

**High Alpine lake sediments as chronicles for regional  
glacier and climate history in the Upper Engadine,  
southeastern Switzerland**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZÜRICH

for the degree of  
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

Presented by

Christian Ohlendorf  
Diplom Geologe, Universität Göttingen  
born April 26. 1966  
in Buchholz i.d.N., Germany

Accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. H. Weissert, ETH Zürich, Examiner  
Dr. M. Sturm, EAWAG, Dübendorf, Co-examiner  
Dr. F. Niessen, AWI, Bremerhaven, Co-examiner

# Abstract

The laminated siliciclastic sediments of four glacier fed lakes located in a high Alpine valley (Upper Engadine) in the central Alps of southeastern Switzerland record environmental changes in a high resolution mode. Physical, chemical and mineralogical sediment properties were investigated in the present study, in order to trace these changes. The study focuses on the varved Neoglacial sediments of Lej da Silvaplauna and the laminated Late Glacial sediments of Lej da Champfèr. Forcing factors on varve formation are identified by an analysis of the modern sediments and rates of glacier size change are estimated for the Late Glacial. A model that links Late Glacial sediment accumulation rates to changes in the mode of glacier movement is proposed.

The annually laminated sediments of Lej da Silvaplauna, were compared with glacier monitoring data and instrumental climate data from AD 1864 to 1990. Long-term and short-term responses to climatic change as well as anthropogenic influence can be traced separately in the varve succession. Economic development in the lake's catchment has resulted in higher autochthonous production in the last 30 years. Autochthonous components contribute around 10% to the total amount of sediment accumulated annually since 1960 but their contribution is negligible before this date. Decadal-scale trends in annual mass accumulation rates (MAR) correlate with glacier size-variations. A stepwise, running multiple regression analysis demonstrates that interannual changes in MAR are strongly correlated with changes in mean summer temperatures, but cannot be sufficiently explained without considering summer precipitation and the number of days with snow per year. There is a ~50% probability that a given fluctuation in MAR is caused by a summer temperature anomaly. The wide range of observed correlation coefficients reveals the sensitivity of the archive to temporal variability of the climatic forcing factors. Together with a possibly non-linear response of the MAR signal to climate forcing this makes the development of transfer functions ambiguous. In a qualitative way a comparison with Swiss and European climate archives demonstrated that in most cases MAR anomalies reflect meteorological extreme conditions that are detectable on a regional scale and perhaps linked to large scale atmospheric circulation of western Europe.

To estimate the influence of rainfall on sediment accumulation, for selected samples the concentration of main and trace elements, magnetic properties and the mineral composition was determined. None of these parameters allows quantitative estimates about the contribution of rainfall derived material to MAR on an annual basis. It is suggested that for high resolution studies magnetic tracers offer the highest potential if they can be calibrated with other tracers. The possibility of an early hu-

man impact on sediment accumulation should be investigated further. XRD-analyses of river sediments and turbidites in the Holocene sequence of Lej da Silvaplauna indicate that mineralogical tracers can be employed to identify sediment sources in the geologically diverse catchment.

In all 4 Upper Engadine lakes a drastic lithologic change marks the cessation of glacial meltwater input. Evidence is presented, that this did not happen simultaneously in all lakes. Probably Lej da S. Murezzan received meltwaters 500 years longer than two of the upstream lakes.

In 6.5 m of continuously laminated Late Glacial sediments from Lej da Champfèr physical, chemical and mineralogical sediment properties were analyzed. A preliminary, floating chronology is proposed for the sediments that is based on the counting of layer couplets. Reduced sediment median grainsize in accordance with existing models is viewed as a tracer for an increased catchment glaciation. The tentative Late Glacial MAR variations disagree with the existing model, which indicates a different way of glacier movement for the larger Late Glacial glaciers. A model is proposed that ascribes low MAR that occur during maximum catchment glaciation to reduced basal shear stress (reduced erosion capacity) of cold glaciers, which is indicative of a cold, arid continental climate. Such conditions are proposed for the first 450 and the last 150 years of the YD cold interval.

Sediment mineralogy was used to trace the positions and rates of movement of Late Glacial catchment glaciers. Mineralogical changes in Lej da Champfèr sediments apparently to a large extent are influenced by the glaciers in the southeastern catchment that meet contrasting lithologies on an advance. With reservation to changes in the chronology by combining grainsize and mineralogical tracers, rates of glacier size change were calculated. Accordingly it is suggested that glaciers retreated very rapidly from their YD maximum positions within 30-50 years at a rate of 70-120 m/yr which is 5-10 times faster than for the retreat from LIA positions (13 m/yr). Moreover, all tracers indicate that the YD was not a uniform cold interval. Regarding interannual variability the comparison with recent sediments reveals that the second half of the YD is punctuated by several events of unusually high MAR. This might reflect a more instable climate with larger oscillations in temperature and/or precipitation.

# Zusammenfassung

In den laminierten, siliziklastischen Sedimenten von vier, in einem zentralalpinen Hochtal (Oberengadin) der südöstlichen schweizer Alpen gelegenen und von glazialen Schmelzwässern gespiesenen Seen, sind Umweltveränderungen mit hoher zeitlicher Auflösung aufgezeichnet. In dieser Arbeit wurden physikalische, chemische und mineralogische Sedimenteigenschaften untersucht, um diese Veränderungen nachzuzeichnen. Gegenstand dieser Arbeit sind die gewarvten neoglazialen Sedimente des Lej da Silvaplauna, sowie die laminierten spätglazialen Sedimente des Lej da Champfèr. Durch eine Analyse der rezenten Sedimente werden Faktoren, die die Warvenbildung beeinflussen, ermittelt. Die Geschwindigkeit von Veränderungen der Gletschergrössen wird für das Spätglazial abgeschätzt.

Die jahresweise geschichteten Sedimente des Lej da Silvaplauna wurden für den Zeitraum AD 1964-1990 mit Daten über die Zungenlängenänderung von Gletschern, sowie mit instrumentell erhobenen Klimadaten verglichen. Sowohl langfristige als auch kurzfristige Reaktionen auf Klimaveränderungen und anthropogene Einflüsse können in der Warvenabfolge getrennt voneinander verfolgt werden. Die wirtschaftliche Entwicklung im Einzugsgebiet des Lej da Silvaplauna hat in den letzten 30 Jahren zu einer erhöhten autochthonen Produktion geführt. Autochthone Sedimentbestandteile haben seit 1960 einen Anteil von etwa 10% an der Gesamtmenge des pro Jahr akkumulierten Sedimentes. Vor 1960 ist ihr Anteil vernachlässigbar. Auf der Zeitskala von Jahrzehnten korrelieren die Sediment-Akkumulationsraten (MAR) mit Änderungen der Gletschergrösse. Eine schrittweise durchgeführte, gleitende, multiple Regressions-Analyse zeigt, dass die jährlichen Schwankungen der MAR zwar stark mit Schwankungen der mittleren Sommertemperatur korreliert sind. Jedoch können MAR-Schwankungen nicht ausreichend erklärt werden, wenn nicht Sommerniederschlag und die Anzahl der Tage pro Jahr mit Schneefall mit berücksichtigt werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine MAR-Schwankung durch eine Anomalie der mittleren Sommertemperatur verursacht wurde, beträgt ca. 50%. Die grosse Schwankungsbreite der ermittelten Korrelationskoeffizienten zeigt, dass das Sedimentarchiv sehr sensibel auf zeitliche Veränderungen der Einflussgrössen reagiert. Diese Tatsache, zusammen mit einer möglicherweise nicht linearen Reaktion des MAR-Signals auf Klimaveränderungen, schliesst die Entwicklung von Transferfunktionen aus. Ein qualitativer Vergleich des Sedimentarchives mit schweizer und europäischen Klimaarchiven zeigt, dass MAR-Anomalien in den meisten Fällen meteorologische Extrembedingungen widerspiegeln, die ein regionales Ausmass hatten und deshalb wahrscheinlich mit Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation über Westeuropa zusammenhängen.

Um den Einfluss des Niederschlags auf die Sedimentakkumulation (MAR) abzuschätzen, wurde an ausgewählten Proben die Konzentration von Haupt- und Spurenelementen magnetische Eigenschaften und die Mineralzusammensetzung bestimmt. Keiner dieser Parameter erlaubt es, quantitative Angaben über den Beitrag von durch Niederschläge erodierten Material zur MAR mit jahresweiser Auflösung zu machen. Für hochauflösende Studien scheinen magnetische Eigenschaften am geeignetsten zu sein, wenn sie mit anderen Parametern kalibriert werden können. Die Möglichkeit eines frühen anthropogenen Einflusses auf die Sedimentakkumulation sollte eingehender untersucht werden. Die röntgendiffraktometrische Analyse von Flusssedimenten und Turbiditen in der holozänen Sedimentabfolge vom Lej da Silvaplauna zeigt, dass die Mineralzusammensetzung dazu benutzt werden kann, Sedimentquellen in dem geologisch sehr diversen Einzugsgebiet der Seen, zu identifizieren.

In allen 4 Oberengadiner Seen markiert ein drastischer Lithologiewechsel das Ende des Eintrags von glazialen Schmelzwässern. Es werden Indizien vorgestellt, die darauf hindeuten, dass dieses Ereignis nicht in allen Seen gleichzeitig stattfand. Möglicherweise wurde der Lej da S. Murezzan 500 Jahre länger von Schmelzwässern beeinflusst als zwei der stromaufwärts gelegenen Seen.

In 6,5 m durchgehend laminierten spätglazialen Sedimenten aus dem Lej da Champfèr wurden physikalische, chemische und mineralogische Sedimenteigenschaften untersucht. Basierend auf der Zählung von Warven wird eine vorläufige Chronologie der Sedimente vorgeschlagen. In Anlehnung an existierende Modelle werden reduzierte Korngrößen-median Werte als Phasen ausgedehnter Vergletscherung des Einzugsgebietes interpretiert. Die vorläufigen spätglazialen MAR-Veränderungen stimmen nicht mit den existierenden Modellen überein. Dies ist ein Hinweis darauf, dass sich die grösseren spätglazialen Gletscher anders bewegten als die heutigen. Ein Modell, dass die kleinen MAR während Phasen ausgedehnter Vergletscherung mit einer Reduktion der basalen Schubspannung (reduziertes Erosionsvermögen) in Verbindung bringt wird präsentiert. Reduzierte basale Schubspannungen werden bei kalten Gletscher in kalt-aridem, kontinentalen Klima beobachtet. Aufgrund des MAR Befundes werden solche Bedingungen für die ersten 450 und die letzten 150 Jahre der Jüngeren Dryas angenommen.

Die Mineralzusammensetzung der Sedimente wurde benutzt, um Positionen und Veränderungsdaten der spätglazialen Gletscher zu rekonstruieren. In den spätglazialen Sedimenten des Lej da Champfèr wird die Mineralzusammensetzung stark durch die Gletscher im südöstlichen Einzugsgebiet beeinflusst, die bei einem Vorstoss sehr unterschiedliche Lithologien erodieren. Vorbehaltlich Veränderungen in der Chronologie wurden Grössenveränderungen der Gletscher aus Veränderungen

der Korngrösse und der Mineralogie der Sedimente abgeleitet. Hieraus ergibt sich, dass die Gletscher sich sehr schnell, innerhalb von 30 bis 50 Jahren, mit einer Rate von 70 -120 m/a von ihrem Maximalstand, den sie in der jüngeren Dryas erreichten, zurückzogen. Dies ist 5-10 mal schneller als für den Rückzug vom Maximalstand der kleinen Eiszeit (13 m/a). Alle gemessenen Parameter weisen darauf hin, dass die Jüngere Dryas keine homogene Kaltphase war. Wenn spätglaziale interannuelle MAR-Veränderungen mit denen rezenter Sedimente verglichen werden fällt auf, dass die zweite Hälfte der Jüngern Dryas durch einige Ereignisse ungewöhnlich hoher MAR gekennzeichnet ist. Dies könnte auf ein instabiles Klima mit grösseren Temperatur und/oder Niederschlagsschwankungen hindeuten.

# Reassunt

Ils sedimaints laminats siliciclastics da quatter lais da l'Engiandin'Ota, tuots spisgiantats d'auas da vadret, documenteschans müdamaints da l'ambient da cuorta d'urada. In quista lavur sun gnüds stübgjads ils sedimaints, ed inpustüt sedimaints cun varvas neoglacias dal Lej da Silvaplauna e sedimaints laminats dal temp glacial tardiv dal Lej da Champfèr cun metodus fisicalas, chemicalas, e mineralogicas. Quistas metodus permettan da documentar variaziuns aint ils sedimaints, e da stübgjar ils facturs chi influenzeschan la fuormaziun da varvas. Inplü vegna inprovà da quantifichar la sveltezza cun la quala ils vadrets han müdà lur grandezza d'urant il temp glacial tardiv.

La laminaziun annuala aint ils sedimaints dal Lej da Silvaplauna es gnüda congualada cun il müdamaint da la lunghezza dals vadrets e cun datas da clima masüradas pels ons 1964 fin 1990. Aint illas varvas as poja disferenzchar reacziuns sün müdamaints da clima e influenzas antropologicas da differenta d'urada. La prosperaziun economica aint illa regiun d'inchasch dal Lej da Silvaplauna ha manà aint ils ultims 30 ons ad ün augmànt da la producziun da material autochton. La part da material autochton han agiunt daspö il 1960 il 10% dal sedimaint accumulà d'uront tuot l'on. Avant l'on 1960 es quista part negligibla. Sur decennis dad ons correlescha la rata d'accumulaziun da sedimaints (RAS) cul müdamaint da la grondezza dals vadrets. Üna analisa da regressiun multipla, fatta pass per pass, muossa cha las variaziuns annualas da la RAS correleschan fermamaing cun variaziuns da la temperatura mezdana da stà. Però i nu poulan gnir spiegadas las variaziuns in möd chi cuntantescha, sainza resguardar la plövgia da stà e'l number da dis d'uront l'on chi ha naivü. La probabiltà ch'üna variaziun da la RAS es la causa d'üna anomalia da la temperatura mezdana da stà es intuorn da var 50%. La gronda variaziun dals coefficients da correlaziun muossan, cha l'archiv da sedimaints es fich sensitiv sün variaziuns temporalas dals facturs ils plü importants. Quist fat, insembel cun la reacziun probabelmaing na lineara dal signal da la RAS sün müdamaints da clima, nu permetta da douvrrar funcziuns da transfer. Ün cungal qualitativ da l'archiv da sedimaints cun archivs da clima Svizzers e Europeans muossa, cha las bleras anomalias da la RAS represchaintan condiziuns metrologicas extremas chi han gnü üna dimensiun regionala e stan perque in connex cun müdamaints da la circulaziun aint ill'atmosfera sur l'Europa occidentala.

Per pudair valütar l'influenza da la precipitaziun sün l'accumulaziun da sedimaints sun gnüdas masüradas las concentraziuns dals elemaints principals e'ls elemaints da stizis, il character magnetic e la composiziun mineralogica da muostras selecziunadas da sedimaint. Ningün da quists parameters nu permetta da quantifichar

l'erosiun chi pertocca a la RAS chaschunà tras la precipitaziun düront l'on. Per stüdis fich precis para d'esser il caracter magnetic il plü adat, però be scha las datas poulan gnir calibradas cun oter parameters. Las pussibilitats d'ün'influenza antopogena anticipada sün l'accumulaziun da sedimaints stuess gnir stübgia plü precis. L'analisa da diffractometria cun razz da röntgen dals sedimaints da flüm e da turbidits da las vettas dal Holocen dal Lej da Silvaplauna muossa cha la composiziun mineralogica po gnir dovrada per identifichar la funtana dals sedimaints our da la regiun d'inchasch dal lai, üna zona chi es our dal punct da vista geologic fich cumplichada.

In tuot ils 4 lais da l'Engiadin'Ota documentescha ün müdamaint drastic da la composiziun dals sedimaints la finischun da l'inchasch d'aua da vadret. I vegnan preschantadas indicaziuns, chi muossan cha quists evenimaints nu chattan lö aint in mincha lai aint il listess mumaint. Probabelmaing ha survgni il Lej da S. Murezzan per var 500 ons plü lönch aua da vadret sco ils lais situats plü insü aint illa val.

Aint in ün minz continuond da 6.5 m da sedimaints laminats dal temp glacial tardiv dal Lej da Champfèr sun gnü fats stüdis da'l caracter fisical, chemical e mineralogic dals sedimaints. Sülla basa da la dombraziun da varvas vegn proponü üna cronologia preliminar dals sedimaints. In vista a models existents es la reducziun da la grandezza mediana da partikels da sedimaint interpretada sco fasas da grond'extensiun da vadrets aint illa regiun d'inchasch. Ils müdamaints preliminaris dal temp glacial tardiv da la RAS corresponda cun models existants. Quist fat muossa cha'ls vadrets gronds dal temp glacial tardiv as schmuvaiva in different möd da quels d'hoz. Ün model chi cumbinescha las RAS plü pitschnas düront temps da grond'extensiun da vadrets cun üna reducziun da la tensiun basala (main erosiun dal vadret) vegn preschantà. Üna reducziun da la tensiun basala chatta lö pro vadrets fraids aint in ün clima fraid-arid continental. A man da las valurs da la RAS vegnan proponüdas condiziuns sco talas per ils prüms 450 e'ls ultims 150 ons dal temp da la Dryas Giuvna.

La composiziun mineralogica dals sedimaints vegn dovrada per reconstruir posiziuns e ratas da müdamaints dals vadrets dal temp galcial tardiv. Aint ils sedimaints dal temp galcial tardiv dal Lej da Champfèr vegn influenzada la composiziun mineralogica fermamaing dals vadrets aint illa regiun d'inchasch meridiunal, chi erodescha pro ün avanzamaint dal vadret fich differentas litologias. Cun l'agüd da la cronologia e dal müdamaint da la grandezza dals partikels e da la mineralogia dals sedimaints sun gnüdas interpretadas variaziuns da la grandezza da vadrets. Ils resultats muossan cha'ls vadrets as han retrats fich svelts, infra 30 fin 50 ons, cun üna rata da 70 fin 120 meters l'on da lur stadi maximal chi vaivan raggiunt düront il temp da la Dryas Giuvna. Quist es var 5 fin 10 jadas plü svelts sco la retratta



dal stadi maximal düront l'ultim temp pitschen da glatsch (13 meters l'on). Tuot ils parameters masürats demuossan cha'l temp da la Dryas Giuvna nu d'eira üna fasa freida homogena. Scha müdamaints dal la RAS interanuals aint il temp galcial tardiv vegnan cungalats cun quels da sedimaints recents, schi's vezza cha la seguonda metà dal temp da la Dryas Giuvna es caracterisada tras evenimaints insolits da fich otas RAS. Quist pudess esser ün'indicaziun sün ün clima instabil cun grondas variaziuns da temperatura e/o precipitaziun.