Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae
Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft
Band: 73 (1980)
Heft: 3

Artikel: Die Entwicklung des Linthdeltas im Walensee zwischen 1931 und 1979
Autor: Lambert, André
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-164994

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: 11.07.2025

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

Eclogae geol. Helv.	Vol. 73/3	Seiten 867-880	9 Textfiguren, 1 Tabelle und 1 Tafel	Basel, November 1980

Die Entwicklung des Linthdeltas im Walensee zwischen 1931 und 1979

Von ANDRÉ LAMBERT[1])

«Je ne pense pas qu'il existe beaucoup d'autres questions où l'on doive se méfier des chiffres que dans celle qui nous occupe.»
Prof. L.-W. Collet: Le charriage des alluvions (1916).

ZUSAMMENFASSUNG

Im Juni 1979 nahm man im westlichen Teil des Walensee-Beckens 475 ha topographisch neu auf, um die *Veränderungen des Seegrundes* seit der letzten Vermessung (1931) - namentlich im Bereich des Linthdeltas - zu kartieren und volumetrisch abzuschätzen.

Aus dem Ablagerungsvolumen von rund $6{,}5 \times 10^6$ m³ resultiert ein jährlicher *Abtrag des Einzugsgebietes* von durchschnittlich 0,23 mm, was gegenüber der früheren Vergleichsperiode (1911-1931: 0,17 mm/Jahr, JÄCKLI 1958) auf eine intensivierte Erosion hindeutet, offenbar als Folge starker Hochwasserereignisse.

Die Kartierung der Auflandungsmächtigkeiten zeigt, dass die *subaquatische Rinne* im Linthdelta eine ablagerungsfreie Zone (wenigstens seit 1931) darstellt, was auf die Spülwirkung grundberührender Trübeströme der Glarner Linth bei Hochwasser zurückzuführen ist.

ABSTRACT

In June 1979 the bed of the western part of the Walensee (475 ha) was investigated by means of a modern hydrographic survey system in order to map *topographic alterations*, especially in the delta of the Linth river, taking place since the last survey (1931).

An estimation of the sediment volume deposited during this period yielded about 6.5×10^6 m³, thus implying an average annual *lowering of the catchment area* by 0.23 mm. Compared with an earlier investigation (1911-1931: 0.17 mm/y, JÄCKLI 1958) this indicates increased erosion, probably as a result of unusual floods.

The map of sediment thickness yields evidence that the *subaqueous channel* in the delta of the Linth is a zone of nondeposition (at least since 1931), probably due to outwash by flood-induced turbid underflows of the tributary.

1. Einleitung

Die Notwendigkeit periodisch wiederholter Flussdelta-Vermessungen in Seen ist im 19. Jahrhundert aus der wasserbaulichen Praxis heraus erkannt worden: Deltas sind heikle Gebilde, die empfindlich auf äussere Eingriffe wie Baggerungen, Dammbauten usw. reagieren. Zu tief schürfende Baggerungen können zu einer unerwünschten rückschreitenden Erosion führen. Anderseits müssen Entwicklungs-

[1]) Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich.

stand und voraussichtliches Wachstum eines Deltas bei der Beurteilung von Schutzmassnahmen gegen Verlandungserscheinungen und Hochwasser in Flussmündungsgebieten berücksichtigt werden, weil ein wachsendes Delta den Flusslauf verlängert, dadurch dessen Sohle hebt und damit ein Ausufern des Flusses begünstigt. Die Entscheidung, ob überhaupt und wenn ja, wieviel gebaggert werden darf oder muss, setzt eine möglichst genaue Kenntnis des Entstehungsprozesses und der zu erwartenden Entwicklung des Deltas voraus.

Einer der wichtigsten Gründe, weshalb Deltas vermessen werden (sollten), ist jedoch der, dass die Volumenzunahme eines Geschiebeschuttfächers als zuverlässiges Mass für den langzeitlichen Feststofftransport im entsprechenden Flußsystem herangezogen werden kann. Dieser Gesichtspunkt interessiert den Geologen direkt, weil ihm dadurch die Möglichkeit offen steht, den fluviatilen Abtransport fester Substanz aus dem Einzugsgebiet und damit einen der wichtigsten Teilprozesse des Erosionsvorganges zahlenmässig abzuschätzen (JÄCKLI 1958).

Mit Ausnahme des Rheindeltas im Bodensee gehört das Linthdelta im Walensee als künstlicher (durch Umleitung eines Flusses entstandener) Schuttfächer zu den bestuntersuchten Flussdeltas im schweizerischen Einzugsgebiet. Bis und mit der letzten Seegrundaufnahme von 1931 wurde für die Tiefenmessungen jedoch ausschliesslich mit Drahtpeilungen gearbeitet. Eine Neuaufnahme des Linthdeltas mit modernen Messtechniken drängte sich auf; die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) beauftragte deshalb ein spezialisiertes Unternehmen mit dieser Aufgabe im Rahmen eines von der ETH Zürich finanzierten Forschungsprojektes mit folgenden Hauptzielsetzungen:

— Topographische Aufnahme des westlichen Walenseegrundes bis Koordinate 730.000;
— Bestimmung der Sohlenveränderung anhand der Originalpläne der letzten Aufnahme (1931) bis Koordinate 728.600;
— Vergleich des Deltawachstums von 1931 bis 1979 mit demjenigen von 1911 bis 1931;
— Versuch einer Quantifizierung der Erosion im Einzugsgebiet; Anwendung des Abtragsgesetzes von JÄCKLI (1958);
— Kartierung subaquatischer Rinnen; Deutungsversuch durch Vergleich mit bisherigen Kenntnissen über Trübeströme im Linthdelta.

2. Die bisherigen Aufnahmen des Linthdeltas

Als erste Phase des «Linthwerkes» wurde die Glarner Linth 1811 durch den Molliser Kanal (heute Escherkanal) in den Walensee geleitet, wo sie seither den grössten Teil ihrer Feststoff-Fracht ablagert.

Schon 1849 war das Interesse an der Entwicklung des neuen Geschiebeschuttkegels so gross, dass in der Verlängerung des Escherkanals ein etwa 500 m langes Profil ausgelotet wurde (Fig. 1).

1860 nahm der Zürcher Ingenieur A. Bürkli im Auftrag der Eidg. Linthkommission 16 Profile des Linthdeltas auf und erstellte einen Kurvenplan; zwei Hauptprofile dieser Aufnahme wurden im Jahre 1867 nochmals aufgenommen (Fig. 1).

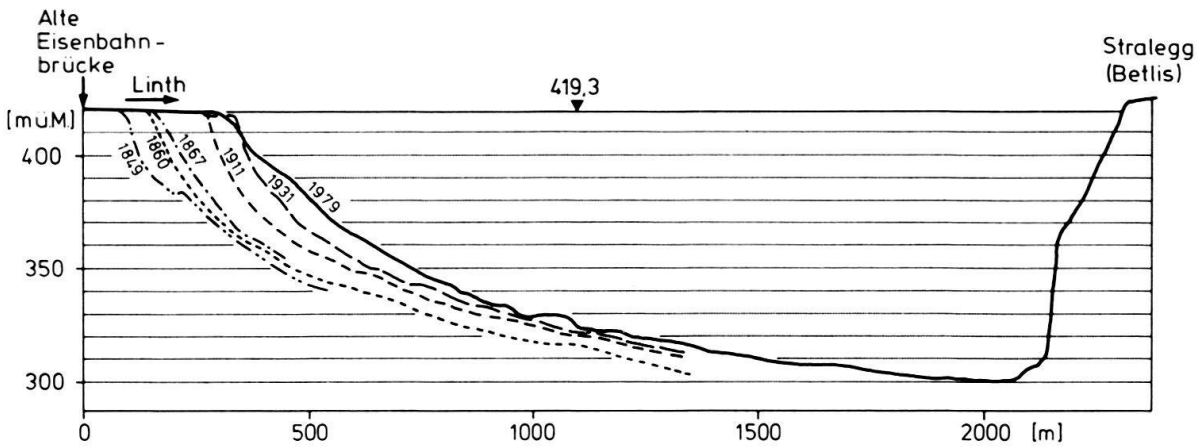


Fig. 1. Wachstumsstadien des Linthdeltas von 1849 bis 1979 im Seequerschnitt Linthmündung-Betlis (Profilspur siehe Fig. 6).

Auf Anregung von Albert Heim und mit Unterstützung der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft wird erst 1910 eine Neuvermessung in Angriff genommen, welche nicht nur das Linthdelta, sondern das gesamte untere Seebecken westlich der Filzbachmündung umfassen sollte. Die Vermessungsarbeiten, die bis zum Frühjahr 1911 dauerten, standen unter der Leitung von W. Stumpf von der Landeshydrographie. Auf 2,83 km² wurden jeweils entlang einem quer über den See gespannten Draht im Abstand von 50 m insgesamt 55 Nord-Süd-Profile aufgenommen. Bei einem Abstand von 5 oder 10 m auf jedem Profil ergab sich die stattliche Zahl von 9640 Einzellotungen (durchschnittlich 34,1/ha), als Grundlage einer Karte mit 1-m-Höhenkurven, die den Genauigkeitsansprüchen für eine künftige Volumenbestimmung genügen konnte (COLLET & STUMPF 1916).

20 Jahre danach wird dieselbe Fläche vom Eidg. Amt für Wasserwirtschaft mit finanzieller Beteiligung der Kantone St. Gallen und Glarus nach der gleichen Methode erneut vermessen. Die Punktdichte war mit insgesamt 7185 (25,2 Lotungen/ha) etwas kleiner als 1910/11, aber man hatte aufgrund dieser vorhergehenden Aufnahme die Punktdichte dem zu erwartenden Relief angepasst. Unter Berücksichtigung der Baggerungen im Deltagebiet (106885 m³) ergab sich für die vermessene Seefläche von 1911 bis 1931 ein Zuwachs von 2400000 m³, was einer mittleren jährlichen Ablagerung von 114300 m³ entspricht. Die Autoren der 1939 erschienenen Mitteilung (Nr. 34) hatten jedoch bereits festgestellt, dass sich die Ablagerungen «weit über das ‹alte› Aufnahmegebiet von 1860, sogar noch über das ‹neue› von 1911 und 1931 hinaus» erstrecken. Albert Heim hatte also die Situation klar erkannt, als er für die 1910er Aufnahme das Gebiet bis mindestens auf die Höhe des Sallerentobels ausdehnen wollte, was jedoch aus technischen und finanziellen Erwägungen unterblieb. Die ausserhalb des Aufnahmegebietes liegende Geschiebemenge wurde in Anlehnung an eine Untersuchung des Aaredeltas im Bielersee auf 10% der Gesamtablagerung, also rund 240000 m³ oder 11400 m³ pro Jahr, abgeschätzt. Dieser Wert kann allein aufgrund der unterschiedlichen Einzugsgebiete, Gefälls- und Abflussverhältnisse nicht befriedigen. Deshalb stand die Ausdehnung des für die vorliegende Arbeit aufzunehmenden See-Areals bis zur Koordinate 730.000 an erster Stelle unserer Zielsetzung.

3. Die Neuvermessung des Linthdeltas im Juni 1979

Das Aufnahmeverfahren

Das vom Ingenieurbüro Dr. Schlund (Zürich) entwickelte hydrographische Vermessungssystem «Explorer» beruht auf der Bestimmung digitaler Geländemodelle, welche analog den Methoden der numerischen Photogrammetrie mit einem adaptierten Satz von Computerprogrammen ausgewertet werden (Fig. 2).

Mit 475 ha umfasst der neu vermessene Teil etwa $\frac{1}{5}$ der gesamten Seefläche (2423 ha) und damit rund 200 ha mehr als die Aufnahme von 1931. Die Originalkarten liegen als masshaltige Cronaflexfolien im Maßstab 1:2000 (wie die 1931er Aufnahme) vor; Figur 6 zeigt einen Ausschnitt der neuen Seekarte im Maßstab 1:10000.

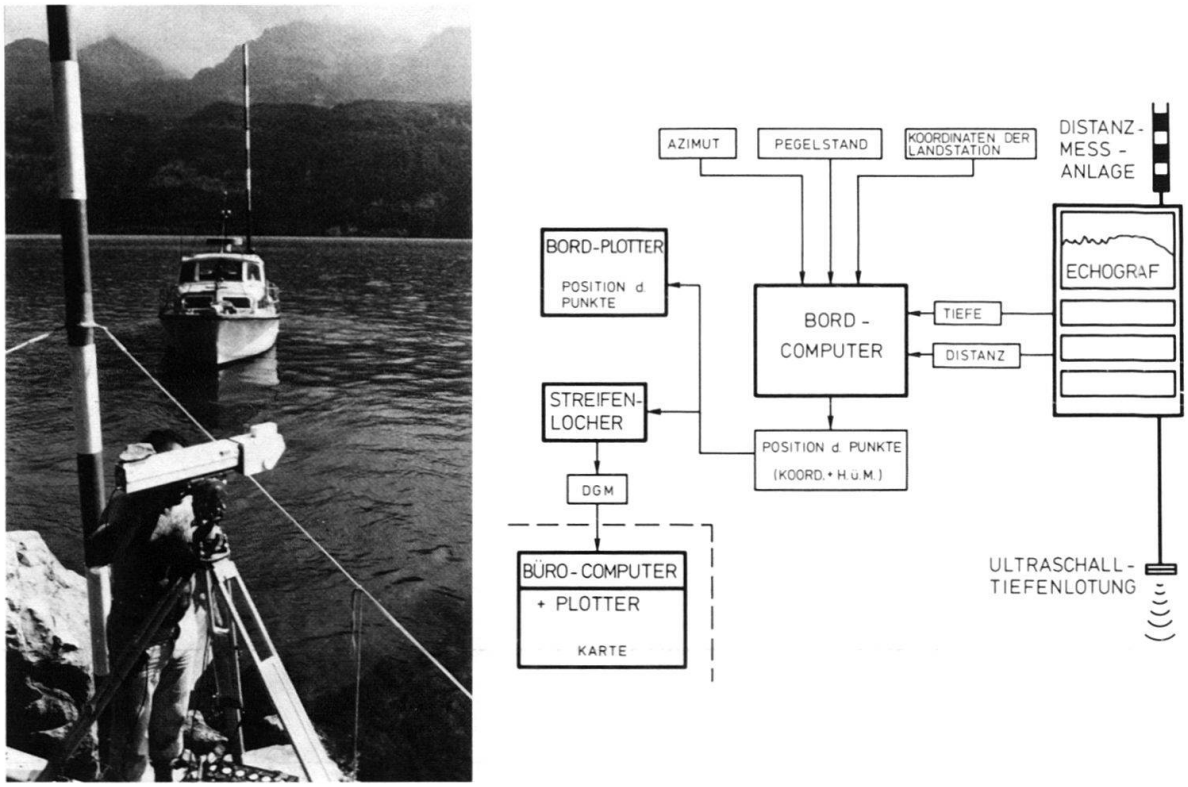


Fig. 2. Hydrographisches Vermessungssystem «Explorer» für polare Seegrundaufnahmen (Methode Dr. Schlund).

Bild links: Von einer Landstation aus werden fächerförmig Echolot-Profile aufgenommen, wobei Azimut und Länge der einzelnen Linien entsprechend der gewünschten Dichte des Geländemodells im voraus berechnet sind. Das Azimut wird an einem Theodoliten mit aufgesetzter Laser-«Kanone» eingestellt und durch deren Strahl markiert. Die Distanz zwischen der Antenne der Landstation und derjenigen des Schiffs (welche genau über den Echolot-Schwingern steht) wird kontinuierlich mit Radiowellen gemessen. Dabei entstehen im Echographen maßstabsgetreue Profile, weil der Papiervorschub mit der Distanzbestimmung gekoppelt ist.

Bild rechts: In vorausbestimmten Abständen werden digitale Tiefenwerte und die entsprechenden Distanzen automatisch in den Bordcomputer eingespiesen, welcher aus diesen Werten sowie den Koordinaten der Landstation, dem Azimut der Messlinie und dem aktuellen Wasserstand die Landeskoordinaten der Punkte des digitalen Geländemodells (DGM) berechnet. Auf Lochstreifen gespeichert, stehen diese Daten für die weitere Verarbeitung, d.h. Interpolation und Aufzeichnung der Höhenkurven, im Büro zur Verfügung.

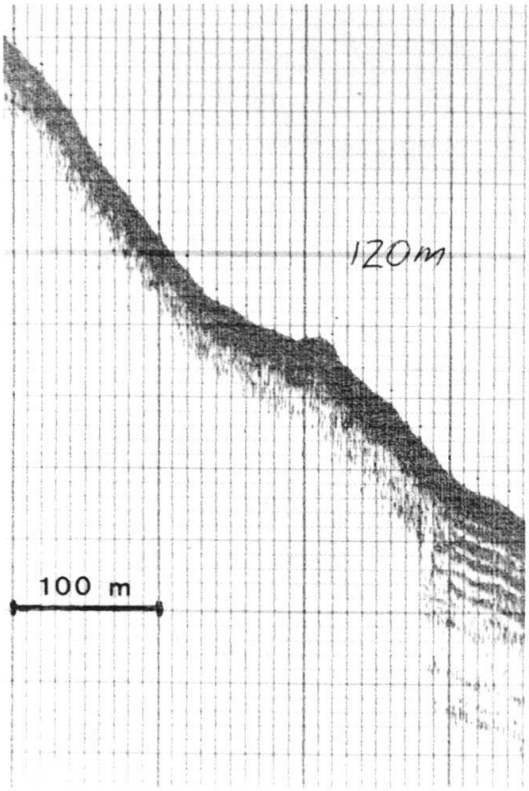


Fig. 3. Echogramm des Überganges vom Delta zur zentralen See-Ebene mit entsprechend zunehmender Eindringtiefe des Schalls.

Das verwendete Echolot arbeitet mit zwei Frequenzen: 210 kHz und 33 kHz, wobei erstere bereits von wasserhaltigem Schlamm reflektiert wird, während letztere je nach Konsistenz der Ablagerungen bis 15 m in die Sedimente eindringen kann, so dass auch die Mächtigkeit der Schlammschicht und allfällige Sedimentstrukturen erfasst werden können. Im Gegensatz zu den «pelagischen» Sedimenten der zentralen See-Ebene war im Bereich der Deltaschüttung infolge der grobkörnigen Ablagerungen die Eindringtiefe gering, was die Abgrenzung des Deltas bereits auf dem Echogramm ermöglichte (Fig. 3).

4. Vergleich der Seegrundaufnahmen von 1931 und 1979

Zwei ausgewählte Profile (Fig. 1 und 4) zeigen die Änderung des Seegrundes zwischen 1931 und 1979 in zwei Querschnitten.

Die flächenmässigen Veränderungen der Seetopographie im gleichen Zeitraum wurden mit Hilfe von Linien gleicher Höhenänderung (Isallohypsen) dargestellt und im Maßstab 1:5000 kartiert (Tafel).

In diesem Plan kommt die Verteilung der Ablagerungen deutlich zum Ausdruck, namentlich die Schuttkegel der Linth und - wesentlich bescheidener - des Flibaches. In den deltafernen Gebieten, wo erwartungsgemäss mit niedrigen Sedimentationsraten zu rechnen ist, sind auch die geringsten Höhenänderungen zu verzeichnen. Negative Werte lassen sich grösstenteils auf Baggerungen zurückführen; nach Angaben der Eidg. Linthverwaltung beläuft sich das Baggergut in der Vergleichsperiode auf über 1 Mio. m^3 (vgl. Tabelle).

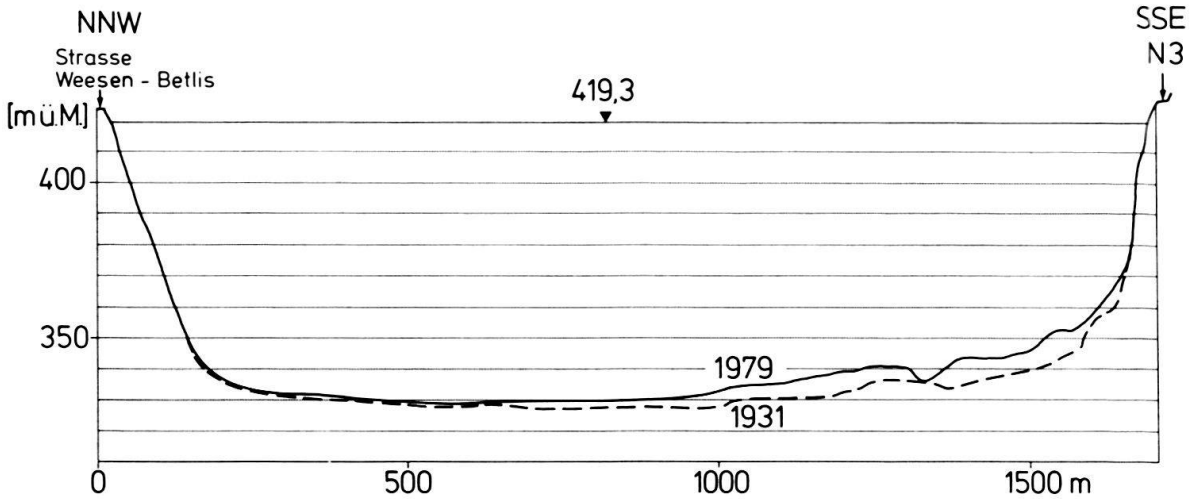


Fig. 4. Änderung des Seegrundes zwischen 1931 und 1979 im Bereich des Linthdeltas (Profilspur siehe Fig. 6).

Der Vergleich der beiden Seegrundaufnahmen führt also generell zu einem vernünftigen Bild. In den steilen Randzonen treten jedoch grössere Unterschiede auf, die sich zweifelsfrei auf Messfehler zurückführen lassen, weil selbst bei anstehendem Fels erhebliche Differenzen zu verzeichnen sind; deshalb ist in diesen Randgebieten von einer Darstellung der Isallohypsen abgesehen worden.

Hier zeigen sich die Tücken der hydrographischen Vermessung bei steilem Untergrund: Ein kleiner Fehler in der auf See immer heiklen Positionsbestimmung kann bereits mehrere Meter Fehler in der Tiefenmessung hervorrufen. Bei der Peilung mit Draht und Gewicht kommt hinzu, dass das Lot durch Strömungen aus der Vertikalen gelenkt werden und zudem an Felswänden abrutschen kann.

Hake & Lehn (1974) konnten durch Vergleich von ebenfalls mit Drahtlot erarbeiteten Seegrundaufnahmen des Bodensees feststellen, dass der mittlere Fehler m_h von Höhenkurven in einem Bereich liegt, der sich nach der Beziehung

$$m_h = \pm (0{,}7 + 25 \tan \alpha)$$

in Funktion der Hangneigung α abschätzen lässt. Während für die 1931er Aufnahme des Linthdeltas mit einem Fehler in der gleichen Grössenordnung gerechnet werden muss, konnte mit der 1979er Aufnahme nachweisbar eine höhere Präzision erreicht werden, indem die Reproduzierbarkeit der nach dem Schlundschen Aufnahmeverfahren ermittelten Höhenkurven an Ort und Stelle einer Prüfung unterzogen wurde: Im Gebiet der Salleren waren 1976 bereits 5 ha im Auftrag einer Privatfirma vermessen worden. Die Übereinstimmung der Höhenkurven gerade im steilsten Gebiet des 1979er Aufnahmesektors darf als gut bezeichnet werden, und der mittlere Fehler m_h in Funktion der Hangneigung α erreicht die Toleranzen der Grundbuchvermessung, d.h.

$$m_h = \pm (0{,}3 + 1{,}5 \tan \alpha).$$

Die Fehler liegen demnach in erster Linie bei der Kartierung von 1931, was in Anbetracht der damals zur Verfügung stehenden Mittel nicht überraschen darf und in keiner Weise den Wert der in dieser Zeit geleisteten Arbeit schmälert.

5. Das Ablagerungsvolumen westlich der Koordinate 728.600 (Filzbach/Muslenbach) von 1931 bis 1979

Vergegenwärtigt man sich die Grössenordnung der Vermessungsfehler *beider* Aufnahmen, dann rücken auch berechnete Differenzkubaturen ins rechte Licht: Angaben auf 10000 oder gar 1000 m^3 genau, wie sie in der Literatur zuweilen vorkommen, täuschen eine auch mit modernen Messmethoden kaum erreichbare Präzision vor. Für die Werte der Tabelle, in der die Differenzkubaturen für die Vergleichsperioden 1911-1931 und 1931-1979 einander gegenübergestellt sind, ist deshalb mit Fehlern in der Grössenordnung von ± 5 bis 10% zu rechnen.

Tabelle: *Volumenzunahme des Linthdeltas im Walensee für die Vergleichsperioden 1911-1931 und 1931-1979.*

	1911-1931	1931-1979
Gemessene Volumenzunahme	$2{,}3 \times 10^6$ m^3	$5{,}3 \times 10^6$ m^3
Baggergut	$0{,}1 \times 10^6$ m^3	$1{,}1 \times 10^6$ m^3
Total	$2{,}4 \times 10^6$ m^3	$6{,}4 \times 10^6$ m^3
Durchschnittliche jährliche Zunahme	$0{,}12 \times 10^6$ m^3	$0{,}13 \times 10^6$ m^3

Gegenüber der Vergleichsperiode 1911-1931 ist die jahresdurchschnittliche Ablagerungsrate von 1931 bis 1979 eine Spur höher, obschon aufgrund der verstärkten Verbauungsaktivität im Einzugsgebiet eher eine Abnahme zu erwarten war. Die Gründe dafür liegen möglicherweise in den unterschiedlichen Hochwasser-Häufigkeiten im Einzugsgebiet der Glarner Linth: Während das Hochwasser von 1922 als einzig nennenswertes in die Vergleichsperiode 1911-1931 fällt, ereigneten sich zwischen 1931 und 1979 die zum Teil katastrophalen Hochwasser von 1939 (Flibach), 1944 (Ausbruch des Durnagelbaches), 1953, 1963 und 1977.

6. Der Abtrag im Einzugsgebiet

L.-W. Collet widmete als erster verschiedene Publikationen (Collet 1923, 1925; Collet & Stumpf 1916) dem Versuch, in systematischer Weise aus den Volumenveränderungen von Flussdeltas auf Erosionskubaturen in den entsprechenden Einzugsgebieten zu schliessen. Jäckli (1958) hat diesen Gedanken weiterverfolgt und aufgrund der Daten der Deltavermessungen des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft versucht, den Abtragsprozess mathematisch darzustellen: Unter der Voraussetzung, die Abtragsintensität c sei neben geologischen und klimatischen Faktoren in Funktion der Zeit t proportional zur mittleren Höhe h_0 des Einzugsgebietes, formulierte Jäckli das Abtragsgesetz

$$h_t = h_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Dabei bedeuten: h_t = mittlere Höhe über der Erosionsbasis in einem späteren Zeitpunkt t; h_0 = mittlere Höhe über der Erosionsbasis heute; $\lambda = c/h_0$ = Abtragskoeffizient; c = heutige Abtragsintensität ($mm \cdot J^{-1}$); e = 2,7182...

Jäckli versuchte, diese Gleichung auf die Erosionsvorgänge im Linthgebiet anzuwenden und rechnete mit einer Abtragsrate von 227 m^3/km^2/Jahr oder einer

Abtragsintensität c (in λ der obigen Gleichung) von 0,17 mm/Jahr. Diese Werte beruhen auf der Volumendifferenz des Deltas von 1911 bis 1931, wobei auch der ausserhalb der vermessenen Fläche liegende, lediglich geschätzte Anteil des Deltas mit einbezogen ist (vgl. Kapitel 2)[2]).

In der Tat ist ein Rückschluss auf Abtragsintensitäten nur sinnvoll, wenn der Schuttkegel möglichst gesamthaft erfasst ist, was jedoch aus den bereits erwähnten Gründen erst nach einer Wiederholung der 1979er Aufnahme möglich sein wird.

Wenn wir trotzdem die von JÄCKLI ermittelten Werte mit den Resultaten der vorliegenden Neuvermessung vergleichen wollen, müssen wir ebenfalls den durch Vergleich berechenbaren Teil des Deltas durch den östlich davon liegenden proportional ergänzen. Aus der Volumendifferenz des Linthdeltas von 1931 bis 1979 resultiert dann ein mittlerer jährlicher Abtrag von 315 m^3/km^2 oder eine Abtragsintensität c von 0,23 mm/Jahr. Als Vergleich sind die den Differenzkubaturen 1911-1931 bzw. 1931-1979 entsprechenden Abtragskurven in Figur 5 dargestellt. Die höhere Abtragsrate in der jüngeren Vergleichsperiode ergibt auch eine kürzere Halbwertszeit des Abtrags, d.h. den Zeitraum, bis die mittlere Höhe des Einzugsgebietes (über der heutigen Erosionsbasis) infolge fluviatilen Abtransportes die Hälfte des gegenwärtigen Wertes erreicht haben müsste: $3{,}9 \times 10^6$ Jahre, während JÄCKLI aufgrund der ihm zur Verfügung stehenden Daten noch $5{,}3 \times 10^6$ Jahre prognostizierte. Dabei sind tektonische Kontinuität sowie gegenwärtige Abtrags- und Klimaverhältnisse vorausgesetzt.

Selbstverständlich sind die verfügbaren Beobachtungsperioden für derartige Extrapolationen zu kurz. Ausserdem werden andere Erosionsfaktoren, insbesondere

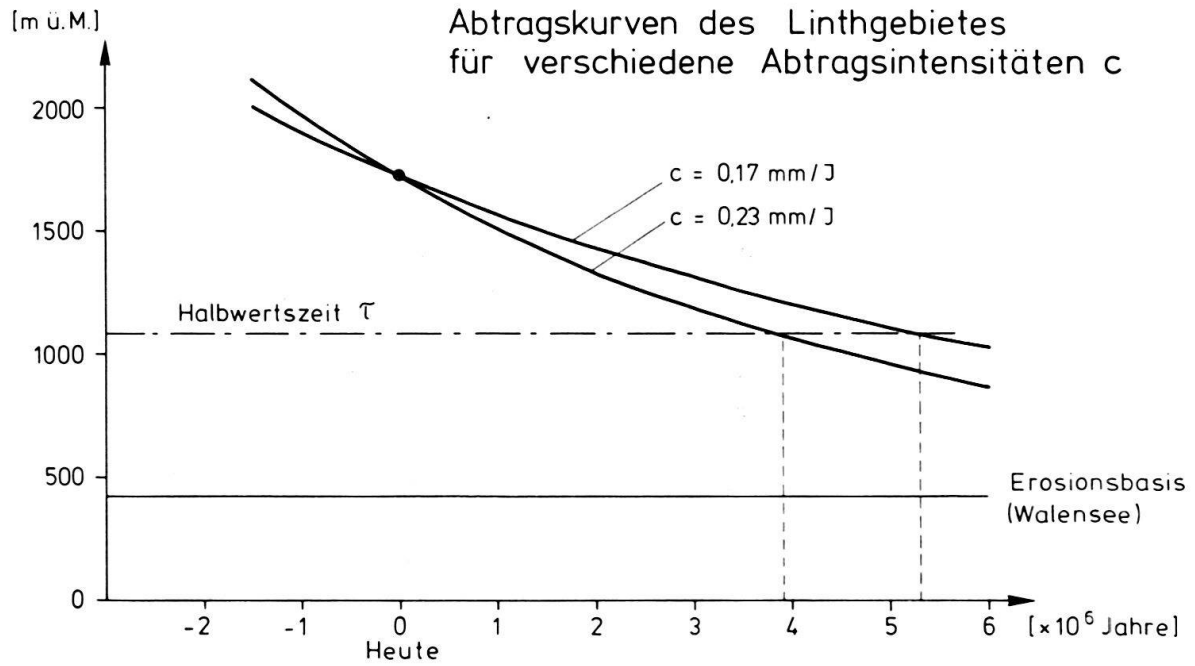


Fig. 5. Hypothetischer Verlauf des Abtrags im Einzugsgebiet der Glarner Linth aufgrund des Deltawachstums von 1911 bis 1931 ($c = 0{,}17$ mm/Jahr, vgl. JÄCKLI 1958) und 1931 bis 1979 ($c = 0{,}23$ mm/Jahr).

[2]) Der zur Sedimentation korrelate Abtrag wurde für eine durchschnittliche Gesteinsdichte von 2,7 berechnet. Die durchschnittliche Dichte der Deltasedimente beträgt etwa 2,0.

die chemische Lösung, Rutschungen, Gletschertransport usw., nicht berücksichtigt. Die Bestimmung von Ablagerungsvolumina ermöglicht jedoch wenigstens den zahlenmässig bedeutendsten dieser Faktoren - den fluviatilen Feststofftransport - längerfristig abzuschätzen; unter der Voraussetzung, dass die Vermessung mit der erforderlichen Präzision durchgeführt wird.

7. Die subaquatische Rinne im Linthdelta

Die topographische Aufnahme von 1979 zeigt im Linthdelta eine rund 700 m lange, 7-10 m tiefe und 50-80 m breite, rinnenartige Einkerbung, deren Achse etwa SW-NE verläuft (Fig. 6). Aus der Ablagerungsverteilung (Tafel) geht hervor, dass seit 1931 innerhalb dieser Rinne Sedimente nur in vergleichsweise geringen Mächtigkeiten abgelagert wurden (oder fehlen). Obwohl die ungefähre Lage dieser subaquatischen Rinne von einzelnen Übersichts-Echolotprofilen her bekannt war (LAMBERT 1978, Fig. 8), bildet die präzise Kartierung dieses «canyons» eine wesentliche Voraussetzung für das Verständnis der Vorgänge, die zu seiner Entstehung führen.

Mit der Bildung subaquatischer Rinnen in Deltagebieten befasste sich bereits VON SALIS (1884) in einem Aufsatz über die Lotungen von 1883 im Bodensee, welche unter der Leitung von J. Hörnlimann vom damaligen Eidgenössischen Topographischen Bureau vor der Mündung des (Alten) Rheins durchgeführt worden waren. VON SALIS beschreibt in der «directen Verlängerung des oberseeischen Rheinlaufs ein unterseeisches Thal» und sieht darin die Erosionsrinne des infolge niedriger Flusswassertemperatur im sog. «Brech» in den Bodensee tauchenden Rheins.

Die ebenfalls von Hörnlimann im Jahre 1885 durchgeführten Lotungen im Genfersee zeigten im Rhonedelta eine genauso ausgeprägte Rinne, mit deren Entstehung sich F.A. Forel intensiv beschäftigte: Er hatte dieses Gebilde zunächst auch der Erosionswirkung der als Dichtestrom dem Seegrund folgenden Rhone zugeschrieben (FOREL 1887). Diese Deutung ist in der Literatur denn auch als Argument für die These herangezogen worden, wonach die «canyons» am Kontinentalhang der Meere durch submarine Erosion entstanden sein sollen (DALY 1936).

In einer späteren Publikation befasste sich FOREL (1892) eingehend mit dem Problem der Dichte von Schwebstoff-Suspensionen und kam zum Schluss, dass die Feststoffbeimengungen die Dichte eines Flusses erhöhen und damit entscheidend für dessen Einschichtungstiefe in Seen sein müssen. Es handelt sich dabei um die erste fundierte Beschreibung der Charakteristiken zuflussbedingter Trübeströme. In derselben Arbeit vertritt FOREL - entgegen seiner früheren Meinung - die Ansicht, dass die Rinne im Delta eine «zone de non-alluvion» sei, während links und rechts im Grenzbereich Dichtestrom/See Sedimente zu parallelen Wällen abgelagert werden. Er schloss allerdings Erosion durch den kanalisierten Trübestrom - zumindest im oberen Teil der Rinne - nicht grundsätzlich aus, sah darin jedoch nicht mehr die Ursache des «canyons».

L.-W. Collet (in COLLET & STUMPF 1916) hat sich mit der Frage auseinandergesetzt, weshalb solche Rinnen in einigen Deltas - Rhone im Genfersee, Aare im

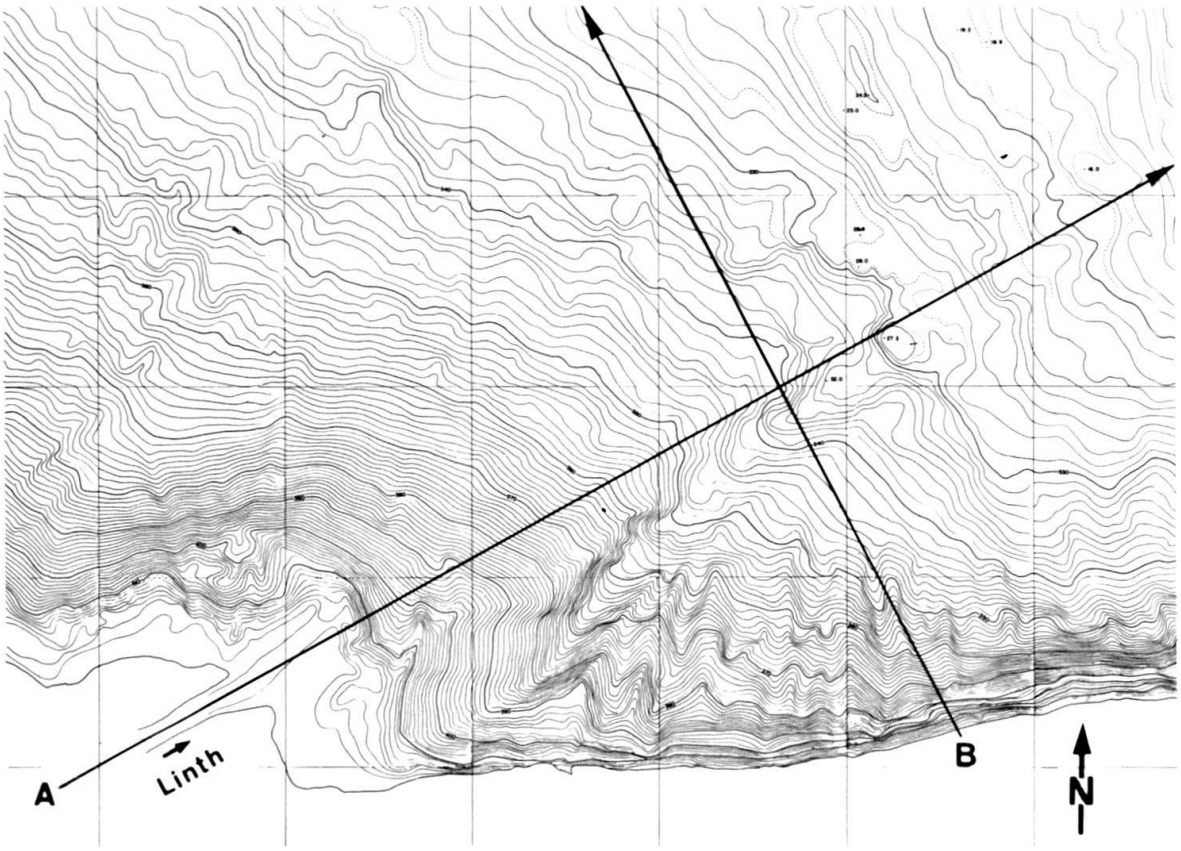


Fig. 6. Ausschnitt aus der Seegrundkarte (Maßstab 1:10000) von 1979 mit den Spuren der Querprofile in Figur 1 (*A*) und Figur 4 (*B*).

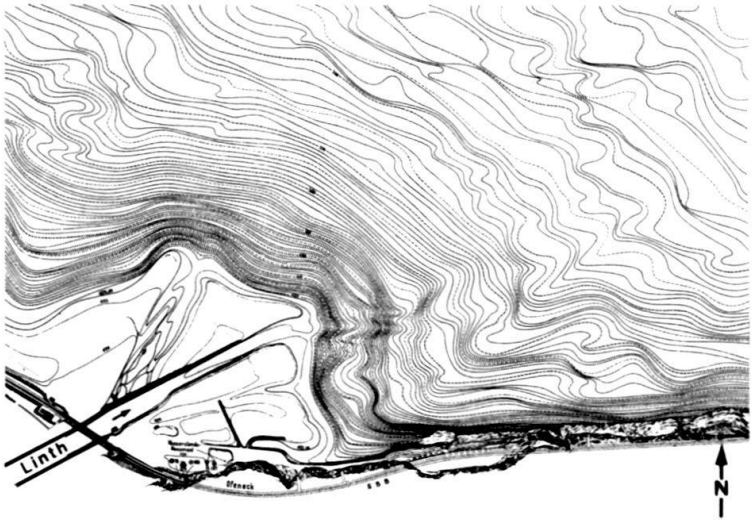


Fig. 7. Ausschnitt aus der Seegrundkarte von 1911 (COLLET & STUMPF 1916), verkleinert auf 1:10000. Vor der nach Osten mündenden Linth sind am Deltahang subaquatische Rinnen zu erkennen, die W–E gerichtet sind. Der nach NNE gerichtete (abgeschnittene) Mündungsarm ist eine Folge des Hochwassers von 1910, als die Linth unmittelbar nach der Eisenbahnbrücke den linken Damm durchbrach.

Brienzersee, (Alter) Rhein im Bodensee – vorkommen, während sie in anderen Seen – Reuss im Vierwaldstättersee, Aare im Bielersee, Rhein im Bodensee – offensichtlich nicht auftreten. Aufgrund seiner Gedanken über den Geschiebetrieb in den entsprechenden Flußsystemen kam Collet zur Schlussfolgerung, dass sich Deltas *mit* Rinnen nur dort formen würden, wo die Schwebstoff-Fracht des Flusses gegenüber der Geschiebefracht weit überwiegt, weil das Geschiebe eine entstehende Rinne

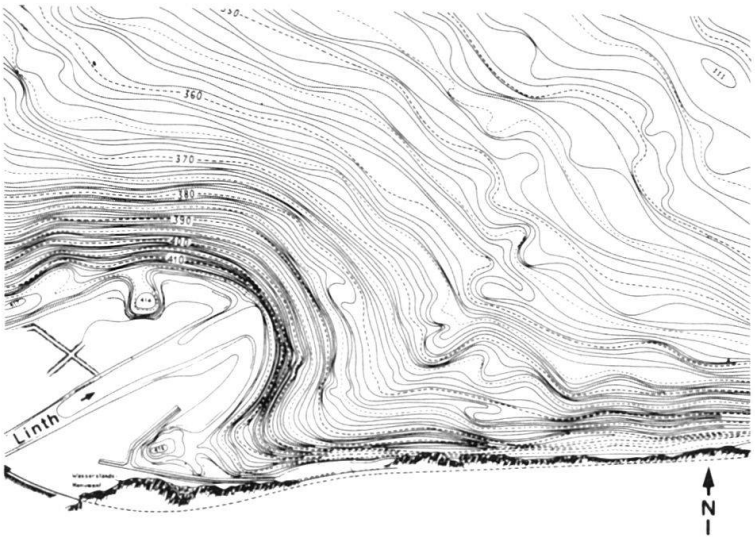


Fig. 8. Ausschnitt aus der Seegrundkarte von 1931 (Mitt. 34, Eidg. Amt für Wasserwirtschaft 1939), verkleinert auf 1:10000.

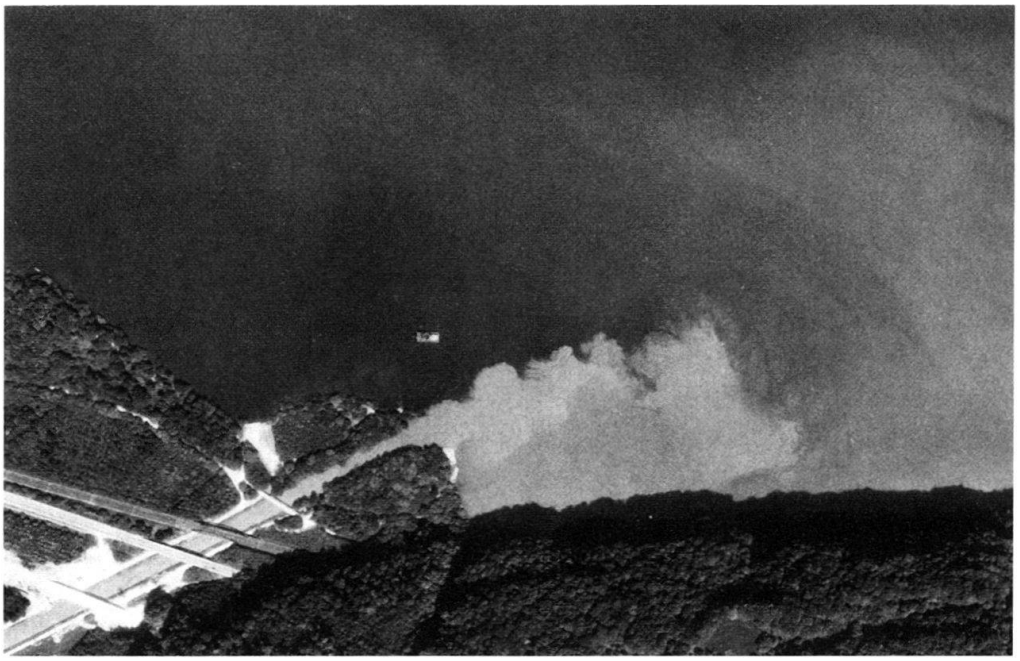


Fig. 9. Luftaufnahme der Linthmündung bei starker Trübung (Abfluss etwa 70 m^3/s). Die Ablenkung des Mündungsstrahls nach rechts ist deutlich zu erkennen. Aufnahme der Eidg. Landestopographie, 2. Juni 1978.

laufend wieder zuschütten müsste. Argument für seine These glaubte Collet in der Neuaufnahme des Linthdeltas von 1911 gefunden zu haben:

Der Plan (Fig. 7) zeigt eine flache, aber deutlich erkennbare Rinne, die sich als Fortsetzung eines früheren Mündungsarmes der Linth nach Osten erstreckt, um nach etwa 500 m in nordöstlicher Richtung in die durch Anlagerung des Deltakegels an die südliche Beckenbegrenzung entstandene Talung einzubiegen. Da die Aufnahme ein Jahr nach dem Katastrophenhochwasser von 1910 gemacht worden war, musste nach Collets Ansicht die Linth, welche damals Schutzdämme durchbrochen hatte, mit ihrem Geschiebe auch Rinnenstrukturen im Seeboden - zumindest teilweise - eingedeckt haben. Vor der Linthmündung, wie sie auf dem Plan von 1911 abgebildet ist, hatten sich jedoch zwei weitere, deutlich ausgeprägte, wenn auch nur 2-4 m tiefe Rinnen ausgebildet, die nach etwa 200 m ebenfalls in die vorher erwähnte Talung münden. Collet nannte diese Furchen «embryons de ravin sous-lacustre» und stellte sich die Frage, ob sie als Rinnen-Frühstadium angesehen werden könnten.

Auf dem 20 Jahre später erstellten Plan von 1931 (Fig. 8) sucht man diese Rinnen-«Embryonen» allerdings vergeblich. Entweder hatte tatsächlich Geschiebe diese Strukturen eingeebnet, oder das feine Relief kam infolge der geringeren Dichte von Lotungspunkten (25,2/ha; 1911: 34,1/ha) topographisch nicht mehr zum Ausdruck. Wesentlich ausgeprägter erscheint dagegen in diesem Kurvenplan die obengenannte Talung als rechtsseitige Begrenzung des inzwischen weiter vorgerückten Deltaschuttkegels. Aus dieser Depression hat sich offenbar die in der 1979er Aufnahme erkennbare, auffallend steil eingekerbte Rinne (Fig. 6) entwickelt, die jedoch deutlich *innerhalb* des Schuttkegels verläuft (Tafel). Forels und Collets Vermutung, dass die Entstehung solcher Rinnen eng mit den Einmündungs- und Einschichtungsvorgängen der Zuflüsse verknüpft sein muss, konnte durch neuere physikalisch-limnologische Untersuchungen bestätigt werden:

Trübeströme

Nachdem der Nachweis zuflussbedingter Dichteströme zunächst im Meer mit Hilfe ozeanographischer Instrumente gelang (Gennesseaux et al. 1971), zeigte die Anwendung selbstregistrierender Strömungsmessgeräte in der Rinne des Linthdeltas (Lambert et al. 1976, Lambert 1979), dass sich die Linth bei Hochwasser infolge erhöhter Dichte (Feststoffgehalt bis 6 g/l) als Trübestrom grundnah einschichtet, den Deltahang hinunterfliesst und - zumindest teilweise - der besagten Rinne folgt. Diese weist ein durchschnittliches Gefälle von 6,5° oder 11,5% auf. Die Strömungsgeschwindigkeiten liegen in der Grössenordnung von 20 bis 30 cm/s, wobei schon Spitzenwerte von 52 cm/s registriert wurden. Obwohl die Bodenströmungen selten länger als 24 Stunden andauern, genügt ihre Geschwindigkeit zweifellos, um das zwischen zwei Hochwassern abgelagerte Material auszuwaschen und die Rinne nicht versanden zu lassen.

Wir haben in früheren Arbeiten (Lambert et al. 1976) festgestellt, dass bei Geschwindigkeiten >40 cm/s der Abfluss der Trübeströme überkritisch («schiessend») sein kann. Dies erklärt möglicherweise die ausgespülte Wanne am unteren Ende der Rinne (Fig. 6), am Übergang zum nur noch schwach geneigten Seeboden

(2,5° oder 4%). Infolge dieses Gefällsknicks verringert sich die Geschwindigkeit der Trübeströme und bewirkt damit auch eine Änderung des Abflussregimes von «schiessend» zu «strömend», was über einen Wassersprung erfolgt (LAMBERT & LÜTHI 1977). Die stark erhöhte Turbulenz im Wassersprung kann zu einer Auskolkung des Untergrundes führen.

Die Geschwindigkeitsabnahme nach dem Wassersprung bewirkt einen Rückgang der Transportkapazität des Trübestroms, der sich auffächert und seine suspendierte Fracht abzulagern beginnt. Als Folge davon ist hier die Sedimentationsrate wesentlich höher als in der Rinne selbst (Tafel).

Wie erwähnt, bildet die Rinne im Linthdelta - entgegen unserer Vermutung - gegenwärtig nicht die geradlinige Fortsetzung der kanalisierten Linth. Wir führen dies auf die Tendenz der Linth zurück, in östlicher Richtung in den See zu münden, was bereits aus der Seegrundaufnahme von 1911 (Fig. 7) hervorgeht. Verschiedene Luftbilder (z. B. Fig. 9) zeigen zudem, dass sich in der Bucht östlich des Deltas ein Wirbel mit Rechtsdrall bildet. Die Gründe dafür sind noch unklar: C. H. Mortimer (mündl. Mitteilung) schliesst eine rechtsseitige Ablenkung des Mündungsstrahls infolge des Coriolis-Effektes nicht aus, was auch die Überlegungen von NYDEGGER (1967) bestätigen würde. Denkbar wäre auch, dass in der von Fischern immer wieder beobachteten, am Südufer W-E gerichteten Oberflächenströmung durch das in den See vorragende Delta ein solcher Wirbel entsteht.

Wie dem auch sei, in diesem Wirbel sammelt sich das trübe Linthwasser direkt über dem obersten Abschnitt der subaquatischen Rinne, und wir meinen, dass aus dieser «Schwebstoff-Zyklone» bei hohen Feststoffkonzentrationen die grundberührenden Trübeströme hervorgehen. Diese Arbeitshypothese muss mit gezielten Strömungsmessungen im oberen Teil der Rinne geprüft werden; für die Planung und Durchführung dieses Vorhabens wird die vorliegende exakte Kartierung des Seegrundes von erstrangiger Bedeutung sein.

Die neuen topographischen Daten, die Veränderungen des Seegrundes seit 1931 und unsere bisherigen Kenntnisse der Sedimentations- und Strömungsvorgänge im Bereich des Linthdeltas lassen uns zum Schluss kommen, dass ein Zusammenwirken morphologischer und sedimentologischer Faktoren zur Rinnenbildung führte: Die durch Anlagerung des Deltakegels an die südliche Beckenbegrenzung entstandene «Naht» bestimmte offenbar den Verlauf der Rinne in der Anfangsphase. Erosionsvorgänge scheinen also *primär* nicht als Ursache dieses «canyons» in Frage zu kommen. Da jedoch die bei Hochwasser entstehenden Dichteströme sich in der Talung konzentrieren, spülen sie diese periodisch aus. Mit dem Wachstum des Deltas verlängerte sich auch die Rinne, welche die ursprünglich morphologisch vorgegebene Richtung beibehielt und damit innerhalb des Schuttfächers zu liegen kam.

Verdankungen

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines von der ETH Zürich finanzierten Forschungsprojektes. Ich danke Herrn Prof. D. Vischer, Direktor der VAW, für die bereitwillige Förderung des Vorhabens und sein stetiges Interesse an der Arbeit. Die Landeshydrologie stellte die Originalpläne der Delta-Aufnahme von 1931 zur Verfügung. Besonderen Dank schulde ich Herrn Dr. R. A. Schlund sowie seinen Mitarbeitern D. Lütte und R. Rosenstihl für die sorgfältig ausgeführte Vermessungsarbeit und für wertvolle Diskussionen an Bord der «Explorer I».

BODENSEE-VORLANDVEREISUNG W/S
STADIAL WÜRM-STEIN AM RHEIN
ÄUSSERER STAND (6)
ÄQUIDISTANZ 100 m, auf EIS 50 m
MASSSTAB 1 : 200'000
0 5 10 km
BODENSEE-VORLANDGLETSCHER
LINZGAU-LAPPEN
UNTERSEE-LAPPEN
THUR-LAPPEN
FÜRSTENLAND-LAPPEN
SCHUSSEN-LAPPEN
ARGEN-LAPPEN
RHEIN-GLETSCHER
ILL-GLETSCHER
LINTH-GLETSCHER
Bregenzer Wald
Hörnli-Bergland
Alpstein
Säntis
Appenzell
St. Gallen
Feldkirch
Bregenz
Lindau
Konstanz
Friedrichshafen
Ravensburg
Überlingen
Singen
Stein a/Rh
Schaffhausen
Frauenfeld
Winterthur
Weinfelden
Romanshorn
Rorschach
Altstätten
Dornbirn
Bezau
Wangen
Isny
Lindenberg
Argen
Waldburg
Bad Waldsee
Aulendorf
Altshauser Ried
Pfrunger Ried
Stockach
Mahlspürer Tal
Langenstein-Rinne
Kimberg
Bodanrück
Sipplinger Berg
Hohentwiel
Schienerberg
Seerücken
Stammer Berg
Stammheimer Zunge
Andelfinger Zunge
Steiner Zunge
Singener Zunge
Öhninger Zunge
Frickinger Zunge
Deggenhauser Zunge
Wilhelmsdorfer Zunge
Aulendorfer Zunge
Lauche Zunge
Wiler Zunge
Gossauer Zunge
St. Galler Zunge
Rotbach Zunge
Sittergletscher
Urnäschgletscher
Neckergletscher
Rorach Zunge
Walsach Zunge
Subersachgletscher
Bregenzerwaldgletscher
Freschengletscher
Schussen
Argen
Thur
Rhein
Ill
Bregenzer Ach
Adelegg
Hoher Freschen
Gäbris
Säntis
Fähnern
Appenzeller Sporn
Tannenberg
Braunauer Höhen
Imenberg
Schneitberg
Eulach
Irchel
Hörnli
Wil
Wattwil
Rindal
Pfänder
Bödele
Ober-staufen
Ulter-Gletscher
via Riss zur Donau
via Iller zur Donau
zur Donau
Ostrach
Altrach
Untere Argen
Höchsten
Acheck
Wilhelmsdorfer Ach
Rotach
Rhein
Thur
Lauche
Sitter
Urnäsch
Neckerbach
Rotbach
Walsach
Bregenzer Ach
Schussen
Argen
Ill
Rhein
Rhein
Rhein

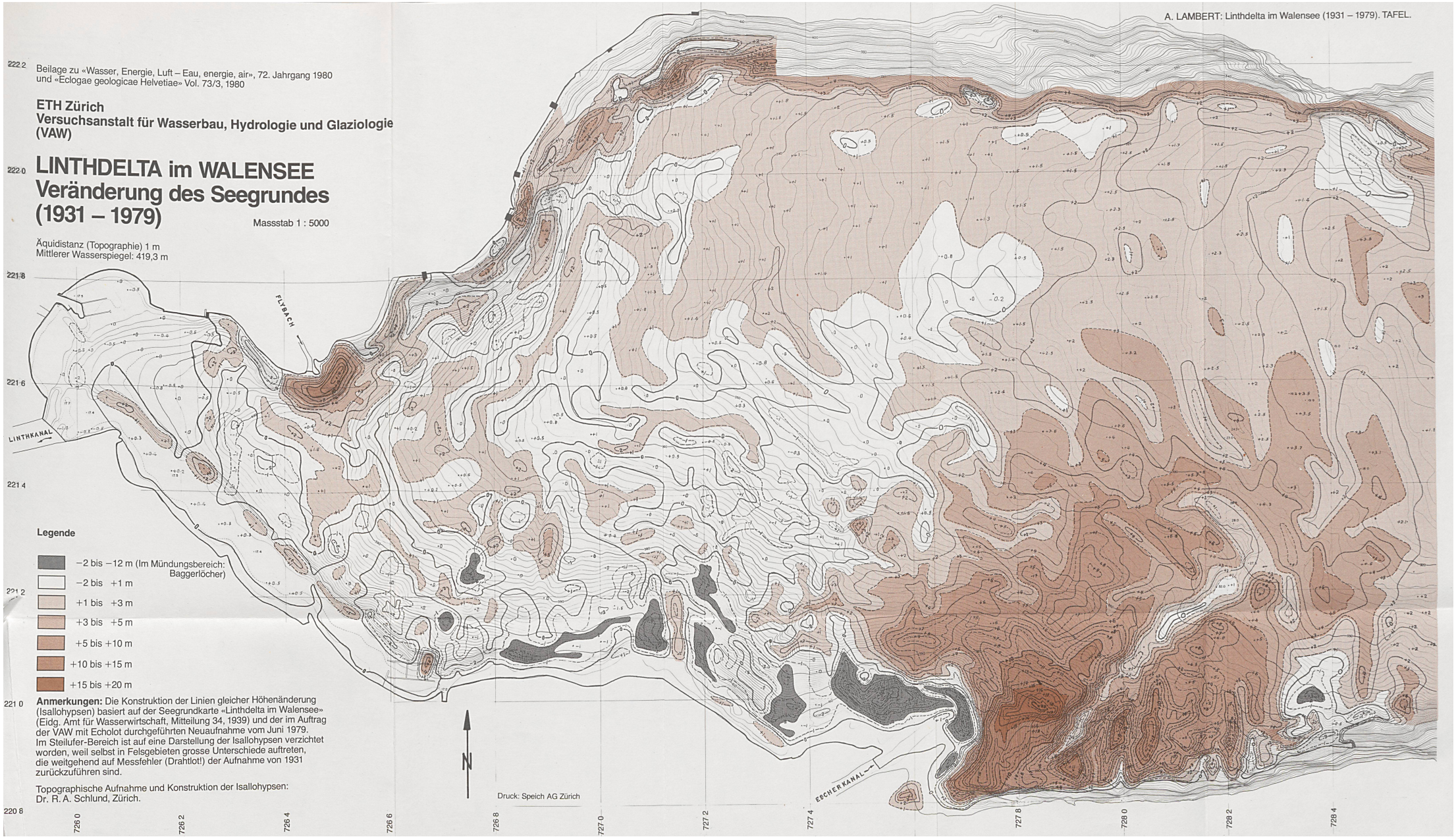
Beilage zu «Wasser, Energie, Luft – Eau, energie, air», 72. Jahrgang 1980
und «Eclogae geologicae Helvetiae» Vol. 73/3, 1980

ETH Zürich
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)

LINTHDELTA im WALENSEE
Veränderung des Seegrundes (1931 – 1979)

Massstab 1 : 5000

Äquidistanz (Topographie) 1 m
Mittlerer Wasserspiegel: 419,3 m



Legende

- −2 bis −12 m (Im Mündungsbereich: Baggerlöcher)
- −2 bis +1 m
- +1 bis +3 m
- +3 bis +5 m
- +5 bis +10 m
- +10 bis +15 m
- +15 bis +20 m

Anmerkungen: Die Konstruktion der Linien gleicher Höhenänderung (Isallohypsen) basiert auf der Seegrundkarte «Linthdelta im Walensee» (Eidg. Amt für Wasserwirtschaft, Mitteilung 34, 1939) und der im Auftrag der VAW mit Echolot durchgeführten Neuaufnahme vom Juni 1979. Im Steilufer-Bereich ist auf eine Darstellung der Isallohypsen verzichtet worden, weil selbst in Felsgebieten grosse Unterschiede auftreten, die weitgehend auf Messfehler (Drahtlot!) der Aufnahme von 1931 zurückzuführen sind.

Topographische Aufnahme und Konstruktion der Isallohypsen:
Dr. R. A. Schlund, Zürich.

Druck: Speich AG Zürich