Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 73 (1981)
Heft: 5-6

Artikel: Der Columbiagletscher und die Alaska-Pipeline
Autor: Haeberli, Wildfried
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941325

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: 15.07.2025

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

Der Columbiagletscher und die Alaska-Pipeline

Wilfried Haeberli

Zusammenfassung

Geotechnische Probleme mit Permafrost sind nicht die einzigen glaziologischen Risiken für das Alaska-Öl: Nach einer Studie des US Geological Survey wird der Columbia Glacier in den nächsten Jahrzehnten durch Kalbung eine Eismasse abstossen, die das Gesamtvolumen aller Schweizer Gletscher übersteigt. Die gesteigerte Eisbergproduktion könnte den Tankerverkehr zwischen dem Pipeline-Terminal Valdez und dem Pazifik gefährden.

Résumé: Le glacier Columbia et l'oléoduc de l'Alaska

Les problèmes géotechniques liés au pergélisol ne constituent pas l'unique source de risques pour le pétrole de l'Alaska: selon une étude de l'US Geological Survey, le glacier Columbia va, dans les prochaines décennies, libérer par vêlage une masse de glace d'un volume supérieur à celui de la totalité des glaciers suisses. La production fortement accrue d'icebergs pourrait alors mettre en danger le trafic des pétroliers entre le terminal de l'oléoduc près de Valdez et l'océan Pacifique.

Abstract: Columbia Glacier and the Trans-Alaska Pipeline

Permafrost-related geotechnical problems are not the only risks for the Alaska-oil: a study of the US Geological Survey predicts that, in the forthcoming tens of years, Columbia Glacier will get rid of a mass of ice through calving, which exceeds the total volume of all Swiss glaciers. This may greatly increase iceberg hazards to shipping, especially large unwieldy oil tankers, between the pipeline terminal near Valdez and the Pacific Ocean.

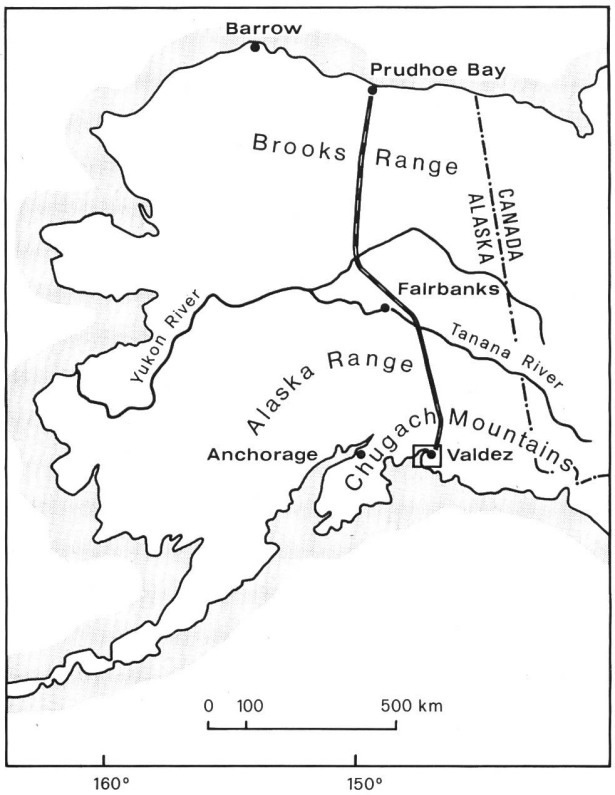


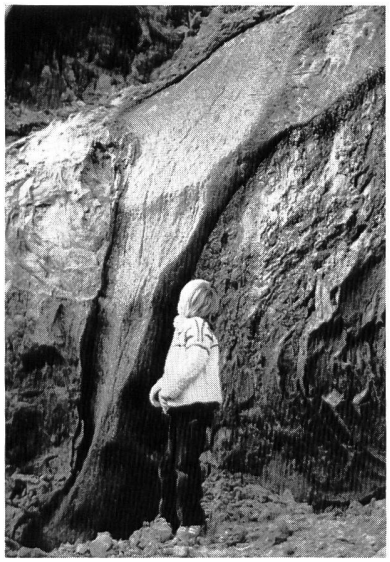
Bild 2. Pipelineverlauf, Übersichtsskizze. Ausschnitt: vgl. Bild 6.

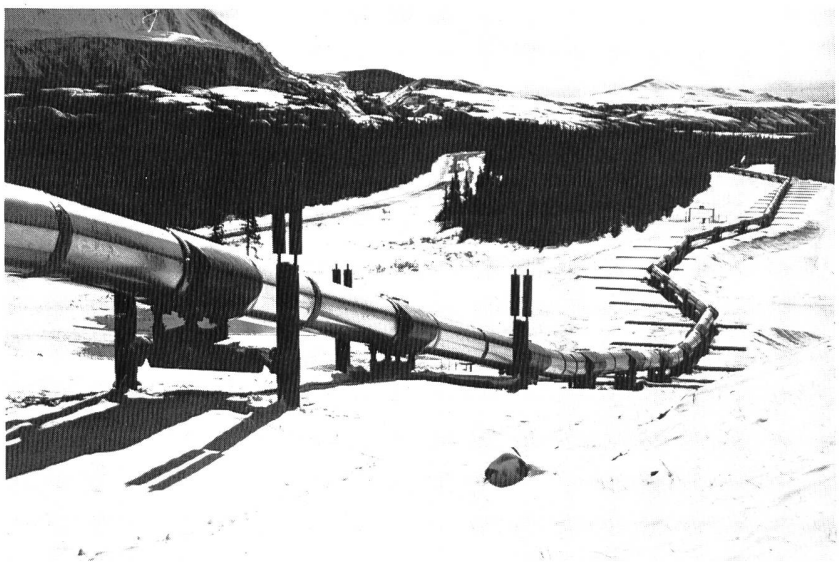
Einleitung

Grosse technische Anlagen in unmittelbarer Nähe von Gletschern sind für Alpenbewohner ein vertrautes Bild. Der direkte Zusammenhang zwischen Gletschermassenbilanz und Energieproduktion in hochgelegenen Stauanlagen oder Sicherheitsfragen im Zusammenhang mit Eisstürzen sind in der Schweiz seit Jahren Gegenstand angewandter Gletscherforschung. Ähnlich gelagerte Probleme

Bild 1, links. Grundeis in der Form eines Eiskeils an einer frisch angeschnittenen Strassenböschung bei Fairbanks. Im Löss der grossen Becken Zentralalaskas sind Eiskeile weit verbreitet. Die scharfe Begrenzung des Eises gegen oben zeigt die maximale Permafrost-Auftautiefe während des postglazialen Klimaoptimums an und weist darauf hin, dass die eiszeitlich entstandenen Eiskeile heute nicht mehr aktiv weiter gebildet werden, sondern in relativ «warmem» Permafrost konserviert sind. Entsprechend heikel sind die Fundationsprobleme für die «heisse» Pipeline. Aufnahme des Verfassers, 8. 10. 78.

Bild 3, rechts. Kreuzungsstelle der Pipeline mit der Denali-Bruchzone in der Alaska Range. Zu erkennen sind die «expansion loops» zur Umsetzung der thermisch bedingten Längsdeformationen in seitliche Verschiebungen, die mit «heat pipes» und Wärmeabstrahlern ausgerüsteten vertikalen Trägerelemente und der auf dem Verbindungsbalken aufliegende Gleitschuh. Die 14 m langen, bodenebenen Gleitbalken in der Talsohle sollen der Pipeline ermöglichen, dextrale Blattverschiebungen bis zu 6 m entlang der geologisch aktiven Bruchzone aufzunehmen. Aufnahme des Verfassers, 21. 9. 78.





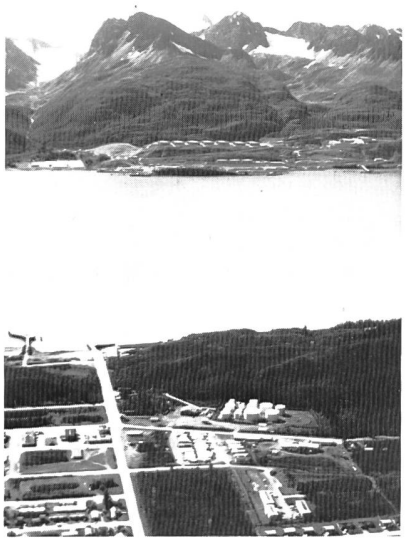


Bild 4, links. Der ganzjährig eisfreie Fjord von Valdez mit dem Pipeline Terminal, den Tankanlagen und Hafeneinrichtungen im Hintergrund. Das Fischerdorf Valdez wurde beim Alaska-Erdbeben 1964 durch eine Flutwelle zerstört. Die Hafenanlagen für die Öltanker sind für den Fall einer Wiederholung dieses Ereignisses dimensioniert. Aufnahme des Verfassers, 22. 8. 78.

Bild 5, rechts. Der Columbiagletscher, bekannt als «Königin der Alaskagletscher». Die Distanz zwischen der Kalbungsfront und der Nunatak-Berggruppe «Grand Central» in der Mitte des Eisstroms beträgt rund 15 km, die sichtbare Breite der Kalbungsfront 3,5 km. Am rechten Bildrand ist der Gletscher noch in Kontakt mit Heather Island, einer Insel mitten im Fjord der Columbia Bay, links davon hat die Bildung einer grossen, halbkreisförmigen Bucht begonnen. Helikopteraufnahme des Verfassers, 22. 8. 78.

entstehen zurzeit in Alaska und Kanada im Zuge der raschen Erschliessung arktischer Öl- und Gasvorkommen. Der Verfasser hatte 1978/79 während eines Studienaufenthaltes beim US Geological Survey – Water Resources Division Gelegenheit, einige glaziologische Aspekte der Alaska-Pipeline zu studieren und an einer Untersuchung des US Geological Survey über die zukünftige Entwicklung des Columbiagletschers und ihren Einfluss auf die Sicherheit des Öltransportes im Meeresarm von Valdez teilzunehmen.

Die Alaska-Pipeline

Auf 50 Milliarden Fass werden die Reserven der 1968 entdeckten Ölfelder von Prudhoe Bay geschätzt. Anfang der 70er Jahre wurde eine Öl-Pipeline zur eisfreien Südküste Alaskas geplant, die 1,5 Milliarden Dollar kosten sollte. Unter der Bauherrschaft der Alyeska Pipeline Service Company, die sich im Besitze von 8 grossen Ölgesellschaften oder ihrer Tochtergesellschaften befindet, begann 1974 die Bautätigkeit mit der Herstellung einer rund 570 km langen Zufahrtsstrasse vom Yukon River nach Prudhoe Bay in der Rekordzeit von nur 5 Monaten, und im Oktober 1975 war Alaskas erste Brücke über den Yukon River fertiggestellt [1]. Als zwei Jahre später Öl durch die Pipeline zu fliessen begann, waren die Kosten auf rund das 10fache des ursprünglich geplanten Betrages gestiegen.

Die hohen Kosten und die unkonventionelle Bauweise der Pipeline sind eine Folge der schwierigen Untergrundverhältnisse. Die Probleme beginnen schon bei der Förderung des rund 90 °C warmen Öls aus etwa 3000 m Tiefe durch bis zu 600 m dicken Permafrost (Bohrlochstabilität!), häufen sich dann aber bei der Pipeline selbst, die über mehr als 95% der Gesamtstrecke von 1270 km im Permafrostgebiet verläuft. Nur gut die Hälfte der 58 bis 63 °C warmes Öl führenden Pipeline konnte auf konventionelle Art in stabilem Untergrund (Fels, grobklastisch-eisarme Sedimente) verlegt werden, insgesamt 570 km Rohrleitung mit einem Durchmesser von 1,22 m mussten wegen der Gefahr des Schmelzens von Grundeis (Bild 1) und entsprechend differenzieller Setzung in eisreichen, feinkörnigen Lockersedimenten (Löss) über der Erdoberfläche geführt werden [2]. 78 000 vertikale Trägerelemente mussten dazu 5 bis 20 m tief eingebohrt werden, wobei 80% dieser Trägerelemente mit «heat pipes» – geschlossenen Röhren, die durch natürliche Wärmeleitung und Phasenwechsel der in ihnen zirkulierenden Ammoniaklösung dem Boden im Winter Wärme entziehen – ausgerüstet wurden, um die Bodentemperatur unter 0 °C zu halten. Auch die Schotterfundamente von fünf Pumpstationen auf eisreichem Permafrost müssen durch eine in einem Röhrensystem zirkulierende Salzwasserlösung künstlich gekühlt werden.

Die Pipeline kreuzt 84 grössere Flüsse und überquert drei grosse Gebirge (Bild 2): die Brooks Range über den 1460 m hohen Atigun-Pass, die Alaska Range über den 1005 m hohen Isabell-Pass und die Chugach Mountains über den 840 m hohen Thompson-Pass. Südlich von Fairbanks folgt sie der ältesten Überlandstrasse Alaskas, dem Richardson Highway. Die freiliegenden Rohrleitungsteile sind jährlichen Temperaturschwankungen bis zu 80 °C ausgesetzt. Die dadurch hervorgerufenen Längsdeformationen werden durch eine Zickzack-Linienführung (expansion loops) in laterale Verschiebungen umgesetzt. Zwischen den festen Verankerungen in Abständen von 240 bis 550 m liegen die Rohre auf einem Gleitschuh, der sich an einer Teflonfläche auf den Verbindungsbalken der in 20-m-Abständen angeordneten Paare von vertikalen Trägerelementen seitlich bewegen kann. 14 m lange Gleitbalken sollen an der Kreuzungsstelle mit der Denali fault, einer tektonisch aktiven Bruchzone, der Pipeline ermöglichen, plötzliche Horizontalverschiebungen bis zu 6 m und Absenkungen bis zu 1,5 m zu überstehen (Bild 3). Im ganzjährig eisfreien Hafen von Valdez stehen 18 Rohöltanks mit einem Fassungsvermögen von je 510 000 Fass bereit, um die täglich anfallenden 2 Millionen Fass Öl vorübergehend aufzunehmen (Bild 4). Von da erfolgt der Abtransport des Öls mit Tankern durch den Meeresarm von Valdez, in dem seit einigen Jahren vermehrt Eisberge gesichtet werden.

Diese Eisberge stammen von dem als «Königin der Alaskagletscher» bekannten Columbiagletscher (Bild 5).

Instabile Gletscher

Bekannte Beispiele für Instabilitäten der Gletscherbewegung sind die «surges», plötzlich einsetzende und ausserordentlich rasch ablaufende Gletschervorstösse von oft erstaunlichem Ausmass nach langjährigen Phasen der Stagnation. Alle grossen Gletscher der Denali-Bruchzone zeigen solches Verhalten [3]. Im Winter 1936/37 stiess der rund 40 km lange Black Rapids Glacier innerhalb von 3 Monaten 5 km weit vor und erreichte dabei Spitzengeschwindigkeiten von 60 m/Tag, überfuhr jedoch nicht wie befürchtet den Richardson Highway, der innerhalb der Moränen historischer Vorstösse liegt [4]. Heute zieht die Pipeline auf der Gletscherseite der Strasse durch die grundwasserführenden, permafrostfreien Schotter des Delta River, der für seine grossflächige Aufeisbildung im Winter bekannt ist [5]. Während der Bauphase wurde das Verhalten des Gletschers im Auftrag der Alyeska beobachtet, seither werden die Messungen im Rahmen der Forschungsprojekte des US Geological Survey weitergeführt. Da auch die Gletscher Alaskas im 20. Jahrhundert erhebliche Massenverluste erlitten, erscheint eine Überquerung der Pipeline durch den Gletscher bei einem in den nächsten Jahren zu erwartenden, neuerlichen «surge» nicht wahrscheinlich. Mit Sicherheit kann dieses für die Betriebssicherheit der Pipeline sehr ernsthafte Risiko jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Weniger bekannt, aber nicht weniger spektakulär ist das Gegenstück zum «surge», die katastrophale Auflösung der Zungen von Gletschern, die in tiefe Gewässer münden. Da die Kalbungsaktivität solcher Gletscher mit zunehmender Wassertiefe wächst, genügt schon ein schwacher Rückzug der Gletscherfront von einer untiefen Stelle, zum Beispiel einer Endmoräne oder einem Felsriegel, um einen drastischen und für menschliche Zeitbegriffe irreversiblen Zerfallsvorgang auszulösen. Im Zuge des allgemeinen Gletscherrückgangs seit der «kleinen Eiszeit» verlor zum Beispiel der dem Malaspina Glacier benachbarte Guyot Glacier zwischen 1938 und 1964 165 km² seines Zungengebietes, wobei der grösste Teil dieses Massenverlustes in einer Zeit von nur 6 Jahren erfolgte [6]. Der 100-km-Rückzug des Eises in der Glacier Bay zwischen Yakutat und Sitka ist wahrscheinlich der grösste historische Gletscherrückzug der Welt. Der Columbiagletscher, mit einer Oberfläche von 1100 km² der grösste im Prince William Sound endende Gletscher, ist der letzte kalbende Gletscher auf dem nordamerikanischen Kontinent, dessen Zunge noch in der Position des historischen Maximalstandes verharrt [7].

Schon heute driften Eisberge des Columbiagletschers in den Meeresarm von Valdez. Ein drastischer Rückzug des Gletschers hätte eine starke Steigerung der Eisbergproduktion zur Folge, wodurch der Tankerverkehr zwischen Valdez und dem Prince William Sound gefährdet würde (Bild 6). Da der Pumpbetrieb der Pipeline im Winter höchstens 21 Tage aussetzen darf, ohne dass das Öl in den Rohren gefriert, wäre eine längerdauernde Unterbrechung des Tankerverkehrs im Winter besonders schwerwiegend

Das Columbiagletscher-Programm

1977 begann ein Beobachtungsprogramm des US Geological Survey am Columbiagletscher [8]. Folgende Fragen waren zu beantworten:

– Steht ein drastischer Gletscherrückzug unmittelbar bevor?

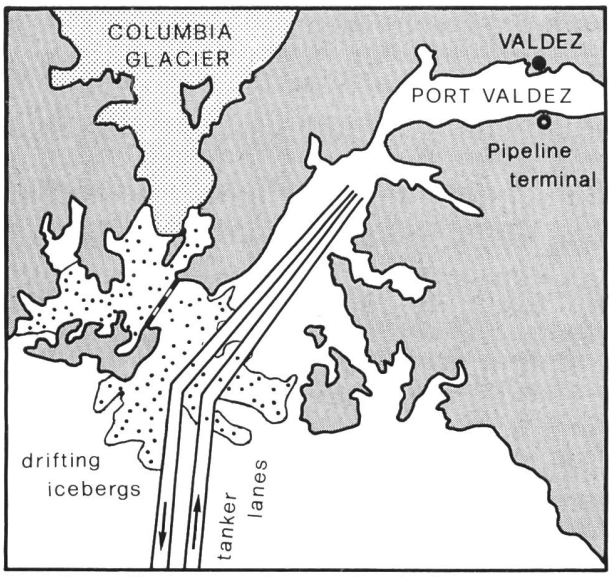


Bild 6. Pipeline-Terminal, Tankerlinien und Columbia-Eisberge im Fjord von Valdez, Situation.

– Wenn ja, wann wird er einsetzen und was sind die Folgen?

Es ging also um die Vorhersage der zukünftigen Verschiebung der Gletscherfront

$$X'(t) = U(X,t) - C(X,t)$$

mit X = Position der Front, X' = Verschiebungsgeschwindigkeit der Front in Längsrichtung (Vorstoss und Rückzug), U = Geschwindigkeit der Eisbewegung zur Front, C = Kalbungsgeschwindigkeit und t = Zeit. Die Möglichkeit der Instabilität ist dadurch gegeben, das U und C Funktionen von X sind: Da U hinter der Kalbungsfront abnimmt (extending flow), wird bei einer kritischen Wassertiefe C grösser als U und ein mit zunehmender Wassertiefe beschleunigender, «irreversibler» Rückzug setzt ein [9].

Für die Untersuchung des Gletscherfliessens und der Kalbungsvorgänge wurde 1977 und vor allem 1978 ein ausserordentlich umfangreiches Datenmaterial gesammelt [8, 10]. Ein empirisches Kalbungsgesetz wurde gesucht, das C in Abhängigkeit von Faktoren wie Wassertiefe, Höhe der Gletscherfront, Geschwindigkeit der Gletscherlängsdehnung usw. beschreibt. Zu diesem Zweck wurden mit einem speziell eingerichteten Forschungsschiff Messdaten an verschiedenen, in Fjorden endenden Gletschern Alaskas gesammelt und statistisch analysiert (Regression, Faktorenanalyse). Am Columbiagletscher selbst wird die Kalbungsaktivität (Bild 7) mit einer automatischen Kamera (Paillard Bolex) laufend beobachtet. Die Grösse des Columbiagletschers verursachte Probleme der Gletschervermessung. Auf dem rund 70 km langen Gletscher und seinen wichtigsten Zuflüssen wurden in einem Netz von 60 Pegeln die Gletscherbewegung und die Massenbilanz an der Gletscheroberfläche bestimmt. Die durchschnittliche Messdistanz betrug 5 km. Nicht nur wegen der grossen Marschdistanzen und des oft ungangbaren Geländes (Bild 8) war der Helikopter ein unentbehrliches Hilfsmittel: Die meisten Pegel waren von den Vermessungsstationen aus nur aufzufinden, wenn der Helikopter im Flug verfolgt werden konnte – schon das ruhende Flugzeug wäre von blossem Auge in diesem gewaltigen Meer von Gletscherspalten kaum auszumachen gewesen! Der Helikopter selbst musste vom Theodoliten (Kern DKM 2AE) aus über Funk zum Startpunkt des Pegels gelotst werden. An dieser «Boje» (index point) mit festen x/y-Koordinaten wurde die

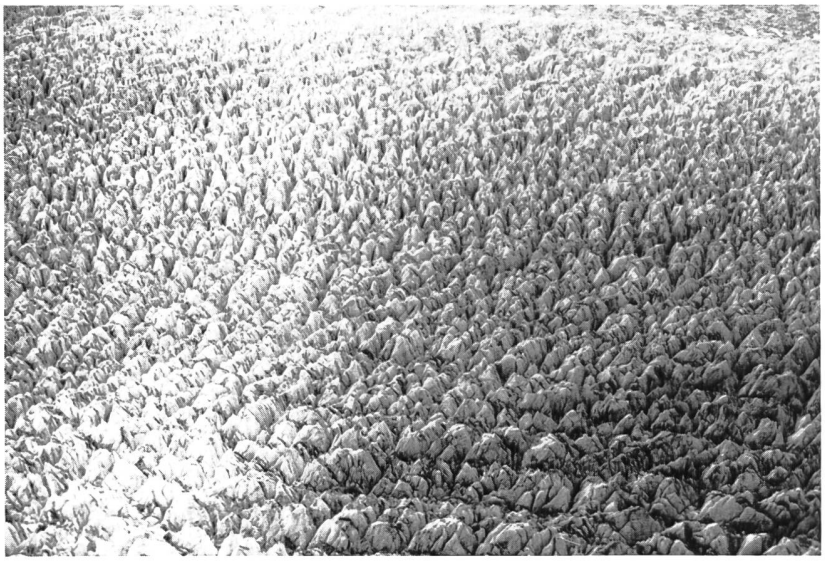


Bild 7, links. Eisabbruch an der Kalbungsfront des Columbiagletschers. Die Höhe der sichtbaren Eiswand beträgt gegen 100 m, die Fliessgeschwindigkeit des Gletschers liegt hier jahreszeitlich variabel zwischen 2000 und 3000 m/Jahr, und die täglich im Durchschnitt durch Kalbungen abgestossene Eismasse entsprach 1978 der Masse der grössten in den Schweizer Alpen beobachteten Eislawine (Altels 1895, rund 4 Mio m³). Helikopteraufnahme des Verfassers, 29. 8. 78.

Bild 8, rechts. Gletscheroberfläche in der Nähe von «Grand Central». Die Fliessgeschwindigkeit des Gletschers übersteigt hier 1000 m/Jahr, der Gletscher ist extrem zerrissen, und die Messpunkte sind auch mit dem Helikopter kaum zugänglich. Helikopteraufnahme des Verfassers, 1. 9. 78.

Dickenänderung des Gletschers bestimmt, worauf der Pegel in der Fliessrichtung des Gletschers gesucht werden musste. Infolge der grossen Messdistanzen (Bild 9) musste die Refraktionskorrektur für die Höhenwinkelmessung ständig neu bestimmt werden. Ebenfalls laufend wurden die Messungen mit programmierbaren Taschenrechnern ausgewertet. Diese Kontrolle ermöglichte es, Messfehler im Feld zu entdecken und aufwendige Wiederholungsmessungen zu vermeiden. Im Akkumulationsgebiet wurde zur Suche von eingeschneiten Pegeln eine Magnetsonde eingesetzt (Bild 10). Der unterste, rund 10 km lange Abschnitt der Gletscherzunge, der für das Verhalten der Gletscherfront in den nächsten Jahren von entscheidender Bedeutung ist, wurde in 6-Wochen-Abständen überflogen. Anhand der dabei aufgenommenen Luftbilder wurden in einem Netz von 200 Punkten photogrammetrische Bewegungsmessungen ausgeführt, um Saisoneffekte des Gletscherverhaltens zu bestimmen. Gegen 100 Eisdickenmessungen wurden mit einem neuen Monopuls-Radargerät für temperierte Gletscher im Frequenzbereich von 1 bis 5 MHz an der Gletscheroberfläche vorgenommen (Bilder 11, 12). Gleichzeitig wurde der Gletscher mit einem Pilatus/Fairchild Porter, der ebenfalls mit einem Radargerät ausgerüstet war, an einer grossen Zahl von Profillinien überflogen. Da die historische Information über den Gletscher verständlicherweise dürftig ist, wurde das Messprogramm für eine komplette Parametrisierung des Gletschers und die Verwendung von numerischen Modellen zum dynamischen Verhalten und damit zum Stabilitätsproblem des Gletschers ausgelegt. Verschiedene, auf Kontinuitätsbetrachtungen und Eis-Fliessgesetzen aufbauende, zeitabhängige Modelle mit finiten Differenzen [zum Beispiel 11, 12, 13] werden eingesetzt. Für die Behandlung der in diesen Modellen nicht befriedigend erfassten Grenzbedingungen an der Gletscherfront wird ein Modell mit finiten Elementen verwendet, wie es von *A. Iken* in einfacherer Form für die Untersuchung von Eisabbrüchen in den Alpen benützt worden ist [14]. In jüngster Zeit vorgeschlagene Gesetzmässigkeiten für die Gleitbewegung des Gletschers wie zum Beispiel

$$u_b = \frac{k\tau^m}{N_{eff}} \quad , \quad N_{eff} = p_i - p_w$$

(u_b = Gleitgeschwindigkeit am Gletscherbett, τ = basale Schubspannung, k und m = Parameter des Gleitgesetzes, N_{eff} = effektiver Druck am Gletscherbett, P_w = Wasserdruck, P_i = Eisdruck) werden an den Messdaten geprüft, wobei P_w nach dem Prinzip der «Röthlisberger-channels» [15] geschätzt wird. Einige gravierende Probleme, zum Beispiel das Fehlen eines bewährten Gleitgesetzes oder eines räumlich-zeitabhängigen Wasserdruckmodells, liessen zum vornherein vermuten, dass von den Modellrechnungen her keine eindeutige Antwort auf die Stabilitätsfrage zu erwarten ist.

Die Prognose

Die vorläufige Vorhersage für das zukünftige Verhalten des Columbiagletschers [16] geht von den wichtigsten Ergebnissen des Messprogramms aus: (A) Der Gletscher liegt seit der Jahrhundertwende auf dem bergseitigen Hang einer submarinen Endmoräne. Die Wassertiefe an der Front beträgt zurzeit 50 bis 150 m, bereits 1,5 km gletscheraufwärts jedoch liegt das Gletscherbett rund 300 m unter dem Meeresspiegel. (B) Generell wächst die Kalbungsaktivität mit wachsender Wassertiefe an der Front. Die Kalbungsgeschwindigkeit des Gletschers betrug 1978 rund 2000 m/Jahr. (C) Die Gletscherzunge wird eindeutig dünner. Im Beobachtungsjahr 1977/78 war die Massenbilanz an der Gletscheroberfläche leicht positiv (0,4 km³), der Eisverlust durch Kalbung (1,4 km³) führte aber zu einem Netto-Massenverlust von rund 1 km³ Eis. Auf den entscheidenden untersten 10 km der Gletscherzunge sank dabei die Oberfläche um 4 bis 11 m ein. Der entsprechende Wert hatte in der Periode 1957–1974 noch rund 0,5 m pro Jahr und 1974–1978 rund 3 m pro Jahr betragen. (D) Die Fliessgeschwindigkeit des Gletschers wächst. In der Perioode 1976–1979 nahmen die Jahresgeschwindigkeiten nahe der Kalbungsfront um 6 bis 7% pro Jahr zu. Auf den letzten 4 km vor der Kalbungsfront steigt die Jah-

Bild 9. Blick von der Vermessungsstation «Fantastic» auf das Ablationsgebiet des Gletschers Richtung «Grand Central» und Columbia Bay. Die Breite des Eisstroms variiert zwischen 3,5 km an den Engstellen (Grand Central, vgl. Bild 8) und 8 km, die Gletscherdicke liegt im Stromstrich bei rund 1000 m, und der grösste Teil des Gletscherbettes befindet sich unter dem Meeresspiegel. Distanz Fantastic–Grand Central: rund 20 km. Aufnahme des Verfassers, 28. 8. 78.

resbewegung zurzeit von 1000 auf 2000 m/Jahr. (E) Die Gletscherfront zeigt Anzeichen des beginnenden Rückzuges. Seit 1974 ist die Front um mehr als 500 m zurückgewichen. Grosse, halbkreisförmige Buchten bilden sich im Hochsommer an der Eisfront, was früher zumindest nicht im gleichen Ausmass beobachtet worden ist. Zum ersten Mal seit Menschengedenken hat sich dabei die Front 1978 von einer Insel in der Mitte des Fjordes zurückgezogen (Bilder 13 bis 15), womit die Fläche der rund 6 km breiten Kalbungsfront schlagartig vergrössert wurde.

Daraus werden folgende Schlüsse gezogen: (a) Bei einem weiteren Rückzug des Gletschers wird die Kalbungsgeschwindigkeit zunehmen (aus A und B). (b) Die infolge der Dickenabnahme wachsende Oberflächenneigung der Gletscherzunge führt zu einer Beschleunigung der Gletscherbewegung, wodurch die wachsende Kalbungsgeschwindigkeit teilweise kompensiert wird (aus C und D). (c) Der Rückzug der Gletscherfront entspricht der Differenz zwischen Kalbungsgeschwindigkeit und Fliessgeschwindigkeit (Kontuniät). (d) Die Gletscherbewegung kann nicht beliebig zunehmen, um mit der wachsenden Kalbungsgeschwindigkeit Schritt zu halten. Die beobachtete Beschleunigung bei abnehmender Gletscherdicke ist mit den heute diskutierten Vorstellungen über die Mechanismen der Gletscherbewegung erklärbar, wonach Deformation und Gleiten mit der dritten Potenz der Oberflächenneigung und mit der dritten (Gleiten) bis vierten (Deformation) Potenz der Gletscherdicke variieren. Eine Grenze für diese Entwicklung ist dadurch gegeben, dass das Gletscherende bei fortdauernder Dickenabnahme von rund 10 m/Jahr in etwa 7 Jahren aufschwimmen würde. Ein «surge» würde diese Entwicklung nur vorübergehend unterbrechen. (e) Ein irreversibler, drastischer Gletscherrückzug ist unausweichlich. Auch eine Serie von Jahren mit positiver Massenbilanz könnte diesen Rückzug nicht entscheidend aufhalten, da sich der Massenzuwachs infolge der Länge des Gletschers erst nach Jahrzenten an der Kalbungsfront auswirken würde. Der Rückzug wird innerhalb der nächsten 20 Jahre beginnen und hat möglicherweise bereits eingesetzt.

Ausblick und Schluss

Der Columbiagletscher wird wahrscheinlich in den nächsten Jahrzehnten den grössten Teil seines Ablationsgebietes von über 300 km² Fläche verlieren (vgl. dazu die Gesamtfläche des Grossen Aletschgletschers 1973:86,7 km²). Dabei wird sich ein rund 40 km langer Fjord eröffnen, und 6 km³ Eis in der Form von unzähligen kleinen Eisbergen werden sich im Durchschnitt jährlich ins Meer ergiessen. Die insgesamt abgestossene Eismasse wird die Gesamtmasse der Gletscher in den Schweizer Alpen übersteigen. Um Schlimmstes zu verhüten ist geplant, das Eis zwischen der Columbia Bay und dem Valdez-Arm mit starken Nylon-Tauen zurückzuhalten und damit direkt in den Prince Wil-

Bild 10, links. Suche nach einem eingeschneiten Messpegel mit einer Magnetsonde in der Middle West Branch des insgesamt vier grosse Firnbecken aufweisenden Akkumulationsgebietes des Gletschers. Im Hintergrund Mount Defiant (2544 m, links) und Columbia Peak (2892 m). Aufnahme des Verfassers, 25. 8. 78.

Bild 11, Mitte. Radarsondierung nahe der Firnscheide der Main Branch des Akkumulationsgebietes. Bereits hier ist der Gletscher mehrere hundert Meter dick und erhält jährlich einen Firnzuwachs von rund 10 m Schnee. Im Hintergrund Blackcliff Mountain (3130 m, links) und Sharkstooth Mountain (3521 m). Aufnahme des Verfassers, 9. 9. 78.

Bild 12, rechts. Radarsondierung im untersten Abschnitt der Gletscherzunge, nahe der Kalbungsfront. Der Gletscher fliesst hier mit einer Geschwindigkeit von rund 5 m/Tag und beschleunigt stark zur Kalbungsfront hin, was zur Bildung von ausserordentlich grossen Spalten führt. Im Kreis ein Glaziologe, der auf den Helikopter wartet. Helikopteraufnahme des Verfassers, 4. 9. 78.

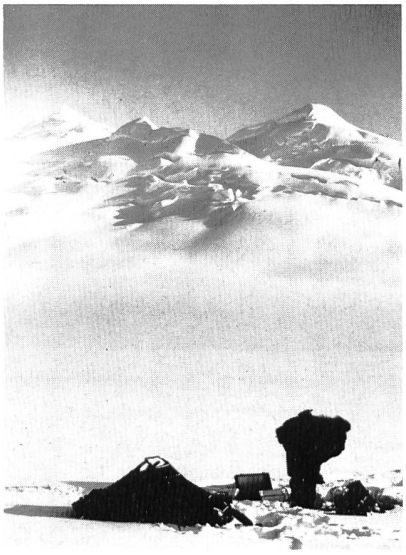
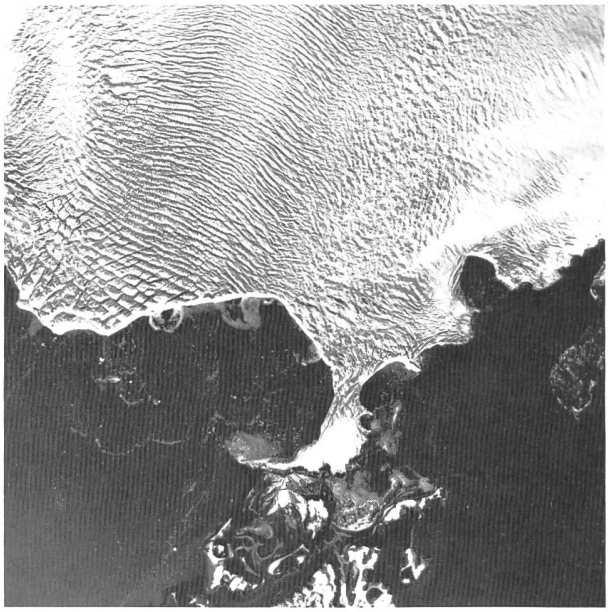
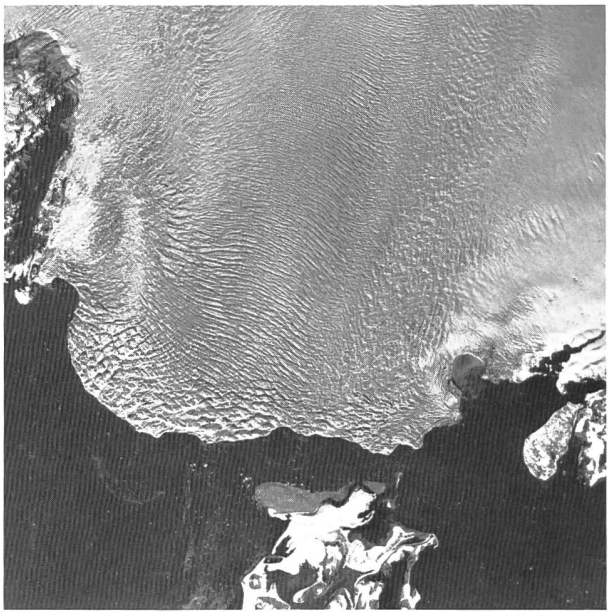


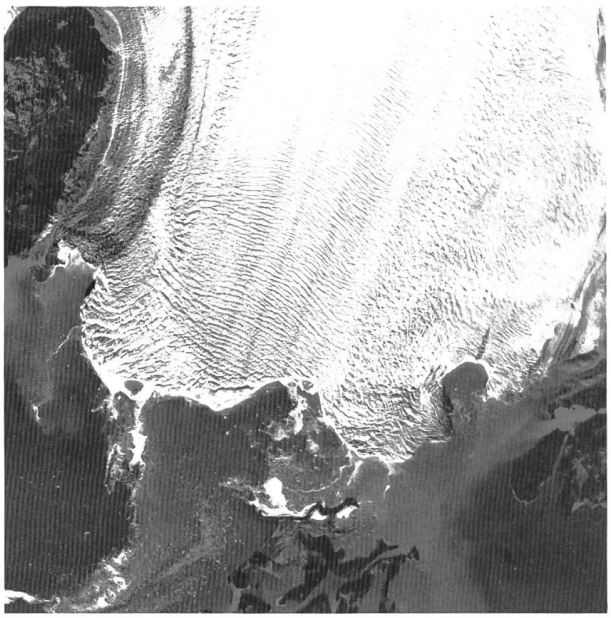
Bild 13, oben. Vertikalaufnahme der Kalbungsfront am 8. 11. 1978: starke Buchtenbildungen beidseits der Insel «Heather Island» (Bildmitte unten) schnüren die Verbindung des Gletschers zur Insel in der Fjordmitte ab.

Bild 14, Mitte. Vertikalaufnahme der Kalbungsfront am 12. 4. 1979: Zum ersten Mal seit Menschengedenken ist die Verbindung zwischen dem Gletscher und Heather Island abgebrochen. Mit beschleunigter Gletscherbewegung (Geschwindigkeitsmaximum im Winter!) hat der Gletscher die Buchten wieder schliessen können, erreicht aber die Insel nicht mehr.

Bild 15, unten. Vertikalaufnahme der Kalbungsfront am 20. 10. 1979: Erneut hat starke Buchtenbildung eingesetzt. Durch das Abreissen der Verbindung Gletscher–Heather Island hat sich die Kontaktfläche Wasser/Eis an der Kalbungsfront drastisch vergrössert. Aufnahmen 13 bis 15: US Geological Survey.







liam Sound zu lenken. Die Kosten für diese Massnahme werden auf über 30 Mio Dollar geschätzt.

Die vorläufige Prognose basiert auf Analogieschlüssen (a), überschlagsmässigen Berechnungen (b) und elementaren Kontinuitätsbetrachtungen (c). Für die Beantwortung der Stabiltitätsfrage erscheint selbst die Extrapolation spärlich dokumentierter zeitlicher Trends (d) sicherer als theoretische Modellrechnungen. Zwischen der Modellrechnung und einer erfolgreichen, konkreten Prognose stehen zwei Missverhältnisse, nämlich das Missverhältnis zwischen der starken Vereinfachung der Modelltheorie und der vollen Komplexität der natürlichen Prozesse (zum Beispiel Mehrdimensionalität) und das Missverhältnis zwischen der für die Modell-Eichung benötigten und der im Feld mit vertretbarem Aufwand erhältlichen Datenmenge (zum Beispiel instationäre Vorgänge wie Seeausbrüche und ihre Auswirkungen auf Wasserdruck und Gletscherbewegung, Bilder 16, 17). Die Modellrechnungen sollen in erster Linie das zeitliche «Szenario» des Rückzugs präzisieren helfen und zum generellen Verständnis des Gletscherverhaltens beitragen. So hat sich gezeigt, dass das beschleunigte Gletscherfliessen gegen die Kalbungsfront hin auf ein Anwachsen der Gleitkomponente der Gletscherbewegung zurückzuführen ist: Da der Wasserspiegel an der Kalbungsfront etwa in der Mitte der Fronthöhe liegt, wird der berechnete Wasserdruck in Kanälen am Gletscherbett im untersten Bereich der Gletscherzunge hinter der Kalbungsfront höher als der Eisdruck; der Gletscher schwimmt also auf einem Wasserfilm. Ein solcher Wasserfilm müsste mit grosser Geschwindigkeit fliessen, könnte dabei Material von der Bergseite der Endmoräne entfernen und auf der Talseite wieder ablagern und damit die Endmoräne langsam vor dem Gletscher her wandern lassen [17]. Da die Endmoräne tatsächlich eine entsprechende Übergussschichtung zeigt [8], lautet die entscheidende Frage: War der Gletscher während der «kleinen Eiszeit» im Gleichgewicht und ist heute zu gross, oder ist er heute im Gleichgewicht, weil er seine Endmoräne damals nicht weit genug hat hinausschieben können? Der Gletscher weiss die Antwort und wird sie uns in den nächsten Jahren geben.

Literatur:

[1] *Liguori, A., Maple, J. A.* and *Heuer, C. E.* (1979): The design and construction of the Alyeska Pipeline. Third International Conference on Permafrost, Proceedings Vol. 2, NRC Canada, p. 151-157.

[2] *Kachadoorian, R.* and *Ferrians, O. J. Jr.* (1973): Permafrost-related engineering geology problems posed by the Trans Alaska Pipeline. Permafrost Second International Conference–North American Contribution, NAS, Washington, D. C., p. 684–687.

[3] *Post, A.* (1969): Distribution of surging glaciers in western North America. "Journal of Glaciology" Vol. 8, No. 53, p. 229–240.

[4] *Péwé, T. L., Ed.* (1965): Guidebook to the quaternary geology–central and southcentral Alaska. VIIth INQUA Congress, reprinted 1977 by State of Alaska, Department of Natural Resources, Division of Geological and Geophysical Surveys, 141 p.

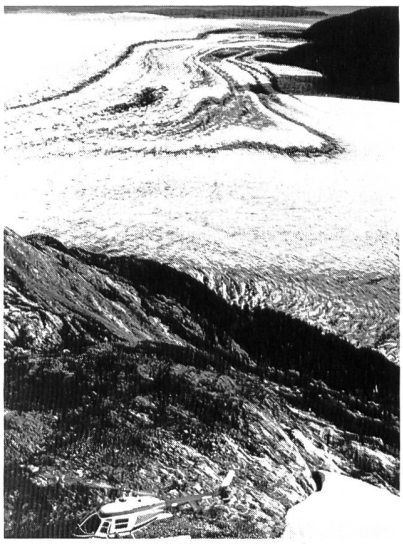


Bild 16, links. Kadin Lake mit einer Oberfläche von 6 bis 7 km² (vgl. Grimselsee: 2,7 km²) wird durch die Zunge des Columbiagletschers gestaut und füllt und entleert sich in mehrjährigen Perioden. Ein Zusammenhang zwischen Seeausbrüchen und Buchtenbildung an der Kalbungsfront scheint wahrscheinlich. Helikopteraufnahme des Verfassers, 2. 9. 78.

Bild 17, rechts. Blick von der Vermessungsstation «Joy» auf die Zunge des Columbiagletschers, Columbia Bay und Heather Island. Im Vordergrund fliesst ein Teil des Gletschers nach rechts in das Seitental des eisgestauten Kadin Lake (vgl. Bild 16). Bei niederem Seespiegel im Seitental ist die Fliesskomponente zum See relativ gross, und es bildet sich ein ausgeprägter Moränenlobus. Bei hohem Wasserstand wird die Fliesskomponente zum See infolge der verringerten Oberflächenneigung kleiner und der Moränenlobus wird vom Hauptgletscher zusammengepresst und mitgezogen. Vorgänge dieser Art mit Perioden von mehreren Jahren konnten weder in den Beobachtungen noch in den Modellen zur Dynamik des Gletschers quantitativ erfasst werden. Aufnahme des Verfassers, 1. 9. 78.

[5] *Sloan, C. E., Zenone, C.* and *Mayo, L. R.* (1976): Icings along the Trans Alaska Pipeline route. US Geological Survey Professional Paper 979, 31 p.

[6] *Post, A.* and *La Chapelle, E. R.* (1971): Glacier ice. University of Toronto Press, 110 p.

[7] *Post, A.* (1975): Preliminary hydrography and historic terminal changes of Columbia Glacier, Alaska. US Geological Survey Hydrological Investigations Atlas HA–559.

[8] The Columbia Glacier Team (1978): Columbia Glacier Progress Report–December 1977. US Geological Survey Open-File Report 78–264, 56 p.

[9] *Hodge, S. M.* (1979): Instability of a calving glacier terminus. "Journal of Glaciology" Vol. 24, No. 90, p. 304 (Abstract).

[10] *Mayo, L. R., Trabant, D. C., March, R.* and *Haeberli, W.* (1979): Columbia Glacier stake location, mass balance, glacier surface altitude, and ice radar data–1978 meausurement year. US Geological Survey Open-File Report 79–1168, 72 p.

[11] *Rasmussen, L. A.* and *Campbell, W. J.* (1973): Comparison of three contemporary flow laws in a three-dimensional time-dependent glacier model. "Journal of Glaciology" Vol. 12, No. 66, p. 361–373.

[12] *Budd, W. F.* and *Jenssen, D.* (1975): Numerical modelling of glacier systems. IAHS–AISH Publication No. 104, p. 257–291.

[13] *Bindschadler, R. A.* (1978): A time-dependent model of temperate glacier flow and its application to predict changes in the surge-type Variegated Glacier during its quiescent phase. Ph. D. Dissertation, University of Washington, Seattle, 245 p.

[14] *Iken, A.* (1977): Movement of a large ice mass before breaking off. "Journal of Glaciology" Vol. 19, No. 81, p. 595–605.

[15] *Röthlisberger, H.* (1972): Water pressure in intra- and subglacial channels. "Journal of Glaciology" Vol. 11, No. 62, p. 177–203.

[16] *Meier, M. F., Post, A., Rasmussen, L. A., Sikonia, W. G.* and *Mayo, L. R.* (1979): Retreat of Columbia Glacier, Alaska–a preliminary prediction, US Geological Survey Open-File Report 80–10, 11 p.

[17] *Bindschadler, R. A.* (unveröffentlicht): Subglacial erosion of the terminal shoal of a tidewater glacier. Druck in Vorbereitung.

[18] *Meier, M. F., Rasmussen, L. A., Post, A., Brown, C. S., Bindschadler, R. A., Mayo, L. R., Trabant, D. C.* and *Sikonia, W. G.* (im Druck): Predicted timing of the disintegration of the lower reach of Columbia Glacier, Alaska. US Geological Survey Open-File Report.

Nachsatz

Während der Drucklegung dieses Aufsatzes abgeschlossene Modellrechnungen [18] deuten darauf hin, dass der Columbiagletscher sich bis 1986 um 8 km zurückziehen und dabei bis zu 11 km³ Eis/Jahr abstossen wird.

Adresse des Verfassers: Dr. *W. Haeberli,* Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Die Sanierung der Schweizer Gewässer erfordert weitere Anstrengungen

Heinz Ambühl

1967 hiess es «Halbzeit im Gewässerschutz». Das bedeutete, dass die Gewässerschutzanlagen, Kanalisationen und Kläranlagen soweit ausgebaut, im Bau und baureif projektiert waren, dass 50% aller anzuschliessenden Einwohner hätten angeschlossen werden können, damals ein Markstein für den Fortschritt der baulichen Massnahmen. Die Wasserqualität, die es dadurch zu verbessern galt, kam erst in zweiter Linie; sie hätte sich bei den damals noch extremen Unterschieden zwischen den einzelnen Gewässern und Regionen auch kaum dafür geeignet, dem Gesamtwerk eine Note zu erteilen.

Die Statistik der kommunalen Abwasserreinigung in der Schweiz für 1979 sagt aus, dass die Abwassersammel- und -reinigungsanlagen soweit ausgebaut sind, dass 80% aller anfallenden Einwohnergleichwerte angeschlossen und gereinigt werden können.

Diese Zahl ist ein stolzer Ausweis für das Ausmass, in dem die technischen Auflagen der Gesetze und Verordnungen bis heute erfüllt worden sind. Über die Auswirkungen auf die Gewässerqualität sagt sie aber quantitativ nichts aus. Natürlich dürfen wir annehmen, dass die steigende Anschlusszahl die Abwasserbelastung sinken lässt und sich die mittlere Gewässerqualität dadurch verbessert.