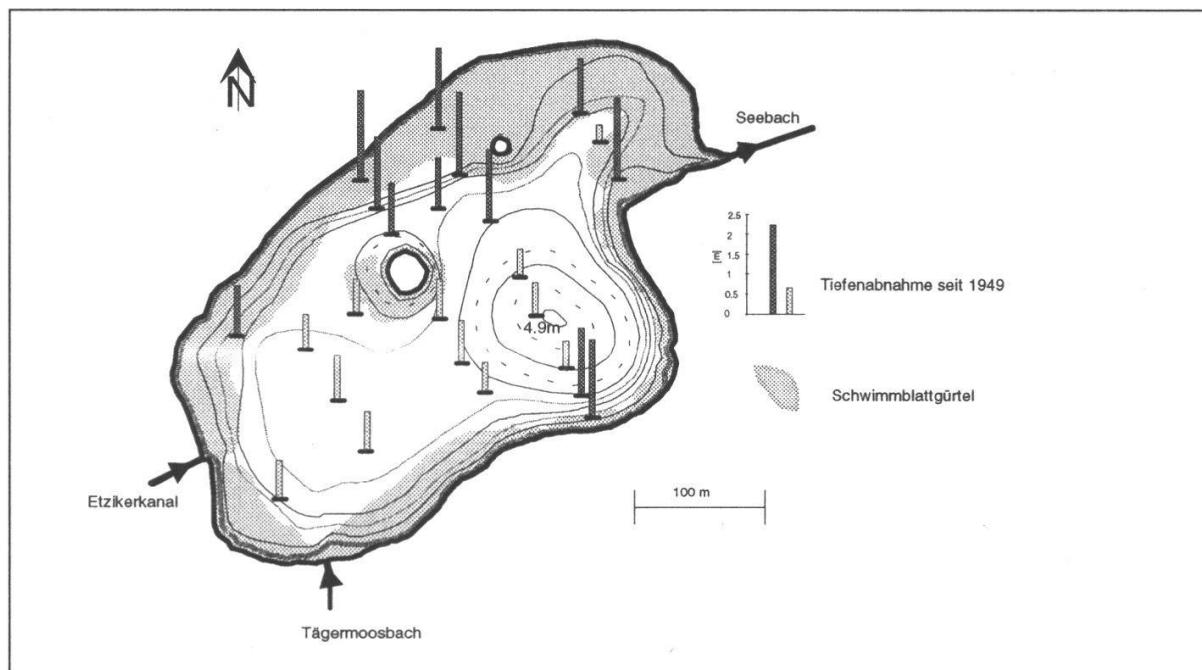


Abbildung 7: Mit dem Kartenvergleich ermittelte Auflandung des Inkwilersees seit 1949. Die dunklen Balken zeigen eine Tiefenabnahme von mehr als einem Meter, die hellen entsprechend von weniger als einem Meter.

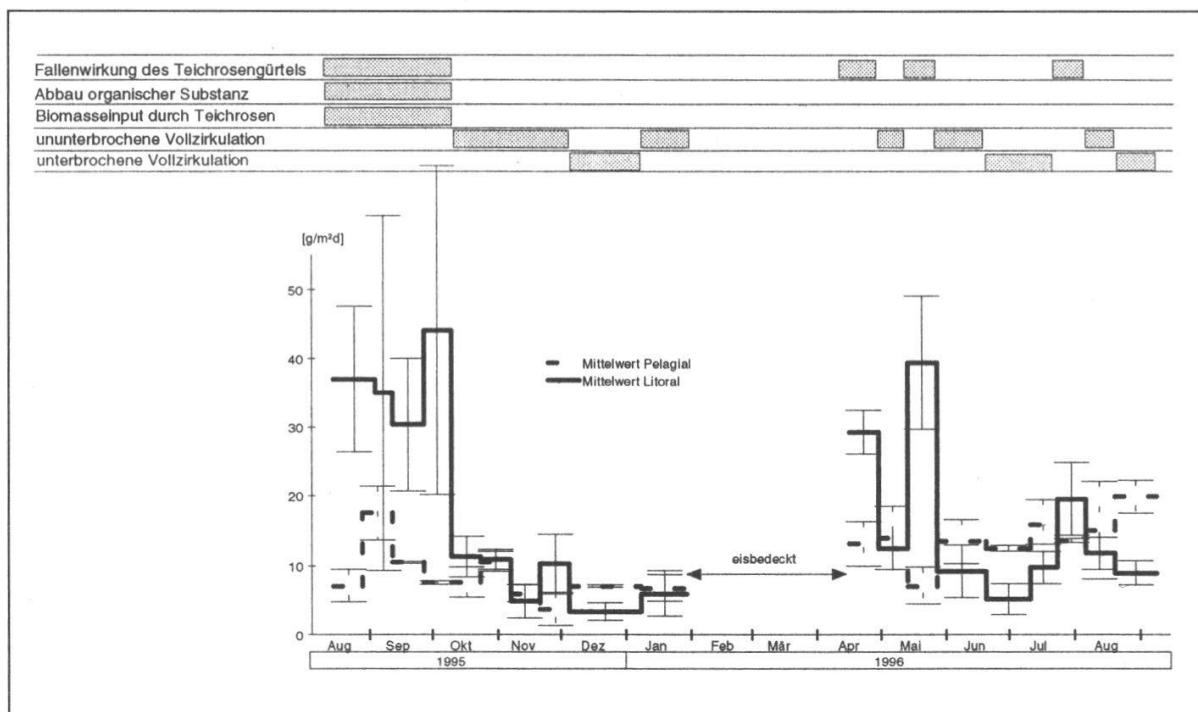


Abbildung 8: Wirksame Sedimentverteilungsmechanismen im Inkwilersee während des Untersuchungszeitraumes 1995/96 sowie durchschnittliche Sedimentationsraten im Pelagial und Litoral im Jahresverlauf.

Die Zusammenfassung der Sedimentations- und Sedimentzuwachsraten in *Tabelle 3* zeigt, dass alle drei angewandten Methoden bezüglich der Beschreibung wie auch bezüglich der Quantifizierung der Verlandung eine gute Übereinstimmung zeigen.

Tabelle 3: Mit verschiedenen Methoden bestimmte Sedimentationsraten und Sedimentzuwachsraten im Inkwilersee.

Methode	Jahressedimentationsraten und Sedimentzuwachs					
	Litoral		Pelagial		Tiefste Stelle (Kern #3)	
	Sedimentations- rate [g/m ² a]	Sediment- zuwachs [cm/a]	Sedimentations- rate [g/m ² a]	Sediment- zuwachs [cm/a]	Sedimentations- rate [g/m ² a]	Sediment- zuwachs [cm/a]
¹³⁷ Cs-Datierung	–	–	–	–	4000	2.3
Tonmineralienpeak	–	–	–	1.5–1.8	–	–
Nährstoffpeak	–	–	–	1.5–2.2	–	–
Sedimentfallen	4900–6300	3.1–4.0	3400–3900	2.2–2.5	3900 (±390)	2.5 (±0.3)
Fallen korrigiert	5800–7500	4.2–5.4	–	–	–	–
Kartenvergleich	–	2.7–5.0	–	0.9–2.6	3900 (±1500)	1.8 (±0.2)

5. Diskussion

5.1 Sedimentliefernde Prozesse

Die Ablagerungen im Inkilersee bestehen aus einem Gemisch von allochthonen und autochthonen Sedimenten, welche zumindest teilweise unterschieden werden können.

Der allochthone Sedimenteintrag findet vorwiegend über Erosion aus dem Einzugsgebiet statt. Dabei werden Klastika (Gesteinstrümmer) mit überwiegend silikatischer Zusammensetzung und detritisches Material in den See verfrachtet. Feinkörnige Partikel können lange im See suspendiert bleiben und so annähernd homogen im gesamten See verteilt werden (NIESSEN & STURM 1987). Die silikatischen Verbindungen verbleiben in der HCl-unlöslichen Asche (UNGEMACH 1960), womit diese den Anteil des allochthon eingetragenen Materials darstellt. Der Anteil der im See produzierten Diatomeenschalen, welcher ebenfalls Bestandteil der HCl-unlöslichen Asche ist, kann im Inkilersee nach grober Schätzung (SUNDER 1994) vernachlässigt werden. Der Inkilersee weist mit durchschnittlich 41% Tonmineralien im Sediment einen im Vergleich zu anderen eutrophen Seen hohen allochthonen Eintrag durch Erosion auf. Beispielsweise beträgt der Tonmineralien-Anteil im Hüttwilersee 20% der TS, im grossen Moossee 32% der TS (BINDERHEIM 1998) und im Rotsee 16% der TS (BLOESCH 1974). Ein weiterer Hinweis für allochthonen Eintrag ist das radioaktive ^{137}Cs , welches beim Reaktorunfall in Tschernobyl 1986 freigesetzt wurde und via atmosphärische Deposition und – adsorbiert an Tonpartikel – via Erosion im Einzugsgebiet in die Seen gelangt ist. Da sich während des Wolkendurchzuges die Radioaktivität je nach Wetterlage sehr unregelmässig abgelagert hat, wird der 24 km entfernt gelegene grosse Moossee als Vergleich hinzugezogen. Die Aktivität des seit 1986 abgelagerten ^{137}Cs beträgt im Sediment des Inkilersees ca. 3000 Bq/m² (zerfallskorrigiert) und ist trotz des kleineren Einzugsgebietes im Vergleich zum grossen Moossee (ca. 900 Bq/m²) viel höher. Dies wie auch die vorgängig erwähnten hohen Anteile an Tonmineralien im Sediment zeigen, dass der Eintrag aus dem Einzugsgebiet im Inkilersee sehr hoch ist, was aufgrund der intensiv betriebenen Landwirtschaft auf einer Fläche von ca. 70% des Einzugsgebietes nicht erstaunt.

Die autochthonen Sedimente bestehen vorwiegend aus im See produziertem organischem Material und aus Kalzit, welches biogen gefällt wird. Der Anteil des Karbonates und der organischen Substanz im Sediment beträgt 55%. Dabei muss jedoch angenommen werden, dass auch allochthones Material in dieser Fraktion vorhanden ist. Der autochthone Anteil der Sedimentation im Inkilersee kann somit auf maximal 55% geschätzt werden. Dieser Anteil ist im Vergleich zu anderen eutrophen Seen wie dem Hüttwilersee, Rotsee oder grossen Moossee, welche einen maximalen relativen autochthonen Anteil von 60–80% aufweisen, gering. Die absolute Menge jedoch liegt mit ca. 2000 g/(m²a) beträchtlich hoch. Dies zeigen auch die im Vergleich zum nahe gelegenen grossen Moossee in der gleichen Grössenordnung liegenden ^{137}Cs -Konzentrationen (ca. 100 Bq/kg) im Sediment des Inkilersees. Die trotz höherer allochthoner Zufuhr geringen ^{137}Cs -Aktivitätskonzentrationen im Sediment des Inkilersees zeigen eine Verdünnung durch hohe (absolute) autochthone Sedimentation.

Im Vergleich zu anderen eutrophen Seen des schweizerischen Mittellandes wie auch im Vergleich zu verschiedenen schwedischen Kleinseen liegt sowohl die Sedimentationsrate als auch die Sedimentzuwachsrate im Inkwilersee am höchsten (Tab. 4). Dies kann einerseits auf die hohe Primärproduktion von ca. 730 g/(m²a) (BINDERHEIM 1998) wie auch auf den bereits erwähnten hohen allochthonen Eintrag durch Erosion auf Ackerflächen aus dem Einzugsgebiet (PRASUHN & BRAUN 1994) zurückgeführt werden.

Tabelle 4: Sedimentations- und Sedimentzuwachsrraten des Inkwilersees im Vergleich zu anderen Seen.

Seen	Fläche [ha]	Maximaltiefe [m]	Sedimentations- rate [g/m ² a]	Sediment- zuwachs ²⁾ [mm/a]	Literatur
Inkwilersee	10	4.9	4000²⁾	23	
Hüttwilersee	35	14.75	2500 ²⁾	8	BINDERHEIM (1998)
Grosser Moossee	31	20	1700 ²⁾	7	BINDERHEIM (1998)
Wilersee	3	21	2100 ²⁾	14	BINDERHEIM (1998)
Rotsee	47	16	1095 ¹⁾ /880 ¹⁾	5	STURM (1985); LOTTER (1988); BOESCH (1974)
Soppensee	20	28	1730 ¹⁾		FISCHER (1996)
Baldegersee	522	66	1210 ²⁾ /1149 ¹⁾	7	LOTTER (1997)
Greifensee	900	32	2190 ¹⁾	4	WEBER (1981)
27 kleine schwedische Seen	4–144	3.2–25.2	62–620 ¹⁾		EVANS & HAKANSON (1992)
Hallwilersee	1020	48	887 ¹⁾		BLOESCH (1986)

¹⁾ Mittels Sedimentfallen gemessen

²⁾ Mittels Sedimentkerndatierung bestimmt

5.2 Sedimentationsmodell

Im Inkwilersee sind die folgenden vorherrschenden Verlandungsmechanismen wirksam:

Im Litoral dominiert die autochthone Sedimentation, was im hohen organischen Anteil des Sedimentes ersichtlich ist. Verantwortlich dafür ist einerseits die Fallenwirkung des Teichrosengürtels, was die deutlich höhere Sedimentation während der Vegetationsperiode zeigt. Dabei wird ein Teil der im See vorhandenen Partikel durch horizontale Strömungen in den strömungsberuhigten Teichrosengürtel verfrachtet, wo diese sedimentieren. Dieses Phänomen der Fallenwirkung des Litorals ist auch in anderen Seen mit ausgeprägtem Makrophytengürtel beobachtet worden (z.B. Neusiedlersee, LÖFFLER [1974]). Andererseits führt auch der aufgrund der unterschiedlichen Sedimentzusammensetzung und des kürzeren Sedimentationsweges geringere organische Abbau dazu, dass die Sedimentation im Litoral stark autochthon und organisch geprägt ist (HILTON 1986).

In der Nähe der Zuflüsse zeigt der hohe Anteil an Tonmineralien im Sediment eine Deltabildung (HILTON 1986). Dieser Einfluss beschränkt sich im Inkwilersee jedoch auf die unmittelbare Nähe der Mündungen.

Mittels Sedimentfallen konnten über kürzere Zeiträume zwei weitere wirksame Sedimentverteilungsmechanismen (ununterbrochene Vollzirkulation und unterbrochene Vollzirkulation) erfasst werden, welche HILTON (1986) in seinem Paper ausführlich diskutiert. Die ununterbrochene Vollzirkulation führt zu einer von der Partikelkonzentration abhängigen Sedimentation. Dabei wird die Menge der Sedimentation nur von der Dicke der strömungsberuhigten Sediment-Wassergrenzschicht bestimmt. Die Sedimentation verläuft im gesamten Seebecken gleichmässig. Der Mechanismus der ununterbrochenen Vollzirkulation war im Inkwilersee vor allem im Winter bei fehlendem Teichrosengürtel wirksam. Die Turbulenzen erfassten das gesamte Wasservolumen gleichmässig, und ruhige Phasen, in denen die Partikel in grösseren Mengen sedimentieren konnten, fehlten weitgehend (ausser bei Eisbedeckung). Während der Vegetationsperiode wurde nur während sehr kurzer Zeiträume gleichmässige Sedimentation gemessen. Anscheinend bewirkten starke Winde eine gleichmässige Verteilung der Partikel in der gesamten Wassersäule, was zu einer gleichmässigen Sedimentation im See führte (Abb. 8). Bei der unterbrochenen Vollzirkulation wechseln sich Zirkulationsphasen und Phasen mit wenig Turbulenzen ab. Die sedimentierende Menge ist proportional zur darüberstehenden Wassersäule. Im Inkwilersee lagen die Sedimentationsraten zeitweise im Winter, wie auch nach starken Windereignissen und nachfolgender Stratifizierung während der Vegetationsperiode, im Pelagial höher als im Litoral. Ein solches Sedimentationsmuster trat immer nur nach vorangegangener gleichmässiger Sedimentation während einer Zirkulationsphase auf, was eindeutig auf den Mechanismus der unterbrochenen Vollzirkulation schliessen lässt (Abb. 8). Andere Sedimentverteilungsmechanismen, welche Sedimentresuspension beinhalten, können im Inkwilersee aus folgenden Gründen weitgehend ausgeschlossen bzw. als vernachlässigbar gering angenommen werden: a) Im Pelagial zeigten die Sedimentationsraten, die mittels Fallen, Kernen und Kartenvergleich ermittelt wurden, gute Übereinstimmung, was bei Resuspensions- und Verfrachtungsprozessen im See nicht gewährleistet wäre. Die aus den Fallen ermittelte Sedimentationsrate wäre in diesem Fall höher als diejenige, welche aus der Sedimentkerndatierung bestimmt wurde. b) Im Litoral verhindern die vorhandenen Teichrosen mit ihrem dreidimensionalen Rhizomgeflecht eine Resuspension des Sedimentes. Der Einfluss des Wellenschlages auf das Litoralsediment wird durch die Teichrosen weitgehend abgebremst. Bäume schirmen Winde weitgehend ab, womit starke Wellen ausbleiben.

Die verschiedenen Sedimentverteilungsmechanismen, welche im Inkwilersee im Jahresverlauf des Untersuchungszeitraumes 1995/96 ermittelt wurden, sind in der Abbildung 8 aufgeführt.

6. Schlussfolgerungen

Um die Verlandung eines Sees möglichst genau qualitativ und quantitativ zu beschreiben, sollten verschiedene Methoden angewandt werden. Mit dem Vergleich von im Abstand von mehreren Jahrzehnten erstellten topografischen Karten lässt sich einer-

seits das Sedimentationsverhalten bzw. die Art der Verlandung aufzeigen. Andererseits kann mit dieser Methode bei genügend hoher Sedimentation der Sedimentzuwachs (in cm/a) abgeschätzt werden, was eine ungefähre Quantifizierung der Verlandung erlaubt, wobei der Wassergehalt des Sedimentes eine wichtige Rolle spielt. Für die Bestimmung der Jahressedimentation eignet sich eine Sedimentdatierung mit Caesium-137 und zusätzlicher Bestimmung des Wassergehaltes bzw. der Porosität und der Sedimentfeststoffdichte. Sedimentationsmessungen mittels Sedimentfallen, welche aufgrund des hohen Aufwandes nur über kurze Zeiträume von ein bis zwei Jahren durchgeführt werden, eignen sich zur Ermittlung von einzelnen, über kurze Zeiträume wirksamen Sedimentverteilungsmechanismen und somit zur Erklärung der Sedimentationsdynamik in einem See. Im Inkwilersee konnten während des Untersuchungszeitraumes fünf wirksame Sedimentverteilungsmechanismen ermittelt werden (Abb. 8).

Die im Vergleich zu anderen Seen sehr hohen Sedimentationsraten im Inkwilersee führen zu seiner schnellen Verlandung. Einige Massnahmen, welche dieser rasanten Verlandung entgegenwirken könnten, werden im Folgenden aufgezeigt: Das Aberten der Teichrosen würde zu einer starken Reduktion der Sedimentation führen, weil einerseits die Teichrosenbiomasse wie auch andererseits die Biomasse der Aufwuchsalgen dem See auf diese Weise entzogen würden. Diese Massnahme würde jedoch eine erhebliche Veränderung in diesem Ökosystem bewirken, da der Makrophytengürtel ca. 40% des gesamten Sees ausmacht. Sinnvoll wäre auf jeden Fall die Reduktion der Nährstoffbelastung zur Verminderung der autochthonen Primärproduktion und somit auch zur Verminderung der Planktonbiomasse im See. Dies könnte mit geeigneten Massnahmen im Einzugsgebiet, wie beispielsweise Reduktion des Düngeraustrages, Extensivierung der Landwirtschaft oder Schaffung von Pufferzonen, erreicht werden. Die Sedimentation im Inkwilersee ist stark allochthon beeinflusst. Erosionsschutzmassnahmen im Einzugsgebiet oder geeignete Vorbecken würden die Verlandung ebenfalls bremsen.

Verdankung. – Wir danken Dr. H. Bührer und Dr. J. Bloesch für die kritische Durchsicht des Manuskriptes.

7. Literatur

- BINDERHEIM-BANKAY E., 1998: Sanierungsziel für natürlich eutrophe Kleinseen des Schweizer Mittellands. Diss., ETH Zürich, in Vorbereitung.
- BLOESCH J., 1974: Sedimentation und Phosphorhaushalt im Vierwaldstättersee (Horwer Bucht) und im Rotsee. Schweiz. Z. f. Hydrol. 36 (1) S. 71–186.
- BLOESCH J., BURNS N. M., 1980: A critical review of sediment trap technique. Schweiz. Z. Hydrol. 42: S. 15–55.
- BLOESCH J., UEHLINGER U., 1986: Horizontal sedimentation differences in a eutrophic Swiss lake. Limnol. Oceanogr. 31 (5) S. 1094–1109.
- BÜREN G. VON, 1951: Der Inkwilersee – eine limnologische Studie. Mitt. der naturf. Ges. Solothurn 16 S. 1–50.

- EIDG. DEPARTEMENT DES INNERN (EDI), 1983: Richtlinien für die Untersuchung von Abwasser und Oberflächenwasser (Allgemeine Hinweise und Analysemethoden), 2. Teil Oberflächenwasser.
- ERTEN H. N., VON GUNten H.R., RÖSSELER E., STURM M., 1985: Dating of sediments from Lake Zurich (Switzerland) with ^{210}Pb and ^{137}Cs . Schweiz. Z. Hydrol. 47, S. 5–11.
- EVANS R. D., HAKANSON L., 1992: Measurement and prediction of sedimentation in small Swedish lakes. Hydrobiologia 235/236: S143–152.
- FISCHER A., 1996: Isotopengeochemische Untersuchungen ($\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$) im Wasser und in den Sedimenten des Soppensees. Diss., UniZ.
- GÄCHTER R., 1970: Bericht über den gegenwärtigen Zustand des Inkwilersees, die getroffenen Sanierungsmaßnahmen und die Belüftung. Dokumentation der EAWAG, Dübendorf zu Handen des Eidg. Amtes für Gewässerschutz, Bern (Auftrag Nr. 4231).
- HILTON J., LISHMAN J.P., ALLEN P.V., 1986: The dominant processes of sediment distribution and focusing in a small, eutrophic, monomictic lake. Limnol. Oceanogr. 31 (1) S. 125–133.
- KOK C. J., VAN DER VELDE G., LANDSBERGEN K. M., 1990: Production, nutrient dynamics and initial decomposition of floating leaves of *Nymphaea alba* L. and *Nuphar lutea* (L.) Sm. (Nymphaeaceae) in alkaline and acid waters. Biogeochemistry 11: 235–250.
- LÖFFLER H., 1974: Der Neusiedlersee – Naturgeschichte eines Steppensees. Verlag Fritz Molden. Wien-München-Zürich.
- LOTTER A. F., STURM M., TERANES J.L., WEHRLI B., 1997: Varve formation since 1885 and high-resolution varve analyses in hypertrophic Baldeggerrsee (Switzerland). Aquatic sciences. Submitted.
- LOTTER A., 1988: Paläökologische und paläolimnologische Studie des Rotsees bei Luzern. Dissertationes Botanicae. Universität Bern 124: S. 1–187.
- MARRER H., 1994: Sanierung und Restauration des Inkwilersees, Auswertung des Belüftungsversuches im Jahre 1993 (Entwurf). BGF (Büro für Gewässer- und Fischereifragen) AG, Solothurn.
- NIESSEN F., STURM M., 1987: Die Sedimente des Baldeggerrsees (Schweiz) – Ablagerungsraum und Eutrophierungsentwicklung während der letzten 100 Jahre. Arch. Hydrobiol. 108 (3) S. 365–383.
- PRASUHN V., BRAUN M., 1994: Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern. Bericht der eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrikultur und Umwelthygiene (FAC Liebefeld).
- RÖSCH M., 1983: Geschichte der Nussbaumerseen und ihrer Umgebung seit dem Ausgang der letzten Eiszeit aufgrund quartärbotanischer, stratigraphischer und sedimentologischer Untersuchungen. Mitt. der Thurg. naturf. Ges. 45: 1–110.
- SCHWALLER T., 1991: Vergleichende faunistisch-ökologische Untersuchungen an den Libellenzönosen zweier Kleinseen im schweizerischen Mittelland. Mitt. Naturf. Ges. Solothurn 35: S. 7–72.
- STURM M., 1985: Schwebstoffe in Seen. Mitteilungen der EAWAG 19: S. 9–15.
- SUNDER F., 1994: Der Inkwilersee – eine ökologische Untersuchung mit den Schwerpunkten Produktion, Sedimentation, Planktodynamik. Diplomarbeit ETH. EAWAG Dübendorf: S. 1–129.
- ULÉN B., 1978: Seston and sediment in Lake Norrviken. II. Decomposition. Schweiz. Z. Hydrol. 40/1, S. 104–118.
- UNGEMACH H., 1960: Sedimentchemismus und seine Beziehung zum Stoffhaushalt in 40 europäischen Seen. Dissertation Universität Kiel. Hydrobiologische Anstalt der Max-Planck-Gesellschaft Plön: S. 1–420.
- VOGLER P., 1965: Beiträge zur Phosphatanalytik in der Limnologie. II. Die Bestimmung des gelösten Orthophosphates. Fortschr. Wasserchem. Grenzgeb. 2: S. 109–119.
- VOLKMANN H. 1996: Die Bedeutung des Schwimmblattgürtels für den Verlandungsprozess des Inkwilersees. Diplomarbeit Universität Freiburg (im Breisgau). EAWAG: S. 1–54.
- WEAST R., C., 1972: Handbook of Chemistry and Physics. 53rd edition. 1972–1979. The Chemical Rubber Co.
- WEBER H., 1981: Sedimentologische und geochemische Untersuchungen im Greifensee, ETHZ, Diss., Switzerland.
- ZINTZ K., 1986: Fischereiliche Nutzung von Stillgewässern in Naturschutzgebieten. Dissertation. Universität Hohenheim: 1–531.