

Bericht: Sedimentanalysen des Kalterer Sees



Markus Niederstätter und Jasper Moernaut

Institut für Geologie, Universität Innsbruck

Innsbruck, 2024

Zusammenfassung

Die sedimentgeologische Studie am Kalterer See wurde durchgeführt, um das Sedimentationsgeschehen in verschiedenen Bereichen des Sees zu untersuchen. Durch Beprobung mittels Kurzbohrkernen konnten allgemeine physikalische und chemische Sedimenteigenschaften erhoben werden und Sedimentationsraten in der letzten ~80 bzw. der letzten ~800 Jahre bestimmt werden. Dabei kann ein deutlicher Unterschied zwischen der Sedimentation von ~1200 bis ~1960 Jahre n.Chr. und der rezenten Sedimentation (~1960 bis heute) beobachtet werden. Vor allem, ist ein deutlicher Anstieg der Sedimentationsrate von 0.53-0.74 mm/Jahr auf 2.1-5.78 mm/Jahr erkennbar, und zwar vor allem in den nördlichen Uferbereichen. Des Weiteren wurden Sub-bottom Profile erstellt, mit welchen jedoch aufgrund des hohen Gasgehalts im Sediment nur oberflächennahe Sedimentlagen visualisiert, werden konnten. Dennoch wurde damit die Wassertiefe entlang der Linien ermittelt.

Methoden:

Sub-bottom Profiling

Sub-bottom Profiling wurde mit einem GEOPULSE Pinger (3.5kHz) durchgeführt um die Gesamtmächtigkeit der Sedimente im Kalterer See zu erheben. In den erhaltenen hydroakustischen Profilen, welche über die gesamte Fläche des Sees verlaufen (Abb. 1), wird allerdings nur der Seeboden abgebildet. Die schwache Eindringtiefe des akustischen Signals ist auf das Vorhandensein von Gas im Sediment zurückzuführen (Abb. 2). Dennoch konnte entlang der sub-bottom Profile die Wassertiefe bestimmt werden, um diese mit der alten Tiefenkarte von 1977 zu vergleichen. Dafür wurde der Seeboden als „Horizon“ in der Software IHS Markit Kingdom 2022 markiert und die Tiefe berechnet (Schallgeschwindigkeit in ~15°C Wassertemperatur ~ 1466 m/s). Genauere Details über das Sub-Bottom Profiling am Kalterer See befinden sich im Bericht der Feldarbeit.

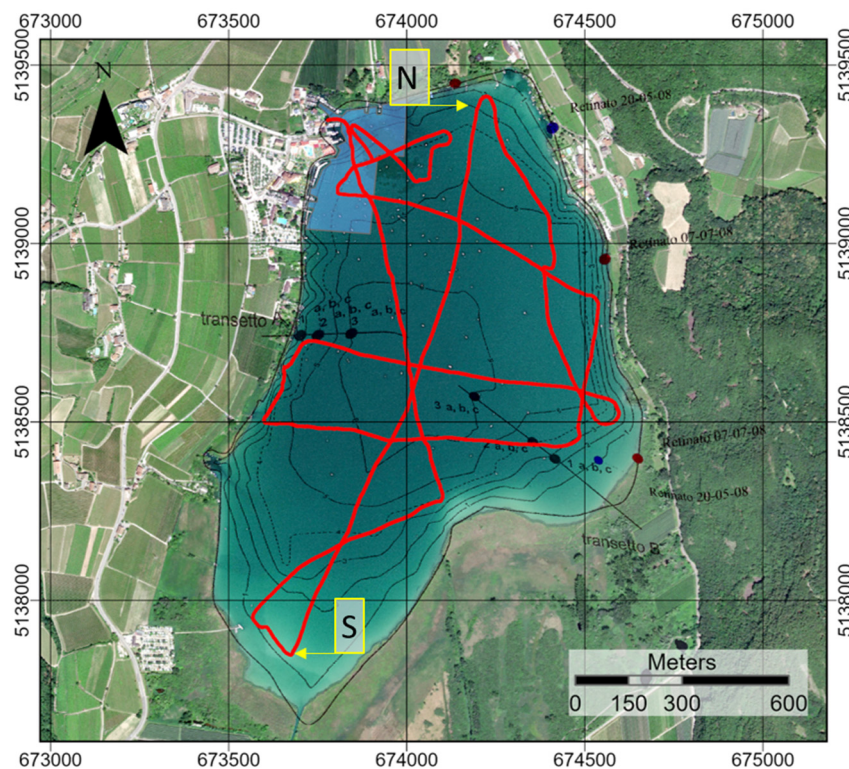


Abbildung 1: Linien an denen Sub-Bottom Profile erstellt wurden. Das Profil in Abbildung 2 verläuft von S nach N. Koordinatensystem: WGS 1984 UTM Zone 32N. Bathymetrie aus (Didonè, 2008)

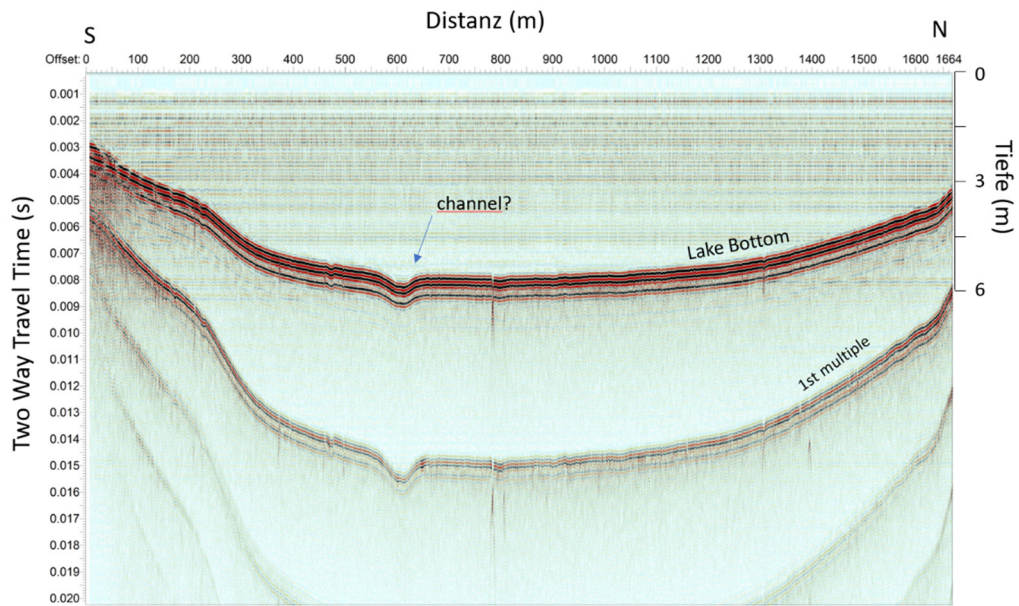


Abbildung 2: Sub-Bottom Profil, welches den Seeboden und die obersten ~ 0.5 m des Sediments zeigt. Mulden sind zu sehen, welche auf kleine Kanäle hinweisen könnten. Das Profil verläuft von S nach N, wie in Abbildung 1 angezeigt.

Kernentnahme:

15 Oberflächen-Kerne wurden entnommen um die obersten Sedimentschichten und den Übergang zwischen Sediment und Wasser zu beproben (Abb. 3). Dafür wurde ein UWITEC Surface Corer (USC 06000) verwendet, mit welchem in ~60cm lange und 9cm breite PVC-Zylindern Sediment beprobt wird.

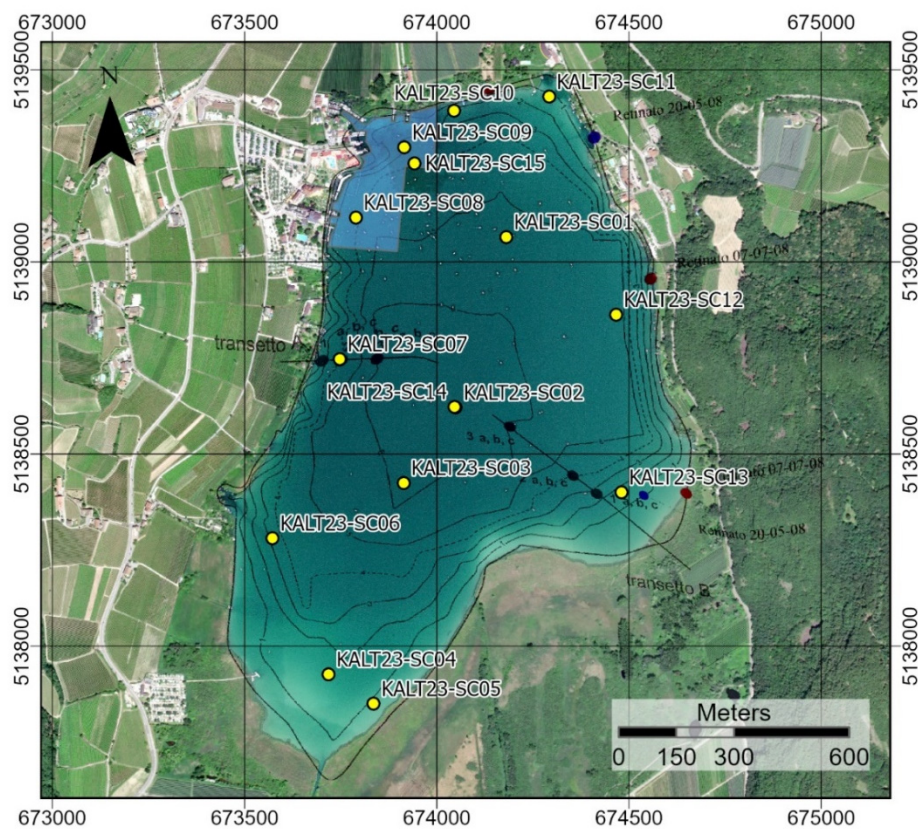


Abbildung 3: Kernentnahmestellen der Oberflächenkerne. Koordinatensystem: WGS 1984 UTM Zone 32N.

Des Weiteren wurden 11 Kurzkerne mit einem „Hammer-Gravity-Corer System (BOB-corer)“ genommen (Abb. 4). Dabei wird das Sediment in 1-1,5m langen und ~6cm breiten PVC-Zylindern beprobt. Mehr zur Kernentnahme am Kalterer See im Bericht der Feldarbeit.

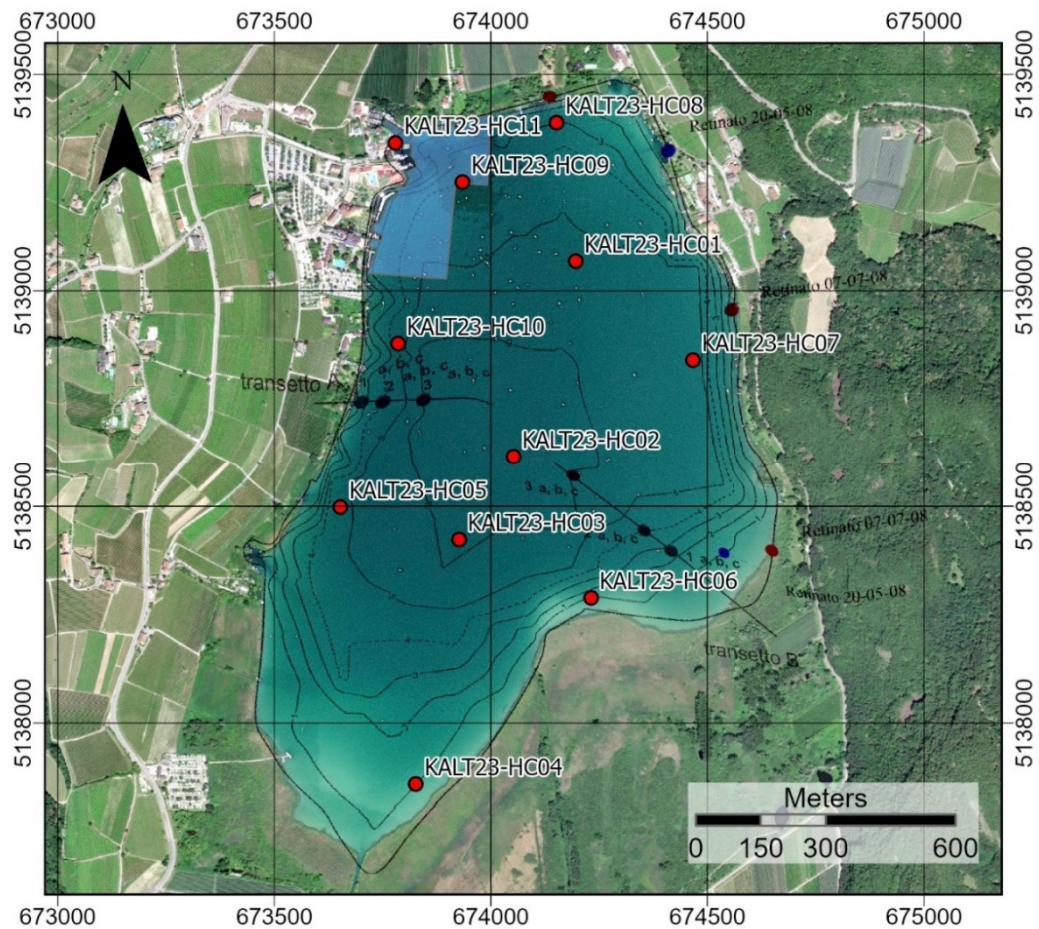


Abbildung 4: Kernentnahmestellen der Hammer-Kerne. Koordinatensystem: WGS 1984 UTM Zone 32N

CT-, MSCL- und XRF-Scans

Vor dem Öffnen wurde von allen Kernen eine Computertomographie (CT) Scan an der Medizinischen Universität Innsbruck mit einem Siemens SOMATOM Definition AS (Voxel Größe von $0.2 \times 0.2 \times 0.3 \text{ mm}$) durchgeführt. Dabei können sedimentäre Strukturen und Variationen in der Dichte besser erkannt werden, was später bei der Kern-Korrelation hilfreich ist.

Anschließend wurden die geschlossenen Kerne mit einem Geotek Multi-Sensor-Core-Logger mit einer Auflösung von 0.2 cm gescannt um die Dichte aus der Dämpfung der Gamma Strahlung (Gamma attenuation bulk Density) für verschiedene Kerntiefen zu erhalten.

Anschließend wurden die Kerne HC02, HC03, HC05, HC08 und HC11 geöffnet und mit dem SmartCube Core Imaging System mit einer Auflösung von 500dpi fotografiert.

Mit einem COX Analytics ITRAX μ -XRF-Scanner wurde eine hochauflösende elementchemische Charakterisierung der Kerne HC05, HC02 und HC08 durchgeführt. Dafür wurde das Setup mit einer Cr-Röntgenröhre, welche auf 30kV und 55mA eingestellt wurde. Es wurden Messintervalle von 1mm und Messdauer von 10 Sekunden gewählt. Anschließend wurden Elemente mit guter „Signal to Noise-Ratio“ ausgewählt und die Rohdaten des XRF-scans „centered-log-ratio“ (clr) transformiert um Änderungen der physikalischen Eigenschaften (Wassergehalt oder Korngröße) entlang des Kerns zu umgehen (Weltje & Tjallingii, 2008; Weltje et al., 2015).

Kernkorrelation, Sedimentdatierung und Bestimmung der Sedimentationsraten

Für das rezente Sedimentationsgeschehen der letzten ~ 80 Jahre wurden die Oberflächenkerne (SC01-SC15) anhand von CT-scans, welche lithologische Wechsel in Form von Dichteunterschieden sichtbar machen (Siehe z.B. SC14 CT- und optischen Bild, Abb. 5), miteinander korreliert. Dadurch sollte herausgefunden werden ob Sedimentationsraten zwischen den Kernen aus verschiedenen Bereichen des Sees übertragen werden können. Für eine hochaufgelöste Datierung der rezenten Sedimente mittels ^{210}Pb und ^{137}Cs Messungen wurde der Kern KALT23-SC14 in 5mm Intervallen bis 25cm beprobt. Die Pb/Cs Messungen wurden an der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) in Dübendorf (Schweiz) durchgeführt. Daraus wurden mit dem R package SERAC (Bruehl & Sabatier, 2020) durch Anwendung des CFCS ^{210}Pb Modells (Appleby, P.G. and Oldfield, F., 1992 und Referenzen darin) Sedimentationsraten für die obersten 25 cm berechnet. Diese wurden mit den ^{137}Cs Peaks für Chernobyl (1986) und Nuklearwaffentests (1963) validiert. Die so ermittelte Sedimentationsrate für die letzten ~ 60 Jahre wurde über die Kern-Korrelation auf die anderen Oberflächenkerne extrapoliert. Bei Oberflächenkernen kommt es zu relativ geringer Verdichtung des Sediments bei der Kernentnahme. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass die daraus ermittelten Sedimentationsraten nahe an den wahren Sedimentationsraten der oberflächennahen Sedimente liegen.

Zur Bestimmung der durchschnittlichen Sedimentationsraten über den Zeitraum der ~ 800 Jahre vor 1960 (1187 bis 1960) wurden die Kerne (HC01-HC11) miteinander korreliert um herauszufinden ob Sedimentationsraten zwischen den Kernen aus verschiedenen Bereichen des Sees übertragen werden können. Diese Kern-Korrelation wurde anhand von CT- und optischen (teils von der SmartCube-Kamera und teils vom ITRAX-XRF scan) Kernbildern durchgeführt. Da eine Korrelation zwischen allen Kernen gemacht werden konnte, wurde die Beprobung für die Radiokarbondatierung zuerst an den Kernen im tiefsten Bereich des Sees durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass nur sehr wenig organisches Material, welches sich für eine ^{14}C Datierung eignen würde gefunden werden kann. Deshalb wurde der Kern HC05, nahe am westlichen Seeufer, geöffnet und Blattreste in einer Tiefe von 72 cm und 108 cm entnommen, die zur Datierung an das „Laboratory for Ion Beam Physics“ der ETH Zürich geschickt wurden. Die Roh-Alter wurden mit der Kalibrationskurve Intcal20 (Reimer et al., 2020) kalibriert und

zusammen mit Altersinformationen der ^{210}Pb und ^{137}Cs Datierung verwendet, um ein Alter-Tiefen Model mittels der R-software Bacon v.2.4.3. (Blaauw & Christen, 2011) für diesen Kern zu erstellen. Um die Altersinformation des Oberflächenkerns SC14 auf den Hammerkern HC05 zu übertragen wurden diese mittel CT- und optischen Bildern korreliert (Abb. 8). Da es in den Hammer Kernen grundsätzlich zu höherer Verdichtung des Sediments als in den Oberflächenkernen kommen kann, ist die daraus ermittelte Sedimentationsrate vor allem in den oberflächennahen Sedimenten eher zu niedrig.

Ergebnisse:

^{210}Pb und ^{137}Cs Datierung

Aus den gemessenen Aktivitäten des ^{210}Pb Überschusses ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ mBq g $^{-1}$) wurde eine mittlere Sedimentationsrate von 3.27 mm/Jahr für die letzten ~80 Jahre berechnet (Abb. 5). Diese wurde mit den ^{137}Cs Peaks durch Chernobyl (1986) und Nuklearwaffentests (1963) verifiziert. Aufgrund der starken Bioturbation sind diese Peaks zwar verschwommen, aber dennoch deutlich erkennbar. Die Bioturbation ist auch für die größeren Abweichungen der ^{210}Pb Werte ab ~100 mm Sedimenttiefe verantwortlich. Daher hat die berechnete Sedimentationsrate einen Fehler von 0.46 mm/Jahr.

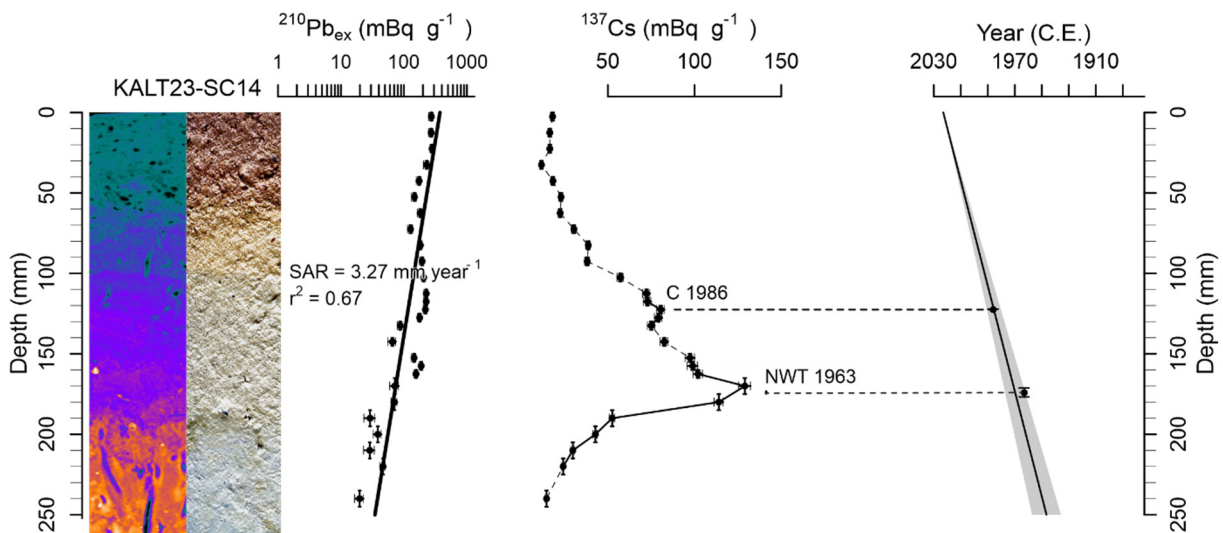


Abbildung 5: ^{210}Pb und ^{137}Cs Profile des Kerns KALT23-SC14. Das mit dem CFCs Modell berechnete Alters-Tiefen Diagramm hat eine mittlere Sedimentationsrate von 3.27 mm/Jahr

Kern-Korrelation Oberflächenkerne

Die Oberflächenkerne konnten über den ganzen See vor allem aufgrund der obersten Lage mit sehr geringer CT-dichte und der lithologischen Grenze zwischen gelblich grauem weniger dichtem und grauem dichteren Sediment (In SC14 Tiefe von ca. 20cm) korreliert werden (Abb. 6). Diesem lithologischen Wechsel kann basierend auf dem Pb/Cs Profilen das Jahr 1960 ± 10 zugeordnet werden. Aus der variierenden Mächtigkeit der darüberliegenden Sedimente zwischen 13 und 34 cm variiert, wurde für jeden Kern eine durchschnittliche Sedimentationsrate zwischen 2.10 mm/Jahr und 5.48 mm/Jahr berechnet. Aufgrund des Fehlers der Sedimentationsrate aus dem Pb/Cs Model (Abb. 5) von 0.46 mm/Jahr und der Extrapolation durch Korrelation bei der die Tiefe des Lithologischen Wechsels nur auf den Zentimeter genau gemessen werden kann, haben die durchschnittlichen Sedimentationsraten einen Fehler von ~ 0.5 mm/Jahr. Die Sedimentationsraten der letzten ~ 60 Jahre sind auf der Karte in Abbildung 7 visualisiert.

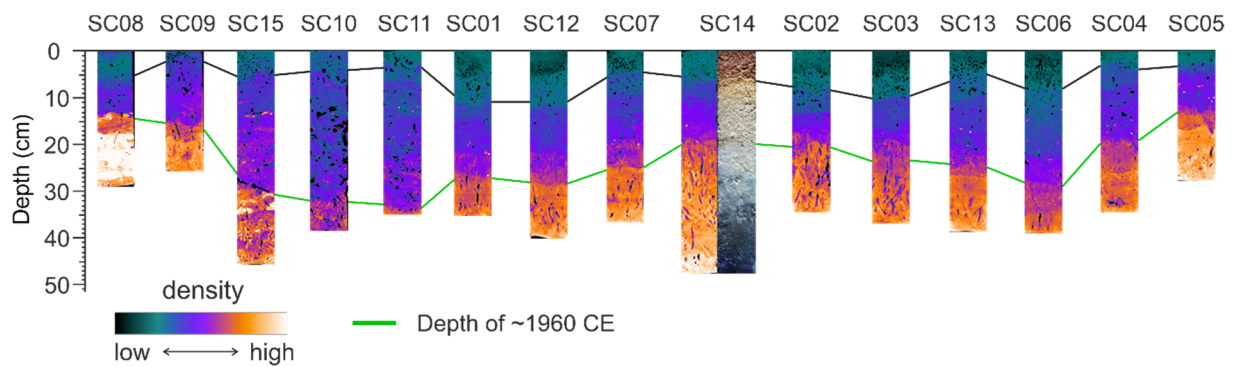


Abbildung 6: Korrelation der Oberflächenkerne durch lithologische Wechsel, welche als Dichte Änderungen in den CT-Bildern sichtbar sind. Die grüne Korrelationslinie entspricht 1960 ± 10 Jahre n.Chr.

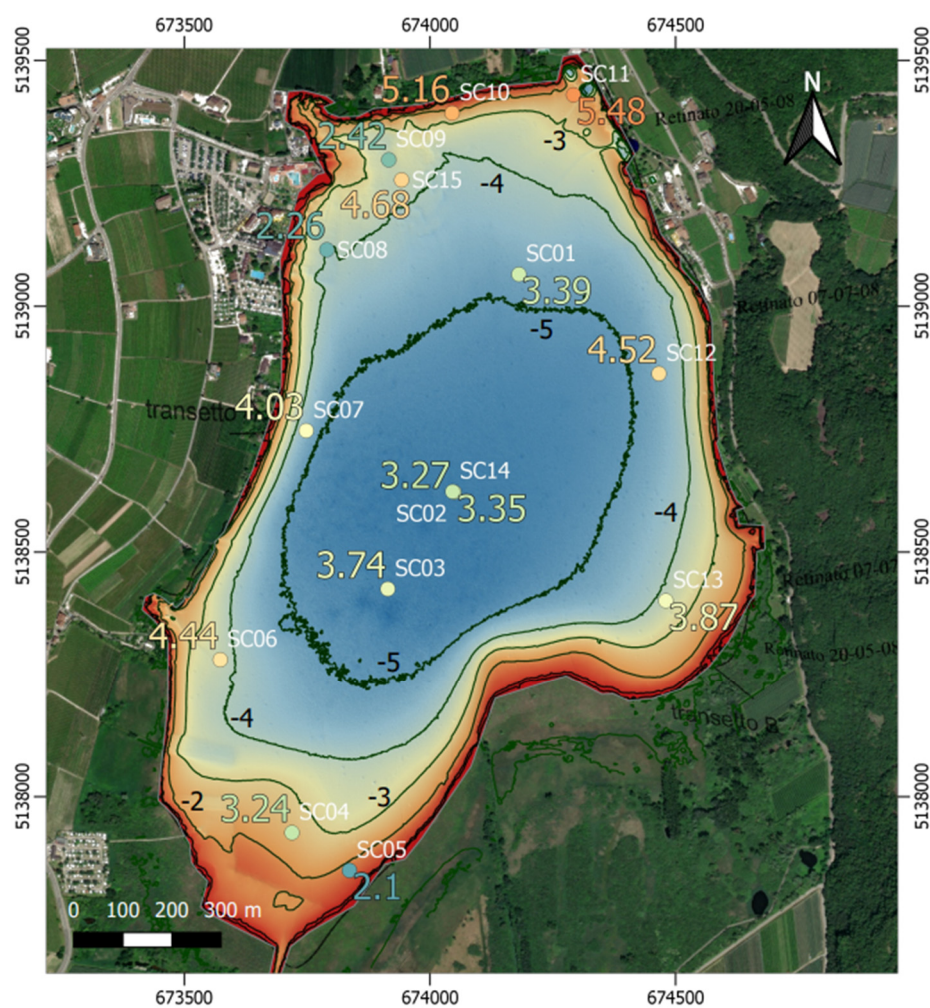


Abbildung 7: Ergebnisse der Extrapolation der Sedimentationsraten nach ~1960 auf die Entnahmestellen der Oberflächenkerne. Koordinatensystem: WGS 1984 UTM Zone 32N. Tiefenkarte: AHM 2024, Wassertiefe in Meter

Alters-Tiefen Modell der Hammer Kerne:

Das Alters-Tiefen-Modell des Kerns HC05 zeigt einen Durchschnitt für die Sedimentation in der letzten ~1700 Jahre. Es basiert auf den Altersdaten der Datierung der rezenten Sedimente (Abb.5) und zwei Radiokarbondatierungen in einer Tiefe von 72 cm (1030-1157 Jahre n.Chr.) und 108 cm (425-544 Jahre n.Chr.). Die Sedimentationsraten nach 1960 (Ergebnisse in der Analyse der Oberflächen Kerne) unterscheiden sich dabei stark von den Sedimentationsraten der darunterliegenden Sedimente. Für die Sedimente unter ~25cm (also ca. 1960) im Kern HC05 eine durchschnittliche Sedimentationsrate von ca. 0.5 mm/Jahr von ~320 n.Chr bis 1960 n.Chr berechnet werden. Innerhalb dieses Zeitraums kann es jedoch auch zu Veränderungen in den Sedimentationsraten kommen, welche aufgrund der geringen Zahl an Altersdaten nicht aufgelöst werden konnten.

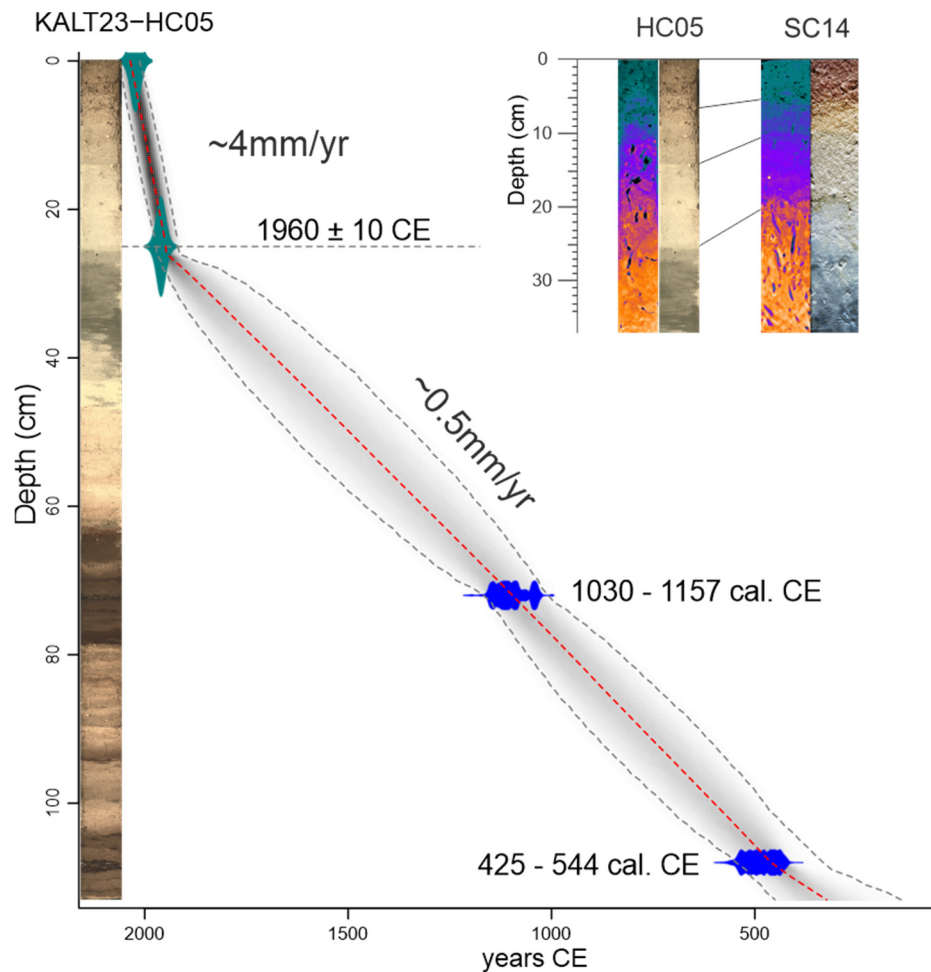


Abbildung 8: Alters-Tiefen Modell des Kerns HC05 mit Korrelation von HC05 und SC14 oben rechts. Blaue: Wahrscheinlichkeitsverteilung der kalibrierten ¹⁴C Datierungen. Türkise: Jahr der Kernentnahme (2023) und Korrelation aus datiertem Oberflächenkern (1960). In der Modellierung entspricht die rote Linie dem Mittelwert und die grauen Bereiche sind innerhalb des 95% Unsicherheitsintervall

Kern-Korrelation Hammer Kerne und Sedimentationsrate der ~800 Jahre vor 1960

Zwischen den Kernen HC01 bis HC11 können verschiedene Lagen korreliert werden (Abb. 9). Die Mächtigkeit der oberflächennahen Sedimente mit geringer Dichte kann zwischen allen Kernen korreliert werden und ist am geringsten in den tiefsten Bereichen des Sees. Dieses sehr weiche Sediment besteht vor allem aus aquatischem organischem Material, wie Algen und anderen Makroresten. Darunter kann ein Bereich mit dichter gelagertem, dunkel grauem bis schwarzes Sediment beobachtet werden, welches in den tieferen Bereichen dunkler erscheint. Eine ca. 5cm dicke, braune Lage mit geringer Dichte konnte zwischen allen kernen korreliert werden. In HC05 beginnt diese Lage in ca. 67 cm Tiefe. Da diese Lage nur knapp oberhalb einer ^{14}C Datierung liegt, konnte sie auf ca. 1187 ± 115 Jahre n.Chr. datiert werden. Des Weiteren konnte der Übergang zwischen den rezenten weniger dichten und dichteren Sedimenten unterhalb ~1960 zwischen allen Kernen korreliert werden. Die Mächtigkeit zwischen diesen beiden lithologischen Wechsel wurde zur Bestimmung der Sedimentationsraten zwischen ~1187 und ~1960 Jahre n.Chr. verwendet. Daraus wurden Sedimentationsraten zwischen 0.53 und 0.74 für die ~800 Jahre vor 1960 berechnet (Abb. 10).

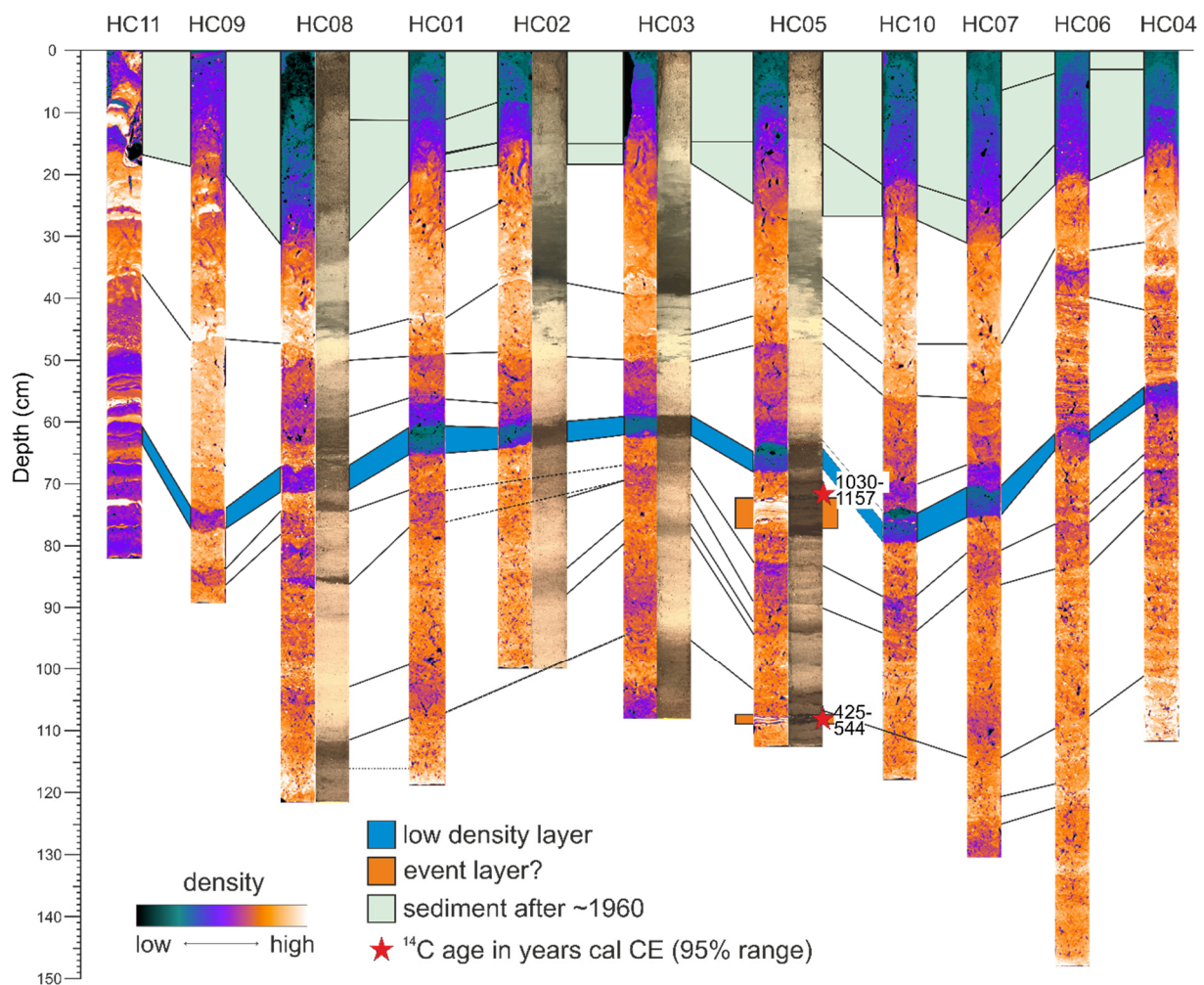


Abbildung 9: Kern-Korrelation der Hammer Kerne anhand von CT-Bildern und optischen Bildern. Lagen mit geringer Dichte (oberster Bereich und blauer 'low density layer') können zwischen allen Kernen korreliert werden und erlauben es Sedimentationsraten zu bestimmen.

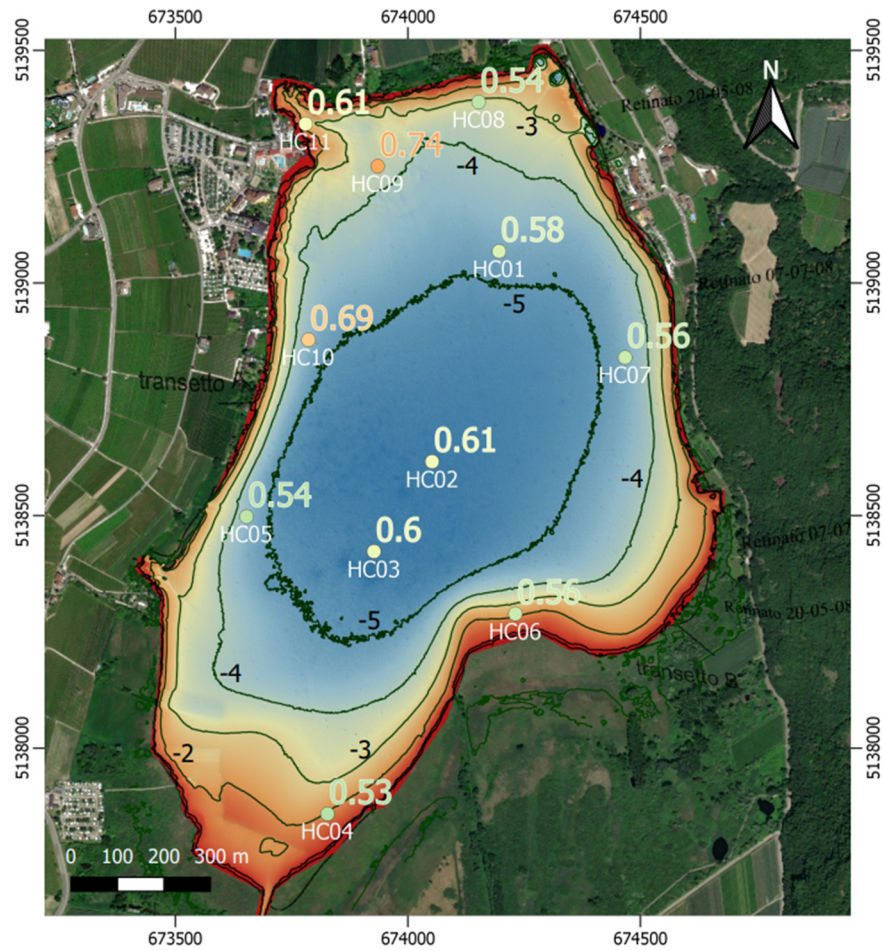


Abbildung 10: Ergebnisse der Extrapolation der Sedimentationsraten vom ~1187 bis ~1960 auf die Entnahmestellen der Hammer Kerne. Koordinatensystem: WGS 1984 UTM Zone 32N. Tiefenkarte: AHM 2024, Wassertiefe in Meter

Geochemische Zusammensetzung:

Anhand der XRF-scans von HC02, HC05 und HC08 kann die Variation ausgewählter Elemente entlang des Kerns dargestellt werden (Abb. 11, 12 und 13). Ausgewählt wurden jene Elemente, welche nur geringes Rauschen ausweisen. Hier: Ca, Fe, K, Ti, Cu und teilweise Sc und Ni. Auffällig ist, dass der dunkelgraue Bereich bei ca. 36cm im Kern HC02 reich an den Metallen Ti und Fe aber nicht Cu ist, was in den anderen Kernen nur schwach ersichtlich ist. Des Weiteren gibt es eine Anreicherung der gemessenen Metalle im Bereich der Lage mit geringer Dichte (~60-64cm in HC02), welche ein Alter von 1187 ± 110 Jahren n.Chr. hat. Dieselbe Lage kann auch in HC05 und HC08 beobachtet werden. Eine graduelle Anreicherung von Cu (und Ni) kann auch in den oberflächennahen Sedimenten der gemessenen Kerne beobachtet werden.

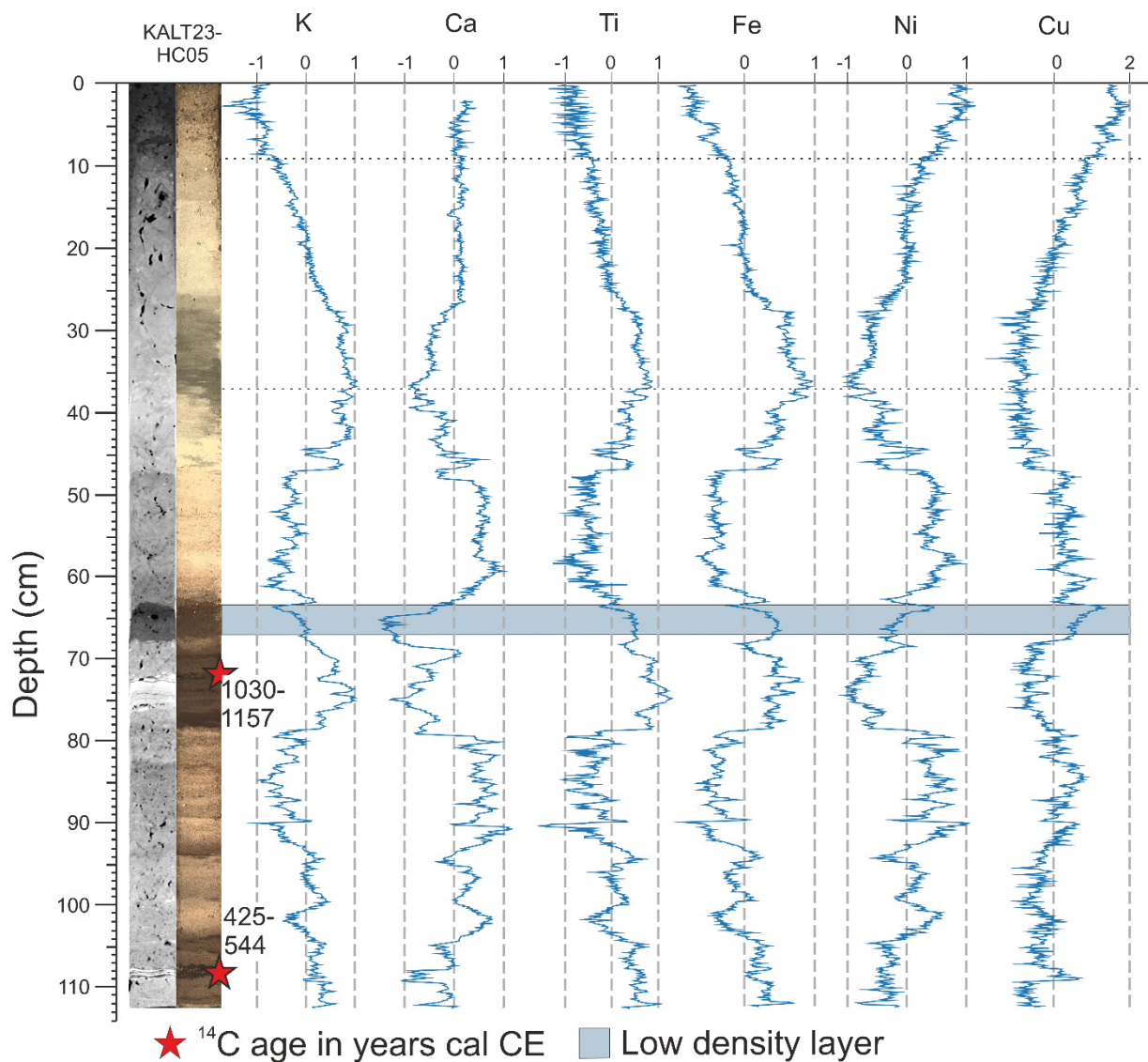


Abbildung 11: Ergebnisse des XRF-Scans von HC05. Elementvariationen in centered log ratios (clr). Lage mit geringer Dichte in blau hervorgehoben.

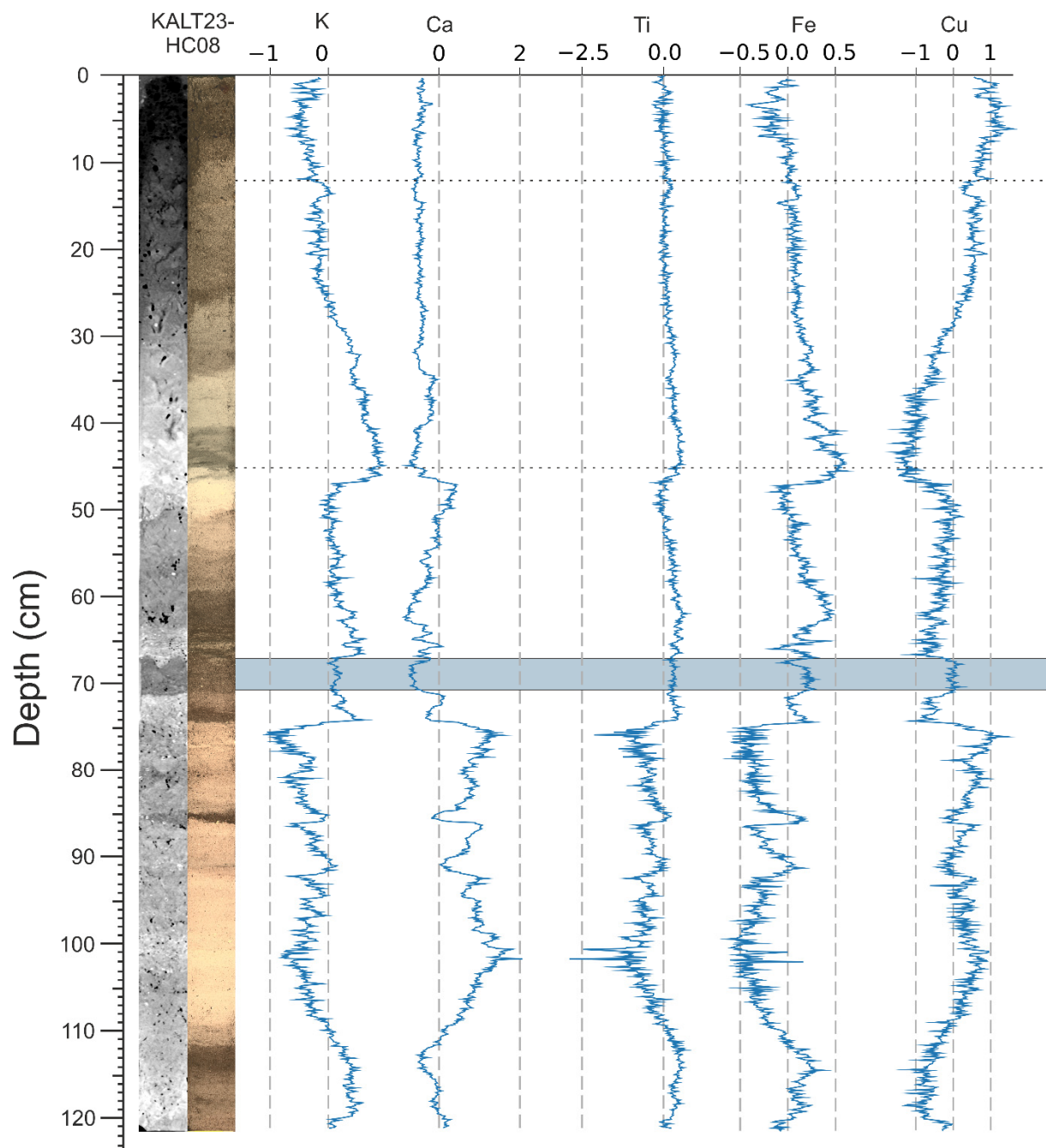


Abbildung 12: Ergebnisse des XRF-Scans von HC08, Elementvariation in clr. Lage mit geringer Dichte in blau hervorgehoben

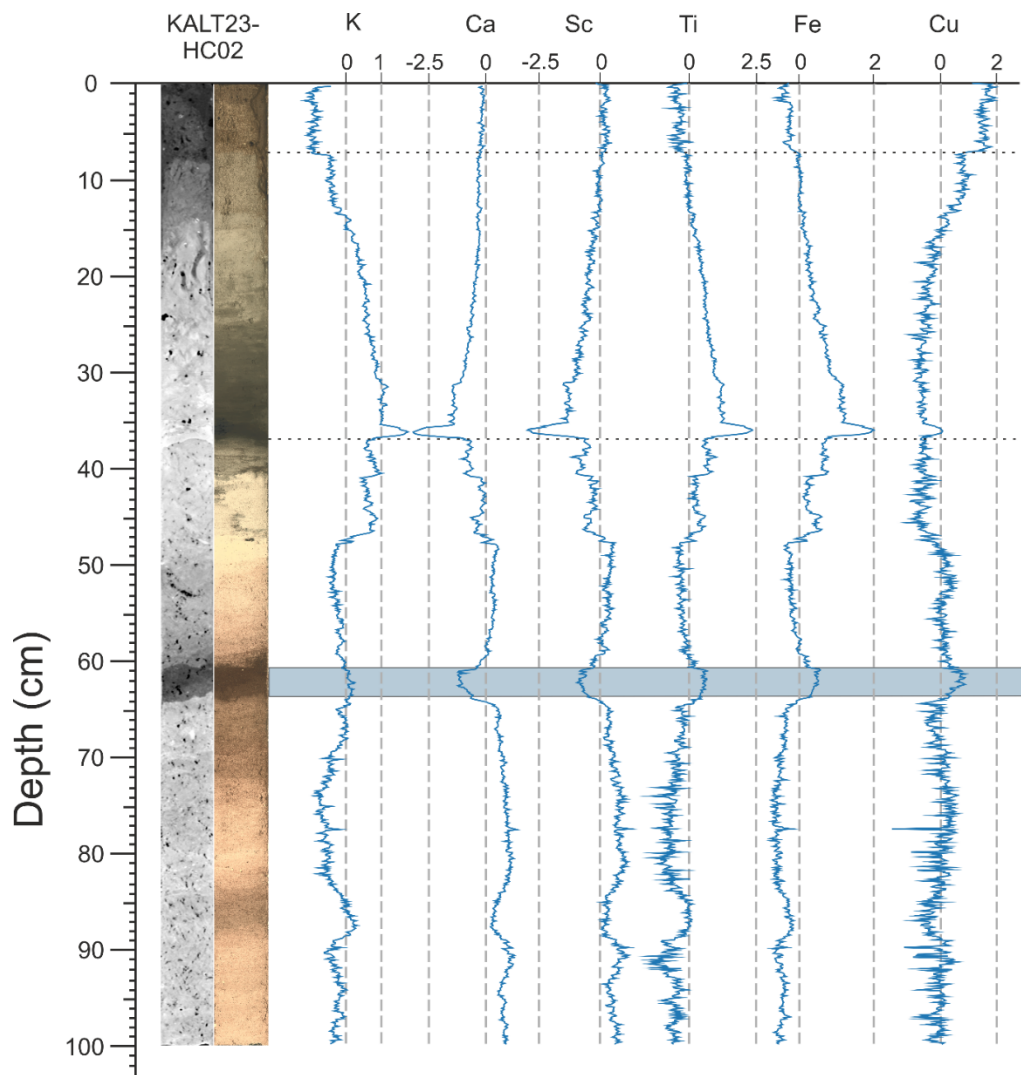


Abbildung 13: Ergebnisse des XRF-Scans von HC02. Elementvariation in clr. Lage mit geringer Dichte in blau hervorgehoben.

Diskussion der Daten:

Die durchschnittlichen Sedimentationsraten im Kalterer See sind in den letzten ~80 Jahren deutlich höher als vor ~800 Jahren. Während die durchschnittliche Sedimentationsrate von ~1187 bis ~1960 noch zwischen 0.53 und 0.74 mm/Jahr liegt, liegen die Sedimentationsraten im Zeitraum von ~1960 bis heute zwischen 2.1 und 5.48 mm/Jahr. Dies kann möglicherweise auf den menschlichen Einfluss in und um den See zurückzuführen sein. Im südlichen Bereich des Sees, nahe des Ausflusses, sind geringere Sedimentationsraten erkennbar, während im nördlichen Bereich an den Zuflüssen und in Küstennähe die Sedimentationsraten höher sind. In den Kernen SC09 und SC08 wurden in den Oberflächenkernen geringere Sedimentationsraten von 2.26-2.42 mm/Jahr ermittelt, was möglicherweise auf Entschlammungsmaßnahmen zurückzuführen ist. In den Kernen SC15 und SC10 welche am Rand bzw. außerhalb des entschlammten Bereichs entnommen wurden sind die Sedimentationsraten zwischen 4.68 und 5.16 mm/Jahr.

Auswertung der Sub-Bottom Profiling Daten:

Die Wassertiefe entlang der Sub-Bottom Profile zeigt, dass die Seemorphologie sich von 1977 (Alter der Tiefenkarte) ähnlich zu der heutigen ist und rezente Sedimentation diese nicht signifikant verändert hat (Abb. 14). Die Wassertiefe liegt in den größten Teilen des Sees zwischen 4 und 6 Meter. Im Bereich des Lidos im Nordwesten und südlichen Ufers des Sees scheint die Tiefe meist über 2m zu sein, was zum Teil tiefer als in der alten Tiefenkarte zu sein scheint. Diese Unterschiede können auf verschiedene Unsicherheiten zurückzuführen sein:

- Die Alte Karte wurde anhand der Küstenlinie georeferenziert, welche sich verändert haben könnte und teilweise auch nicht genau zur heutigen passt.
- Genauigkeit und Messverfahren der alten Karte sind nicht bekannt
- Wasserpflanzen und sehr weiche Sedimente im Uferbereich erschweren es den Seeboden auf den Sub-Bottom Profile genau zu erkennen
- Es wird eine konstante Wassertemperatur von 15°C im gesamten See angenommen und daher konstante Schallgeschwindigkeit im Wasser
- Seespiegelschwankungen können nicht berücksichtigt werden, weder für die alte Tiefenkarte noch für den Tag an dem die Messungen durchgeführt wurden, da diese nicht das primäre Ziel der Untersuchungen waren.

Aufgrund vielen Unsicherheiten können kaum genauere Interpretationen aus dem Vergleich der Tiefenkarte mit den Sub-Bottom Profilen gemacht werden.

In der neuen Tiefenkarte ist ebenfalls eine ähnliche Seemorphologie zu erkennen, wie es bereits ~1977 gemessen wurde. Aufgrund der oben genannten Unsicherheiten der alten Tiefenkarte, können keine Vergleiche der absoluten Tiefen gemacht werden. Basierend auf den aktuellen Sedimentationsraten könnte ein Vergleich zwischen Tiefenkarten durch eine weitere Vermessung in ca. 10 Jahren durchgeführt werden um die genaue Änderung der Sedimentation in verschiedenen Bereichen des Sees zu erkennen.

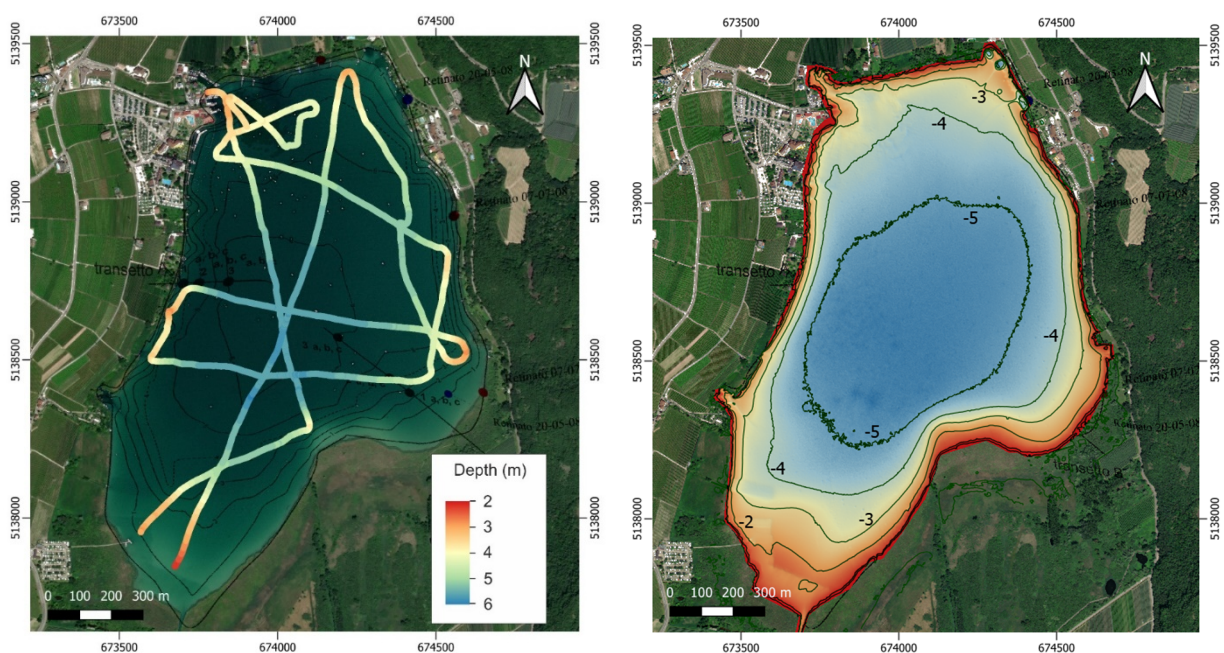


Abbildung 14: Links: Tiefenprofile basierend auf berechneter Wassertiefe aus den Sub-Bottom Profilen. Koordinatensystem: WGS 1984 UTM Zone 32N. Rechts: Neue Tiefenkarte (AHM 2024), mit Wassertiefe in Meter.

Quellenverzeichnis:

Appleby, P. G., & Oldfield, F. (1992). Applications of lead-210 to sedimentation studies. In *Uranium-series disequilibrium: applications to earth, marine, and environmental sciences*. 2. ed.

Blaauw, M., & Christen, J. A. (2011). Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process.

Bruel, R., & Sabatier, P. (2020). serac: an R package for Shortlived RADionuclide chronology of recent sediment cores. *Journal of Environmental Radioactivity*, 225, 106449.

Didonè, T. 2008: Il Lago di Caldaro (BZ): uno studio dello Zoobenthos ai fini della valutazione della sua qualità ecologica.

Reimer, P. J., Austin, W. E., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P. G., Ramsey, C. B., & Talamo, S. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62(4), 725-757.

Weltje, G. J., Bloemsma, M. R., Tjallingii, R., Heslop, D., Röhl, U., & Croudace, I. W. (2015). Prediction of geochemical composition from XRF core scanner data: a new multivariate approach including automatic selection of calibration samples and quantification of uncertainties. *Micro-XRF Studies of Sediment Cores: Applications of a non-destructive tool for the environmental sciences*, 507-534.

Weltje, G. J., & Tjallingii, R. (2008). Calibration of XRF core scanners for quantitative geochemical logging of sediment cores: Theory and application. *Earth and Planetary Science Letters*, 274(3-4), 423-438.