Zeitschrift: Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft
Herausgeber: Thurgauische Naturforschende Gesellschaft
Band: 72 (2024)

Artikel: Beprobung, Sedimentabfolge, XRF-Analysen und Datierung
Autor: Heiri, Oliver / Rey, Fabian / Wick, Lucia
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1062286

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: 20.08.2025

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

4. Beprobung, Sedimentabfolge, XRF-Analysen und Datierung

Oliver Heiri, Fabian Rey, Lucia Wick, Colin Courtney-Mustaphi, Nathalie Dubois, Zoe Moser & Sönke Szidat

4.1 Beprobung der Sedimentabfolgen

Ziel der Beprobung des Bichelsees und des Hüttwilersees war es, eine möglichst lange und durchgehende Sedimentabfolge von der Gegenwart bis in das Spätglazial zu sichern. Frühe sedimentologische und paläoökologische Studien an Schweizer Kleinseen beprobten die heutzutage oft teilweise trockenliegenden, ufernahen Seesedimente, weil dies mithilfe von Handbohrern von Land aus einfacher machbar war als von der Wasseroberfläche aus. Jüngere paläoökologische Studien konzentrieren sich hingegen vermehrt auf die Sedimente im tiefsten Teil des Seebeckens. Dies aus verschiedenen Gründen: Einerseits wird der Ablagerungsraum in der Seemitte weniger stark durch Veränderungen am Seeufer beeinflusst als ufernahe Sedimente. So prägen z. B. Seespiegelschwankungen die Beschaffenheit und den Verlandungsgrad des Vegetationsgürtels entlang von Seeufern und dadurch auch die ufernahen Sedimente. Andererseits werden Pollenablagerungen in der Seemitte weniger stark durch die Vegetation in unmittelbarer Nähe des Seeufers geprägt. Dadurch wird anhand von Pollenprofilen im tiefsten Teil von Seebecken eher die regionale Vegetationsgeschichte ersichtlich als an ufernahen Profilen. Sedimentsequenzen in der Seemitte werden auch weniger stark durch Erosionsprozesse, Rutschungen und Ablagerungslücken (Hiaten) beeinträchtigt als Sedimente im Uferbereich. Dies, weil im Tiefenwasser zwar Sedimente durch Rutschungen abgelagert werden können, aber kaum Material durch Erosion und Rutschungen wegtransportiert werden kann. Für Indikatoren, welche aus dem Seebecken selbst stammen (z. B. Algenreste, Überreste aquatischer Invertebraten), hat die Seemitte zudem den Vorteil, dass infolge des *sediment processing* (Weitertransport von Sedimentpartikeln entlang des Seegrunds in tiefere Abschnitte) Sedimentbestandteile aus dem ganzen Seebecken abgelagert werden und somit sowohl Seichtwasser- als auch Tiefwasserformen zu finden sind. Schliesslich besteht heutzutage auch die Infrastruktur und die Apparatur, um effizient, durchgehend und hochaufgelöst die Sedimente in der Seemitte zu beproben, was für frühere Sedimentstudien oft nicht der Fall war.

Im Rahmen des KUMIT-Projekts wurde aus diesen Gründen entschieden, Sedimentabfolgen aus der tiefsten Stelle der Seebecken des Bichelsees und des Hüttwilersees zu entnehmen. Die Feldarbeiten fanden am Hüttwilersee vom 25. bis 28. November 2019 und am Bichelsee vom 18. bis 21. November 2019 sowie zwischen dem 5. bis 7. Oktober 2021 statt *(Abbildung 4-1)*. Für die Beprobung der Sedimente kam eine Plattform der Firma UWITEC mit aufblasbaren Schwimmern zur Anwendung *(Abbildung 4-1)*. Mithilfe eines Schwerelots wurden die oberflächennahen Sedimente von 0 bis maximal 1,45 m Sedimenttiefe beprobt, wobei die Sedimente in einer sie umschliessenden Plastikröhre (Liner) entnommen wurden. Ein Schlaggewicht hämmerte dabei das Schwerelot weiter in das Sediment hinein (*UWITEC*

Abbildung 4-1:
Oben: Beprobungsplattform auf dem Bichelsee
Unten: Absenken der Kernkammer des Kolbenlots mit darin enthaltenem Plastik-Liner ins Wasser
(Fotos: Geoökologie Universität Basel, Colin Courtney-Mustaphi).

Abbildung 4-2:
Oben links: Beprobung eines Oberflächenkerns
Oben rechts: Hämmern des Schwerelots ins Sediment mithilfe eines Gewichts, welches jeweils auf die Schlagstange fallen gelassen wird
Unten links: Beschriften eines Oberflächenkerns
Unten rechts: Kolbenlotsedimentsegmente, welche zum Transport ins Labor beschriftet und bereitgelegt worden sind
(Fotos: Geoökologie Universität Basel, Oliver Heiri).

gravity corer mit Hammer-Aktion). Tiefere Sedimente wurden mit einem in das Sediment hämmerbaren Kolbenlot vom Typ «Niederreiter» in 2 m langen, vertikalen Sedimentabschnitten beprobt *(Abbildung 4-2)*. Das Sediment wird bei dieser Methode in einem Metallrohr, und ebenfalls von einem Liner umschlossen, entnommen. Bei jedem Probestandort wurden 2 m lange Sedimentsegmente kontinuierlich beprobt, bis silt- und tonhaltige Sedimente zum Vorschein kamen und ein weiteres Abteufen des Lots nicht mehr sinnvoll schien. Nach der anschliessenden Verschiebung der Plattform um ca. 2–3 m wurden ein oder zwei weitere, parallele Sedimentkerne mit um 50–150 cm tiefenversetzten Sedimentsegmenten entnommen *(Tabelle 4-1)*. Analysen im Labor zeigten, dass am Bichelsee durch die Arbeiten im November 2019 erst mittelholozäne und nicht wie vermutet spätglaziale Sedimente erreicht wurden. Dies erforderte im Oktober 2021 eine weitere Kampagne, um die noch tiefer liegenden mittel- bis frühholozänen Sedimentschichten zu beproben. Insgesamt konnten im Bichelsee vier Oberflächensedimentkerne von 0 bis 0,72–1,13 m und sieben Langkerne von 0 bis 6,5 m (2019) und 0 bis 10,5 m (2021) entnommen werden *(Tabelle 4-1)*. Im Hüttwilersee war die Ausbeute vier Oberflächensedimentkerne von 0 bis 1,39–1,50 m und vier Langkerne von 0 bis 13 m *(Tabelle 4-1)*. Die Kernsegmente wurden im Feld beschriftet, im Kühlraum der Forschungsgruppe Geoökologie der Universität Basel zwischengelagert und später im Labor geöffnet, gescannt, korreliert und beprobt.

Jahr	Sedimentkern	Kerntyp	Koordinaten	Wassertiefe (in Meter)	Maximale Sedimenttiefe (in Meter)	Anzahl entnommene Intervalle
2019	BIC S1	Oberflächensedimentkern	47°27,466' N, 8°54,027' E	6,8	0,95	1
2019	BIC S2	Oberflächensedimentkern	47°27,466' N, 8°54,027' E	6,8	0,72	1
2019	BIC S3	Oberflächensedimentkern	47°27,466' N, 8°54,027' E	6,8	1,13	1
2019	BIC S4	Oberflächensedimentkern	47°27,466' N, 8°54,027' E	6,8	1,12	1
2019	BIC A	Kolbenlot	47°27,466' N, 8°54,027' E	6,8	5,50	3
2019	BIC B	Kolbenlot	47°27,466' N, 8°54,027' E	6,8	5,00	2
2019	BIC C	Kolbenlot	47°27,466' N, 8°54,027' E	6,8	6,00	3
2019	BIC D	Kolbenlot	47°27,466' N, 8°54,027' E	6,8	6,50	3
2021	BIC E	Kolbenlot	47°27,468' N, 8°54,030' E	6,5	10,00	4
2021	BIC F	Kolbenlot	47°27,468' N, 8°54,030' E	6,5	9,50	5
2021	BIC G	Kolbenlot	47°27,468' N, 8°54,030' E	6,5	10,50	5
2019	HUE S1	Oberflächensedimentkern	47°36,559' N, 8°50,613' E	15,6	1,42	1
2019	HUE S2	Oberflächensedimentkern	47°36,559' N, 8°50,613' E	15,6	1,50	1
2019	HUE S3	Oberflächensedimentkern	47°36,559' N, 8°50,613' E	15,6	1,42	1
2019	HUE S4	Oberflächensedimentkern	47°36,559' N, 8°50,613' E	15,6	1,39	1
2019	HUE A	Kolbenlot	47°36,559' N, 8°50,613' E	15,6	12,00	6
2019	HUE B	Kolbenlot	47°36,559' N, 8°50,613' E	15,6	13,00	6
2019	HUE C	Kolbenlot	47°36,559' N, 8°50,613' E	15,6	12,50	6
2019	HUE D	Kolbenlot	47°36,559' N, 8°50,613' E	15,6	11,50	5

Tabelle 4-1: Zusammenfassung der im Bichelsee und im Hüttwilersee entnommenen Sedimentkerne.

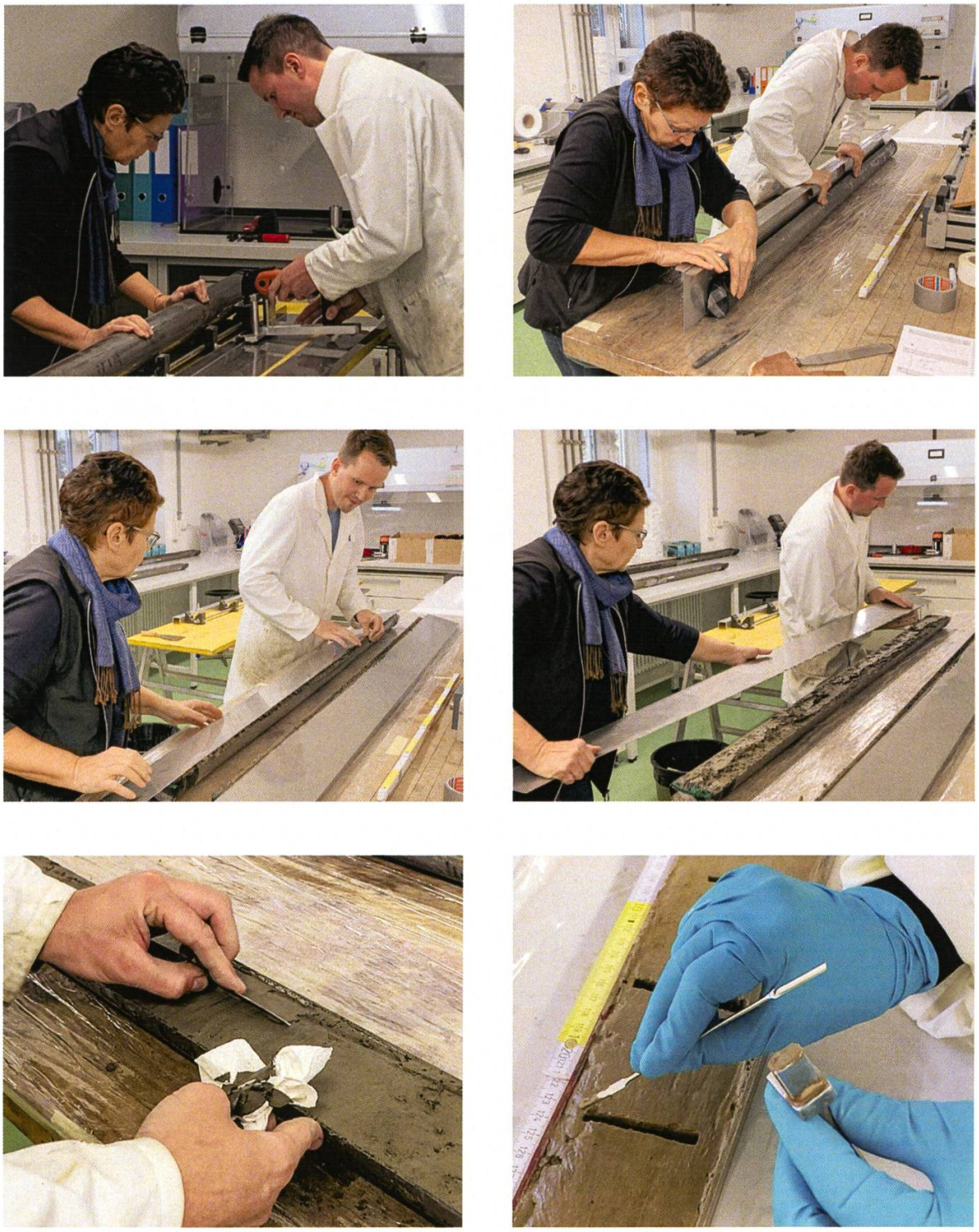


Abbildung 4-3:
Oben links: Aufschneiden eines Plastik-Liners mit enthaltenem Kernsegment mit einer Vibrationssäge
Oben rechts: Einfügen der Metallbleche zum Auftrennen des Kernsegments in zwei Hälften
Mitte links: Getrennte Kernsegmente
Mitte rechts: Abziehen eines der Metallbleche von der Sedimentoberfläche
Unten links: Reinigen der Sedimentoberfläche mit einem Messer
Unten rechts: Beproben einzelner Sedimenttiefen mit einem Spachtel und einem volumetrischen Probenstecher (0,5 cm³)
(Fotos: Geoökologie Universität Basel, Colin Courtney-Mustaphi).

Abbildung 4-4:
Links: Korrelation von verschiedenen Kernsegmenten aus unterschiedlichen Bohrungen
Rechts: Detailaufnahme einer Markerschicht auf zwei unterschiedlichen Kernsegmenten
Die Markerschicht erlaubt in dieser Tiefe eine eindeutige Korrelation der Segmente
(Fotos: Geoökologie Universität Basel, Colin Courtney-Mustaphi).

4.2 Sedimentkorrelation und -beprobung

Das Aufschneiden der Liner der Sedimentkerne erfolgte innert weniger Tage nach der Feldbeprobung im Labor entlang der vertikalen Achse mit einer Vibrationssäge. Zwei Bleche, welche entlang der Schnittachse ins Sediment geschoben wurden, trennten die Kernhälften *(Abbildung 4-3)*. Nach Abziehen der Bleche von den Kernhälften lag die Sedimentoberfläche frei, welche nun mit einem Messer durch vorsichtiges Abstreichen der obersten Sedimente in Richtung der Sedimentschichten gereinigt werden konnte *(Abbildung 4-3)*. Die Kernsegmente wurden sowohl vor dem Durchoxidieren der Sedimentschichten, als auch nach der Oxidation in einem *smartcube* Kernscanner (SmartCIS-L) fotografiert und dazwischen und danach mit Plastikfolie umschlossen, in Plastikschläuche eingepackt und bei 4 °C im Kühlraum gelagert. Die Korrelation der geöffneten Kernsegmente erfolgte im Labor *(Abbildung 4-4)*. Von besonderem Interesse waren dabei auffällige lithologische oder sedimentologische Strukturen, wie z. B. auffallende Abfolgen von Sedimentschichten und/oder Farb-/Texturänderungen der Sedimente. Solche Strukturen zeigen, in welcher genauen Kerntiefe in den unterschiedlichen Bohrungen dieselbe Sedimentschicht erreicht wurde. Sie erlauben daher, bei der durchgehenden Beprobung einer Sedimentsequenz, von einer Bohrung auf die andere zu wechseln, ohne dass Sedimentintervalle ausgelassen werden. Dies ist v. a. auch deshalb wichtig, weil bei der Beprobung der Sedimente mit dem Kolbenlot zwischen den einzelnen Kernsegmenten etwas Sediment verloren geht. Eine einzelne Bohrung kann deshalb eine Sedimentabfolge nur mit Lücken im Dezimeterbereich beproben *(Abbildung 4-5)*.

Anhand der korrelierten Kernsegmente liess sich für beide Seen eine Hauptsequenz *(master core)* zusammenstellen, welche die lückenlose Beprobung und Bearbeitung der Sedimente von der Sedimentoberfläche bis zum tiefsten Kernsegment erlaubt. Das Verfahren ist in *Abbildung 4-5* skizziert. Die vorhandenen Kernsegmente wer-

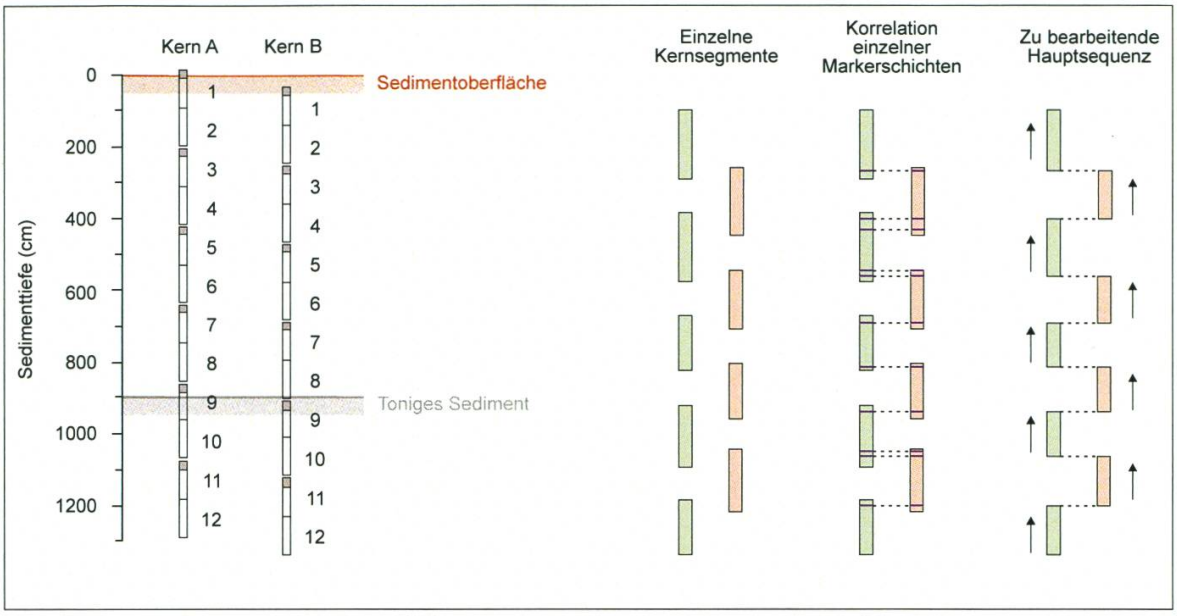


Abbildung 4-5: Vereinfachte Darstellung des Vorgehens bei der Beprobung von Parallelkernen an einem Probestandort (links) und bei der Kernkorrelation (rechts). Kerne werden an einem Standort mit einem 2 m langen Kolbenlot entnommen (links), bis das Lot nicht mehr weiter ins Sediment hineingetrieben oder gehämmert werden kann. Die beprobten 2 m langen Intervalle werden zur weiteren Bearbeitung in zwei maximal 1 m lange Segmente geschnitten (nummeriert von 1 - 12). Um die nicht beprobten Sedimentabschnitte zwischen zwei Kolbenlotabteufungen (grau markiert) ebenfalls zu beproben, werden in diesem Beispiel zwei Parallelbohrungen durchgeführt (Kern A und B), die vertikal leicht versetzt angesetzt sind. Bei der Kernkorrelation (rechts) werden die einzelnen, geschnittenen Kernsegmente anhand von Markerschichten parallelisiert. Bei der Analyse und Beprobung erfolgt dann jeweils bei vorbestimmten Markerschichten ein Wechsel von Abschnitt zu Abschnitt (oder von Segment zu Segment) und vom einen Parallelkern auf den anderen, damit die gesamte Sedimentabfolge in chronologischer Reihenfolge (mit Pfeilen dargestellt) beprobt und bearbeitet werden kann.

den anhand der vorgefundenen Markerschichten miteinander korreliert. Danach wird eine Abfolge von Segmenten zusammengestellt, die eine lückenlose Sedimentabfolge über die gesamte Sequenz darstellt, von der Oberfläche bis zum untersten beprobten Sediment. Gegen das obere Ende der einzelnen Kernsegmente wird entlang dieser Hauptsequenz jeweils anhand einer eindeutigen Markerschicht von einem Kernsegment auf ein anderes, vertikal verschobenes Kernsegment einer anderen Bohrung gewechselt. So ist es möglich, die gesamte Sedimentabfolge kontinuierlich und ohne Unterbrüche zu analysieren und zu beproben *(Abbildung 4-5)*. Die Sedimenttiefe dieser Hauptsequenz entspricht dabei der Summe der einzelnen Sedimentintervalle der beprobten Kernsegmente, von der Sedimentoberfläche bis zu einer bearbeiteten Tiefe. Alle sedimentologischen und paläoökologischen Analysen in diesem Projekt werden in dieser Tiefenskala der korrelierten Hauptsequenz angegeben und besprochen.

Die Hauptsequenz vom Hüttwilersee umfasst zwanzig Kernsegmente und 1296 cm von der Sedimentoberfläche bis zum untersten beprobten Sediment *(Abbildung 4-6)*. Sedimente zwischen der Oberfläche und 813 cm bestanden aus hellbrauner Gyttja. Von 813 bis 865 cm bestand das Sediment aus dunkelbrauner, kompakter Gyttja mit vereinzelten, helleren Kalzitlagen zwischen 853,5 bis 839 cm (Jüngere Dryaszeit) und zwischen 822 und 813 cm (am Übergang zur hellbraunen Gyttja). In 865 cm fand ein

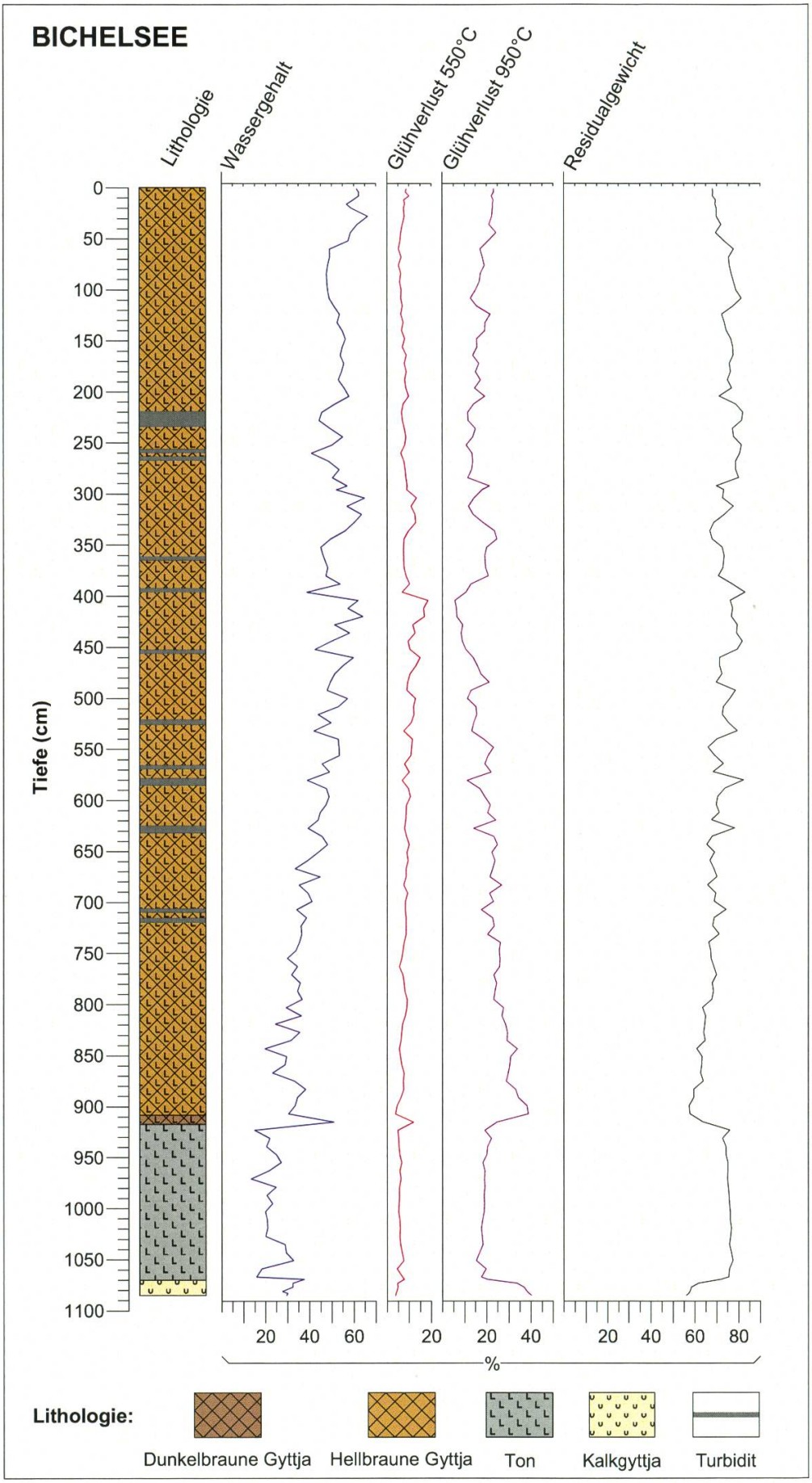
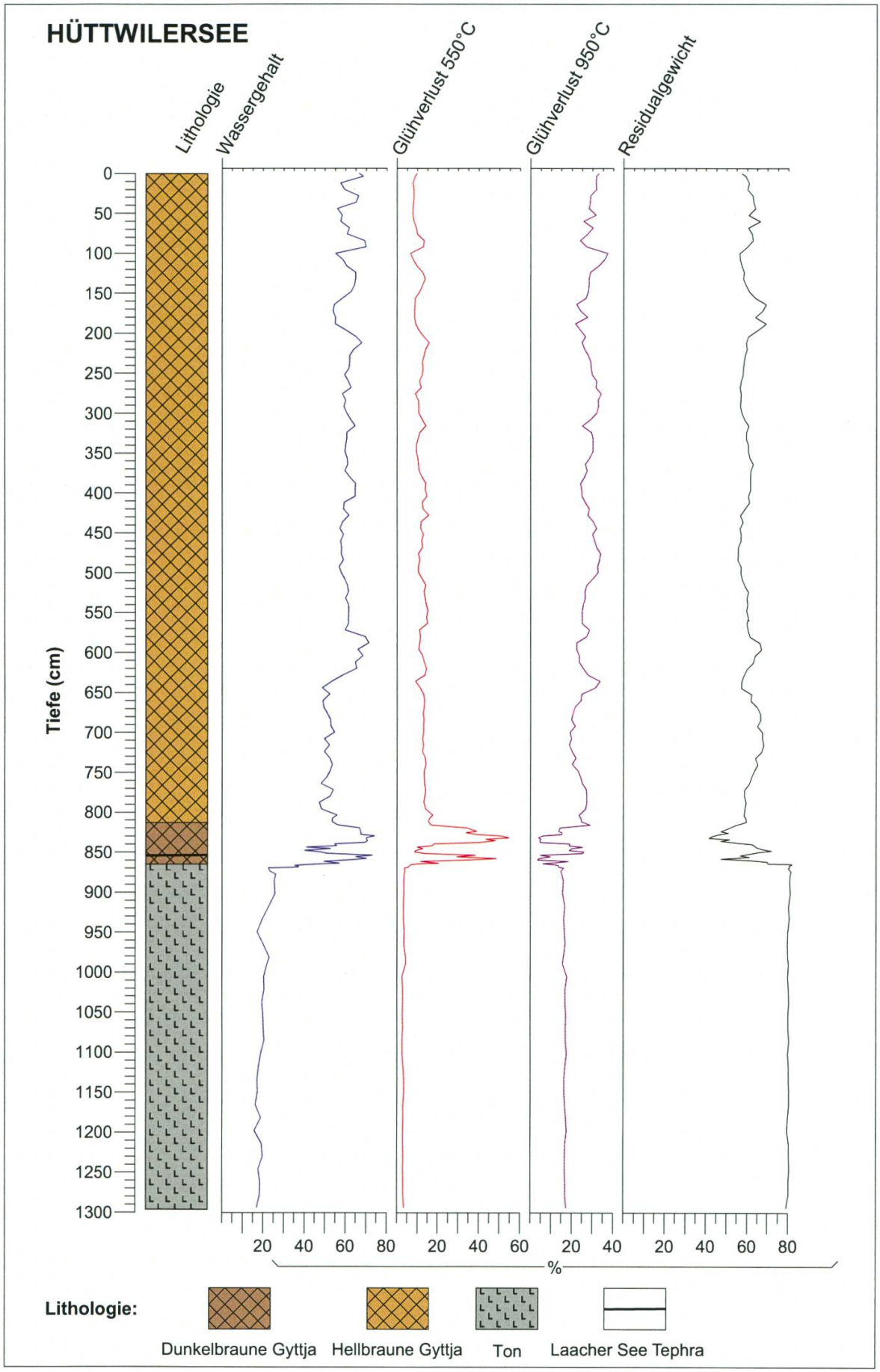


Abbildung 4-6: Lithologie (Sedimentbeschaffenheit), Wassergehalt, Glühverlust bei 550 °C und 950 °C sowie die Residuale (nicht verglühtes Material) für die Bichelsee- (links) und die Hüttwilerseesequenz (rechts). Der Wassergehalt ist als Prozent des Feuchtgewichts und der Glühverlust als Prozent des Trockengewichts dargestellt.


HÜTTWILERSEE
Lithologie
Wassergehalt
Glühverlust 550°C
Glühverlust 950°C
Residualgewicht
Tiefe (cm)
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
650
700
750
800
850
900
950
1000
1050
1100
1150
1200
1250
1300
20 40 60 80
20 40 60
20 40
20 40 60 80
%
Lithologie:
Dunkelbraune Gyttja
Hellbraune Gyttja
Ton
Laacher See Tephra

Wechsel zu tonigen Sedimenten statt, eine Veränderung, welche in Schweizer Mittelandseen oft am Übergang ins Spätglazial stattfindet. Die tonigen Sedimente reichten bis 1296 cm. Veränderungen in der Lithologie und Zusammensetzung der Sedimente sind auch klar am Organik- und Karbonatgehalt erkennbar, welcher gemäss *Heiri et al. (2001)* als Glühverlust bei 550 °C und 950 °C gemessen worden ist.

Die Hauptsequenz des Bichelsees umfasst 17 Kernsegmente und 1085 cm von der Sedimentoberfläche bis zum untersten beprobten Sediment *(Abbildung 4-6)*. Sedimente zwischen der Oberfläche und 908,5 cm bestehen aus hellbrauner bis grauer Gyttja, die von mehreren dunkleren Bändern mit gröberer Körnung (sog. Turbidite) durchsetzt ist. Von 908,5 bis 917,5 cm folgt eine Schicht aus dunkelbrauner, etwas toniger Gyttja, die darunter in hellgraue, stark tonige Sedimente übergeht. Direkt oberhalb der Kernbasis, zwischen 1070 und 1085 cm, besteht das Sediment aus sehr heller Kalkgyttja mit Mollusken. Die Glühverlustkurven zeigen, wie im Hüttwilersee, grössere Veränderungen an den lithologischen Übergängen mit hohen Werten des Glühverlusts bei 550 °C in der dunklen Gyttjaschicht zwischen 917,5 und 908,5 cm, die den Beginn der frühholozänen Bewaldung anzeigt, und tiefen Werten im Spätglazial. Die Sedimentwechsel bei 1070 cm und 908,5 bis 917,5 cm sind durch ausgeprägte Veränderungen des Karbonatgehalts (Glühverlust 950 °C) charakterisiert.

4.3 XRF-Analysen

Hochaufgelöste Röntgenstrahl-Fluoreszenzanalysen (XRF-Analysen) erlauben es, Veränderungen in der Elementarzusammensetzung der Sedimente zu messen, ohne Sedimentmaterial zu vernichten. Der Ansatz hat sich deshalb als wertvolle eigenständige Analysemethode von Seesedimenten etabliert. Er kommt aber auch oft zur Anwendung, um unterstützende Analysen für weiterführende paläolimnologische und paläoökologische Interpretationen zu liefern. XRF-Analysen ergeben Messungen der relativen Häufigkeiten verschiedener Elemente als Zählungen pro Sekunde *(counts per second)*. Um von solchen Messungen absolute Konzentrationen zu errechnen, sind relativ aufwendige Kalibrationsmessungen mit anderen geochemischen Analysemethoden notwendig. Allerdings können Veränderungen der Zählrate entlang eines Kernsegments für bestimmte Elemente auch ohne Kalibrierung wertvolle Informationen über deren Zu- und Abnahme liefern. Verhältnisse zwischen gemessenen Elementen können zudem verlässlich zeigen, ob deren Häufigkeit im Vergleich mit der Hintergrundsedimentation zu- oder abgenommen hat.

Die Messung der Kernsegmente der Hauptsequenz der Bichelsee- und Hüttwilerseesedimente erfolgte durch einen Avaatech XRF-Core Scanner an der EAWAG Dübendorf. Kernsegmente des Hüttwilersees wurden von Mai bis Juni 2020 analysiert, die oberen Kernintervalle vom Bichelsee oberhalb einer Tiefe von 624,6 cm von März bis April 2020. Die Messung tieferer Abschnitte der Bichelseesedimente fand im März 2022 stand. Zwischen den Messungen erfolgte eine Kalibration des Messgeräts. Dies erforderte es, die Messungen vom März 2022 zur Vergleichbarkeit der Daten anzupassen. Zu jedem Element wurde hierfür die Differenz zwischen dem Mittelwert der fünf Messpunkte oberhalb von 626,6 cm und dem Mittelwert der fünf

Messpunkte unterhalb von 624,6 cm addiert. Die Gegenkontrolle dieser Korrektur erfolgte durch die Nachmessung eines Kernsegments im März 2022, welches bereits im Jahr 2020 analysiert worden war. Für bestimmte Segmente wurden einige wenige Millimeter an den Enden der gemessenen Intervalle gelöscht, da diese zu Artefakten und Vermischungen in den Datensätzen führen können.

Die XRF-Messungen an den Sedimenten des Bichelsees *(Abbildung 4-7)* und des Hüttwilersees *(Abbildung 4-8)* zeigen grössere Schwankungen in der Häufigkeit von Elementen, die üblicherweise als Erosions- und Sedimentationsindikatoren gebraucht werden, wie z. B. Titan (Ti) und Silicium (Si). Erhöhte Werte dieser Elemente weisen auf einen hohen Eintrag von terrestrischem Material im Vergleich zu Sedimentbestandteilen hin, die vom See selbst stammen. Typischerweise sind in Seen im Schweizer Mittelland die untersten Sedimente aus der letzten Eiszeit durch hohe Anteile von erodiertem und eingetragenem Material gekennzeichnet, da die Seen zu dieser Zeit noch sehr unproduktiv waren und nur geringe Mengen des abgelagerten Materials in den Seen selbst entstanden sind. Dies ist auch in den unterersten Sedimentschichten beider Seen erkennbar, die durch hohe Werte von Ti und Si charakterisiert sind. In 875 cm Sedimenttiefe im Hüttwilersee und 910 cm im Bichelsee nehmen die Häufigkeiten dieser Elemente deutlich ab. Im Hüttwilersee sind auch in jüngeren Abschnitten einige Veränderungen der Konzentration der beiden Elemente erkennbar, obwohl nie wieder ähnlich hohe Werte wie in den untersten Sedimenten erreicht werden. Im Bichelsee sind im Gegensatz dazu starke Schwankungen von Ti und Si über das gesamte beprobte Sedimentintervall und v. a. im obersten Drittel erkennbar, was auf ausgeprägte Sedimentationsereignisse im See auch in jüngeren Zeiten hinweist. Die Verhältnisse von Si/Ti und Calcium (Ca)/Ti zeigen an, ob jeweils mehr Silikat oder Kalzit abgelagert wurde, als durch die Zunahme des terrestrischen Eintrags (repräsentiert durch Ti) erwartet werden kann. Dies würde auf einen erhöhten Anteil von silikat- oder kalzithaltigem Material aus dem See hinweisen, z. B. in Form von Kieselalgenschalen, Chrysophyceen-Zysten oder Schwammnadeln für Si oder amorphem oder biogenem Karbonat für Ca. Bei beiden Seen ist eine bedeutende Zunahme von Ca/Ti und Si/Ti mit der Abnahme von Ti im Sediment erkennbar, mit ausgeprägten Maxima, die auf erhöhte Produktion und Ablagerung von aquatischem Material oder einen reduzierten Eintrag von terrestrischem Material zurückzuführen sind. Das Verhältnis von Mangan (Mn) zu Eisen (Fe) wird in Seesedimenten oft als Indikator für Redoxänderungen an der Sedimentoberfläche interpretiert, wobei in Seen, in denen regelmässig saisonale Veränderungen von Sauerstoffverhältnissen vorkommen, hohe Werte üblicherweise mit erhöhten Sauerstoffkonzentrationen übereinstimmen *(Naeher et al. 2013)*. Allerdings wird die Häufigkeit von lösbarem Mn und Fe an der Sedimentoberfläche auch durch die Mobilität und Verfügbarkeit dieser Elemente im Seewasser beeinflusst und langfristige Zunahmen und Veränderungen beider Elemente können z. B. auch durch das Entstehen von anoxischen Bedingungen in Seen beeinflusst werden. Schwankungen des Mn/Fe-Verhältnisses in den Sedimenten in den oberen Kernabschnitten könnten daher auf kurzfristigere Veränderungen in den Redoxbedingungen im Tiefenwasser hinweisen, während längerfristige Trends z. B. auch durch die Etablierung und das langfristige Zunehmen von anoxischen Bedingungen im See erklärt werden könnten. Schwefel (S) zeigt für Seesedimente v. a. das Vorhandensein von Sulfid in den

*Abbildung 4-7: Ausgewählte XRF-Profile für die Sedimente des Bichelsees. Titan (Ti), Silicium (Si) und Schwefel (S) sind in Zählungen pro Sekunde (*counts per second, *cps) angegeben, die anderen Elemente als Verhältnisse relativ zu Ti, Eisen (Fe) oder Rubidium (Rb). Unter den einzelnen Plots ist eine mögliche Interpretation der Kurven angegeben (siehe detailliertere Angaben im Text).*

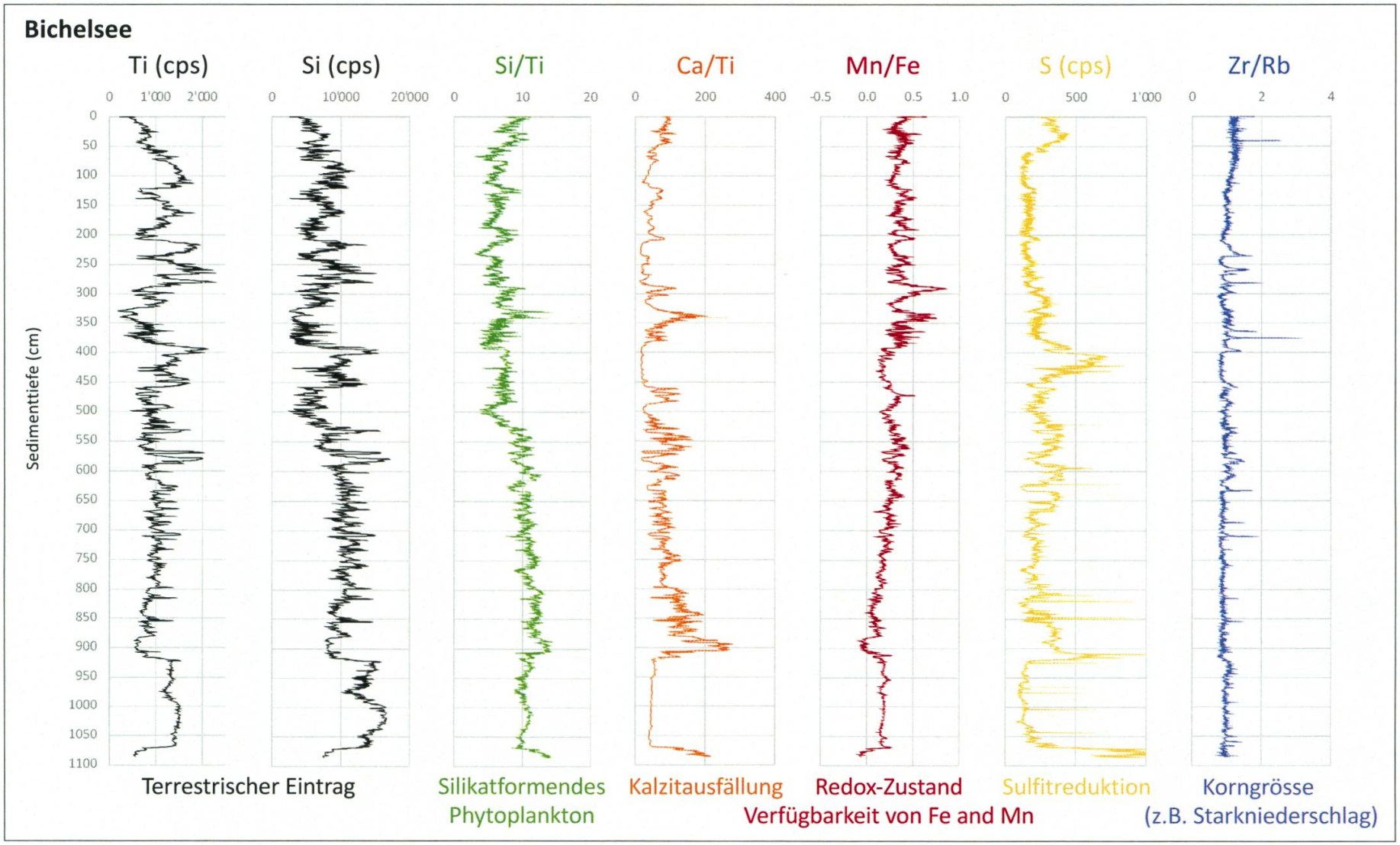
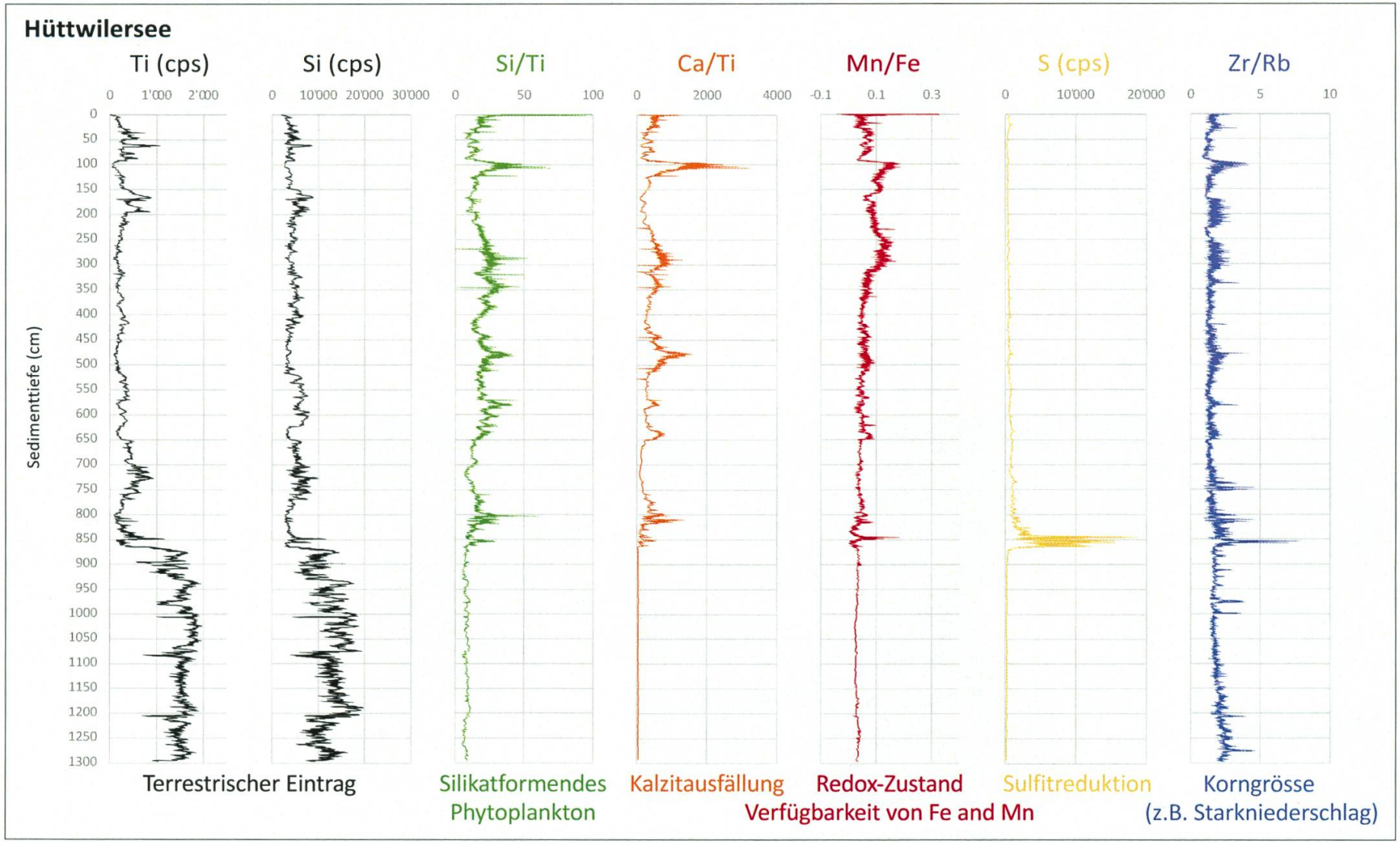
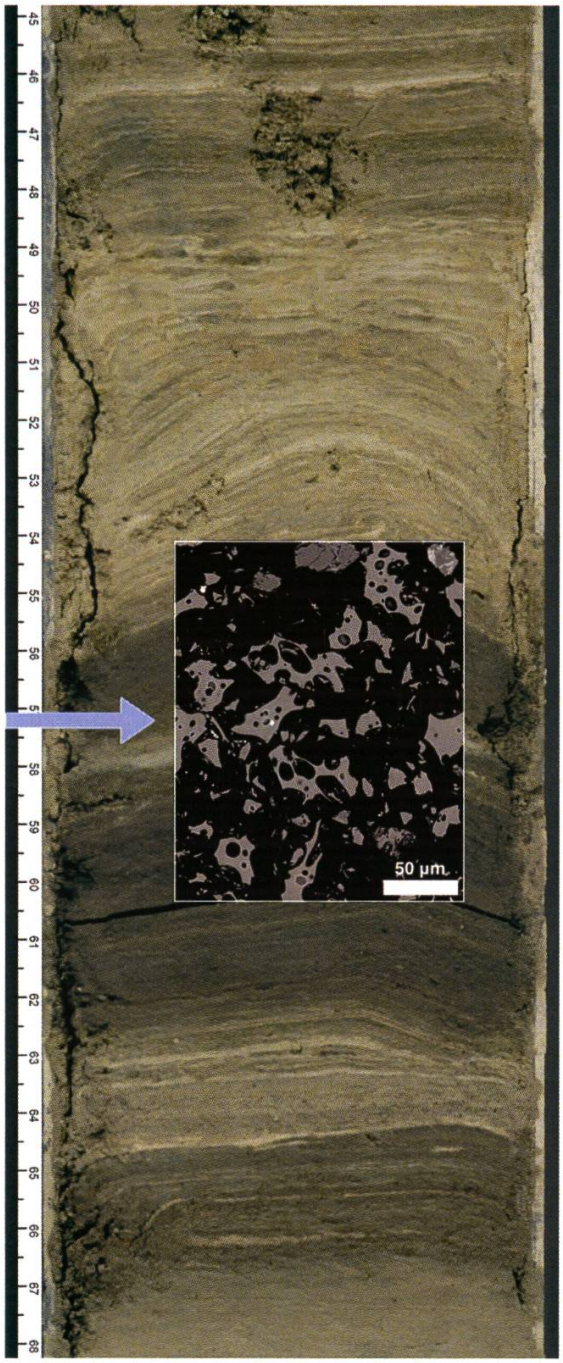


*Abbildung 4-8: Ausgewählte XRF-Profile für die Sedimente des Hüttwilersees. Ti, Si und S sind in Zählungen pro Sekunde (*counts per second, *cps) angegeben, die anderen Elemente als Verhältnisse relativ zu Ti, Fe oder Rb. Unter den einzelnen Plots ist eine mögliche Interpretation der Kurven angegeben (siehe detailliertere Angaben im Text).*





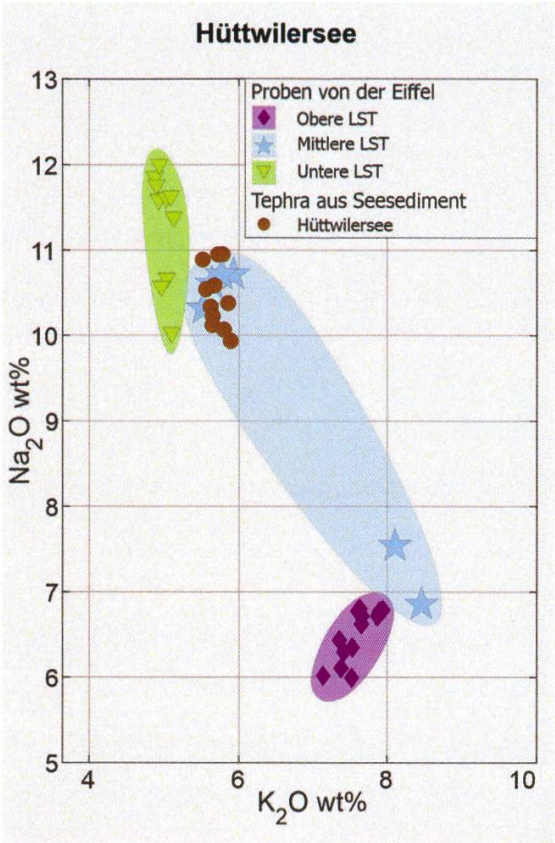


*Abbildung 4-9: Die Lage der Laacher See Tephra (LST) in 57 cm relativer Tiefe (blauer Pfeil) in Kernsegment HUE A 8-9 des Hüttwilersees (855 cm absolute Tiefe von der Sedimentoberfläche) (links). Elektronenmikroskopaufnahme (*backscattered electron image, *BSE) der LST-Scherben aus den Sedimenten (Mitte) und Vergleich der chemischen Zusammensetzung der Tephra aus dem Hüttwilersee mit Material aus der Vulkaneiffel, welches die obere, mittlere und untere Laacher See Tephraschicht repräsentiert (rechts) (aus* Moser 2021, *Lage der Mittleren LST in Abbildung rechts aus* Harms & Schmincke 2000*) (Fotos: Geoökologie Universität Basel, Fabian Rey, Zoe Moser).*

Sedimenten und daher Sulfit-Reduktion an, ein Prozess der unter anoxischen Bedingungen, d. h. ab einer Sauerstoffkonzentration von weniger als 0,1 ml/l, gefördert wird. Im Hüttwilersee sind erhöhte S-Werte besonders in einem kurzen Abschnitt ca. 865–845 cm ersichtlich, während im Bichelsee verschiedene Phasen mit erhöhten S-Werten erkennbar sind. Die Messwerte erreichen jedoch nie ähnlich hohe Werte wie im Hüttwilersee. Das Verhältnis von Zirconium (Zr) zu Rubidium (Rb) wird oft als Indikator für die Korngrösse des abgelagerten anorganischen Materials gebraucht. Erhöhte Werte, wie sie in beiden Seen wiederholt kurzfristig erreicht werden, könnten auf verstärkte Transportprozesse und Einträge von gröber sortiertem terrestrischem Material hinweisen, wie sie z. B. für Starkniederschläge oder Fluten erwartet werden *(Wang et al. 2011)*.

4.4 Tuffnachweise der Laacher See Tephra

Spätglaziale Vulkanaktivitäten in der Eiffel-Region (Deutschland) verursachten die Laacher See Tephra (LST), welche als chemisch zonierte Vulkanascheschicht in grossen Teilen Europas abgelagert worden ist. In der Nordschweiz ist diese Schicht üblicherweise einige Millimeter dick in Seesedimenten erkennbar und besteht aus mikroskopischen Glasscherben vulkanischen Ursprungs. Im Hüttwilersee konnte die LST in 855 cm Sedimenttiefe gefunden werden. Im Rahmen einer Bachelorarbeit an der ETH Zürich konnte anhand von geochemischen Untersuchungen von Sedimentmaterial die Herkunft des Materials aus dem LST-Ausbruch bestätigt werden *(Moser 2021)*. Die chemische Zusammensetzung der Tephra-Scherben wurde hierzu in einem Rasterelektronenmikroskop mittels einer kalibrierten energiedispersiven Röntgenanalyse bestimmt und mit Proben aus dem Laacher See Vulkanausbruch aus der Eiffel verglichen *(Moser 2021; Abbildung 4-9)*. Da die Ascheschicht gleichzeitig über weite Teile Europas abgelagert wurde, bietet die LST einen wichtigen chronologischen Marker für Seesedimentuntersuchungen. Das Alter der Tephraschicht wurde kürzlich revidiert und wird momentan auf 13'006±9 kalibrierte ^{14}C-Jahre vor 1950 (abgekürzt als kalibrierte Jahre vor heute) geschätzt *(Reinig et al. 2021)*.

4.5 Datierung

^{137}Cs/^{210}Pb-Datierungen

Die Altersbestimmung von oberflächennahen Sedimenten des Hüttwilersees und des Bichelsees erfolgte mithilfe von ^{137}Cs- und ^{210}Pb-Messungen. ^{137}Cs ist ein radioaktives Isotop, das infolge oberirdischer Atombombentests und des Tschernobyl-Reaktorunfalls freigesetzt worden ist. Maxima dieses Isotopes in Seesedimenten können mit solchen Freisetzungsereignissen korreliert werden und bieten so verschiedene Datierungshorizonte über die vergangenen 70 Jahre. ^{210}Pb ist ein natürlich vorkommendes radioaktives Isotop, das in Seesedimenten abgelagert und mit einer relativ kurzen Halbwertszeit von 22,3 Jahren abgebaut wird *(Bruel & Sabbatier 2020)*. Über die Konzentrationsabnahmen von ^{210}Pb in Seesedimenten können unter geeigneten Bedingungen Sedimentalter über die letzten ca. 100–150 Jahre geschätzt werden. Zur Datierung wurden gefriergetrocknete Sedimentproben (wie in *Tu et al. 2019* beschrieben) in Polystyren-Petrischalen (Durchmesser 6,8 cm, Höhe 1,1 cm) eingeschweisst und nach Equilibrierung (4 Wochen) mithilfe eines *Broad Energy Germanium Detectors* (Canberra GmbH, Rüsselsheim, Deutschland) analysiert. Die Aktivitäten von ^{210}Pb (46,5 keV), ^{241}Am (59,5 keV), von den ^{226}Ra Tochterprodukten, ^{214}Pb und ^{214}Bi (295,2, 351,9 und 609,3 keV) sowie von ^{137}Cs (661,7 keV) wurden für 24 Proben vom Hüttwilersee bis 47,5 cm Tiefe und für 22 Proben vom Bichelsee bis 101 cm Sedimenttiefe analysiert, wobei die Messung der Proben aus dem Hüttwilersee in 1 cm Intervallen und der Proben aus dem Bichelsee infolge der erwarteten höheren Sedimentationsraten in 2 cm Intervallen erfolgte. Das im Sediment durch radioaktiven Zerfall von ^{226}Ra produzierte ^{210}Pb *(supported ^{210}Pb)* wurde durch die Aktivität von ^{226}Ra geschätzt und das abgelagerte ^{210}Pb *(unsupported ^{210}Pb)* durch die Differenz zwischen der gesamten ^{210}Pb-Aktivität und derjenigen von ^{226}Ra. Der Eintrag von ^{137}Cs in Schweizer Seen wurde durch verschiedene zeitlich eng eingegrenzte Ereignisse bestimmt, u. a. dem Anstieg der ^{137}Cs-Freisetzung in den

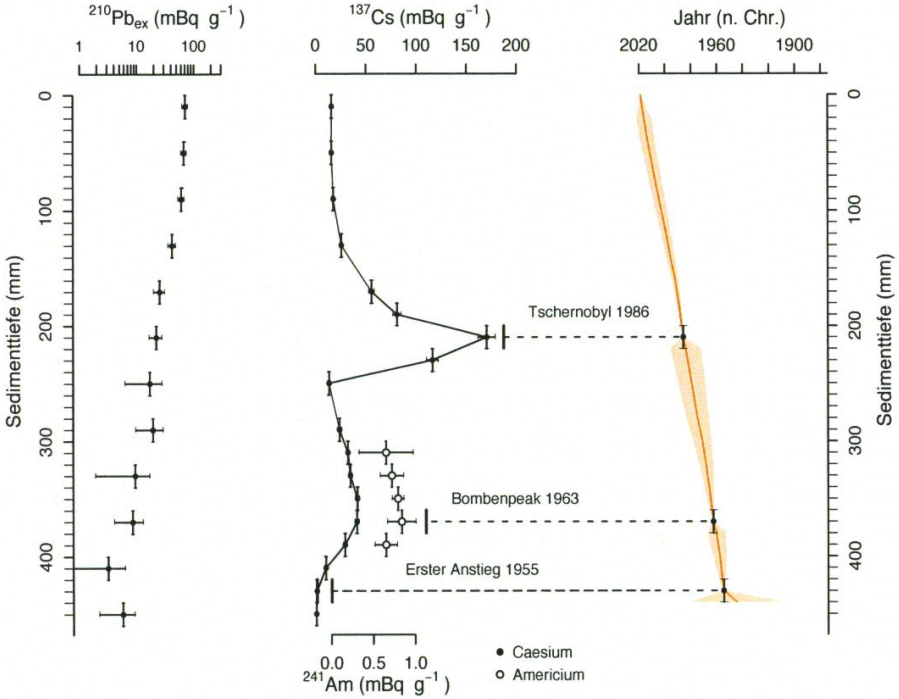
1950er-Jahren, dem Maximum der oberirdischen Atombombentests in den 1960er-Jahren und dem Tschernobyl-Nuklearunfall im Jahr 1986. Diese Ereignisse in den ^{137}Cs-Profilen beider Seen wurden nach *Bruel & Sabbatier (2020)* mit den Jahren 1955, 1963 und 1986 korreliert. Um die Lage der entsprechenden Anstiege und Maxima genauer einzuengen, wurden beim Bichelsee und Hüttwilersee noch sechs bzw. fünf Proben ohne Equilibrierung auf ^{137}Cs nachgemessen. Das Element ^{241}Am, als Marker für das Maximum der oberirdischen Atombombentests in den 1960er-Jahren, liess sich nur im Bichelsee nachweisen.

^{14}C-Datierungen

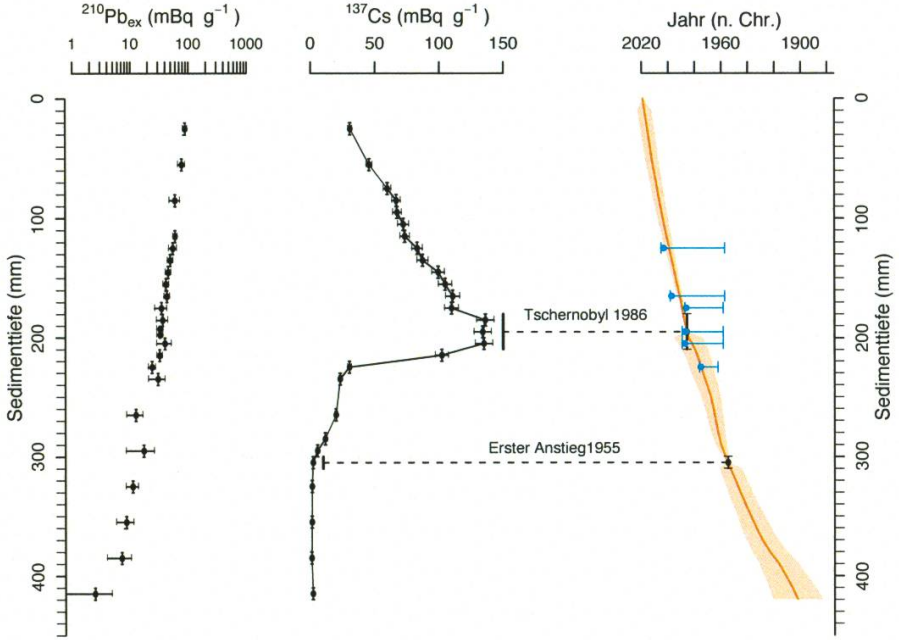
Der Gehalt des radioaktiven Isotops ^{14}C in Pflanzenmaterial steht im engen Ausgleich mit der ^{14}C-Konzentration der Atmosphäre. ^{14}C baut sich mit einer bekannten Halbwertszeit von 5730 Jahren durch radioaktiven Zerfall ab. Da Veränderungen der ^{14}C-Konzentration in der Vergangenheit aufgrund von Baumringsequenzen und anderem unabhängig datiertem Probenmaterial eingegrenzt werden können, erlauben ^{14}C-Messungen an fossilen Pflanzenproben aus Seesedimenten Altersschätzungen über die vergangenen ca. 50'000 Jahre. Aquatische Pflanzen können auch alten gelösten Kohlenstoff im Seewasser (z. B. aus verwittertem Kalkgestein) aufnehmen. Aquatische Sedimentbestandteile liefern daher bei der Analyse oft zu hohe ^{14}C-Alter. Für das Projekt KUMIT wurden daher ausschliesslich terrestrische Pflanzenreste datiert. Es wurde auch darauf geachtet, nur Reste zu analysieren, die im Umland von Seen ausserhalb der Sedimente (z. B. in Böden) leicht abbaubar sind. Solche Reste können im Gegensatz zu resistenteren Strukturen (z. B. Holz, Holzkohle) nicht jahrzehntelang im Einzugsgebiet erhalten bleiben und daher bei anschliessender Umlagerung ins Sediment die ^{14}C-Chronologie auch nicht verfälschen. Insgesamt konnten für beide Seen 2093 Sedimentproben auf Pflanzenreste untersucht werden. Dafür wurde jeweils die eine Hälfte der halbierten Sedimentkerne in 1–2 cm dicke Scheiben geschnitten und diese unter fliessendem Wasser in einem Sieb mit 0,2 mm Maschenweite geschlämmt. Aus dem zurückbleibenden Material wurden unter dem Binokular bei 6- bis 40-facher Vergrösserung die Überreste von terrestrischen Pflanzen (Knospenschuppen, Nadeln, Samen, Blattreste u. a.) aussortiert, bestimmt, gereinigt und bei 80 °C im Trocknungsschrank getrocknet. Anschliessend wurde das Material eingewogen und die eher zu leichten Proben wurden aussortiert. Basierend auf frühere Studien ergeben mindestens 1,5 mg Trockengewicht meistens gute ^{14}C-Resultate. Das *Laboratory for the Analysis of Radiocarbon with AMS* (LARA) an der Universität Bern datierte insgesamt 72 Proben aus dem Bichelsee und 129 Proben aus dem Hüttwilersee. Die zusammenfassenden Listen aller Datierungen sind im Anhang zu finden *(Tabellen A1, A2, gerundet nach Stuiver & Polach 1977)*.

Abbildung 4-10: ^{137}Cs-, ^{241}Am- und ^{210}Pb-Profile für den Bichelsee (links) und den Hüttwilersee (rechts) sowie die mit dem piecewise *CRS-Modell geschätzten Alter für die obersten Sedimentabschnitte. Anstiege und Maxima in den ^{137}Cs-Aktivitäten, die zur Datierung gebraucht wurden (Anstieg der ^{137}Cs-Freisetzung in den 1950er-Jahren, Maximum in den 1960er-Jahren infolge von Atombomben-Tests und der Tschernobyl-Peak), sind ebenfalls angezeigt. ^{241}Am-Aktivitäten in den Hüttwilersee-Sedimenten waren für eine verlässliche Messung zu tief. Als Ergänzung zeigen blaue horizontale Balken 95 %-Alterskonfidenzintervalle von ^{14}C-Datierungen in den obersten Sedimentschichten des Hüttwilersees.*

Bichelsee



Hüttwilersee

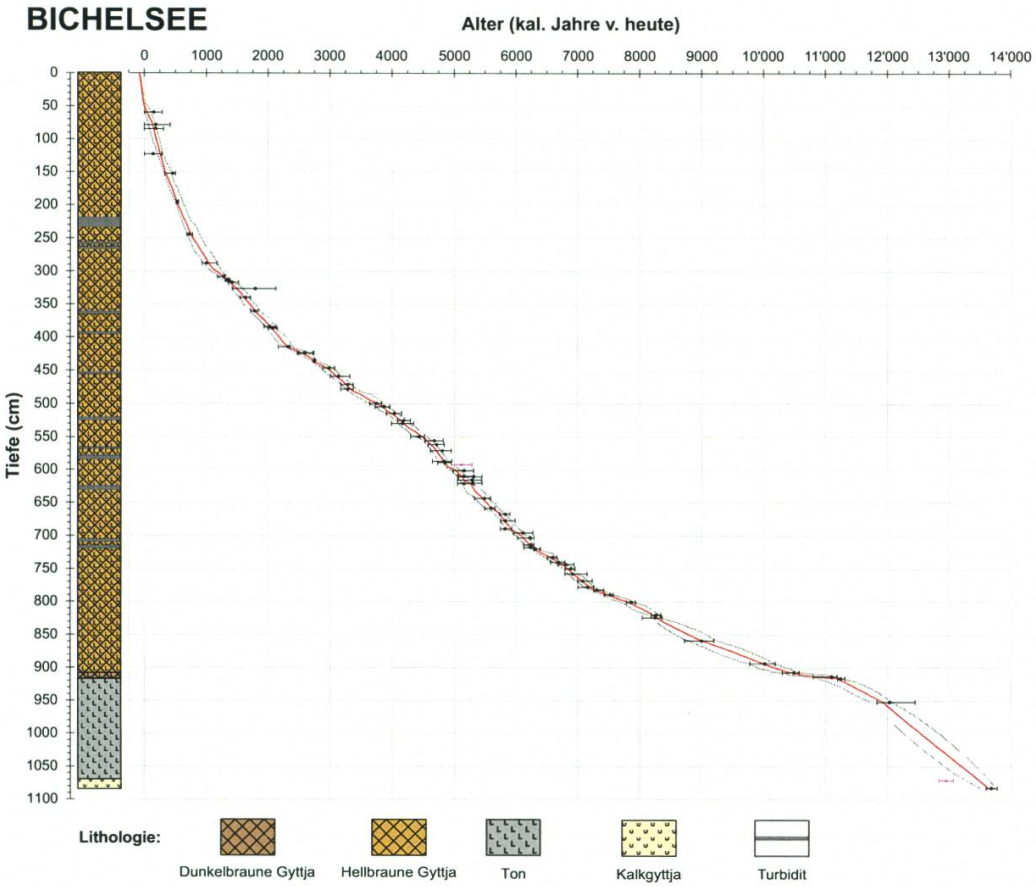


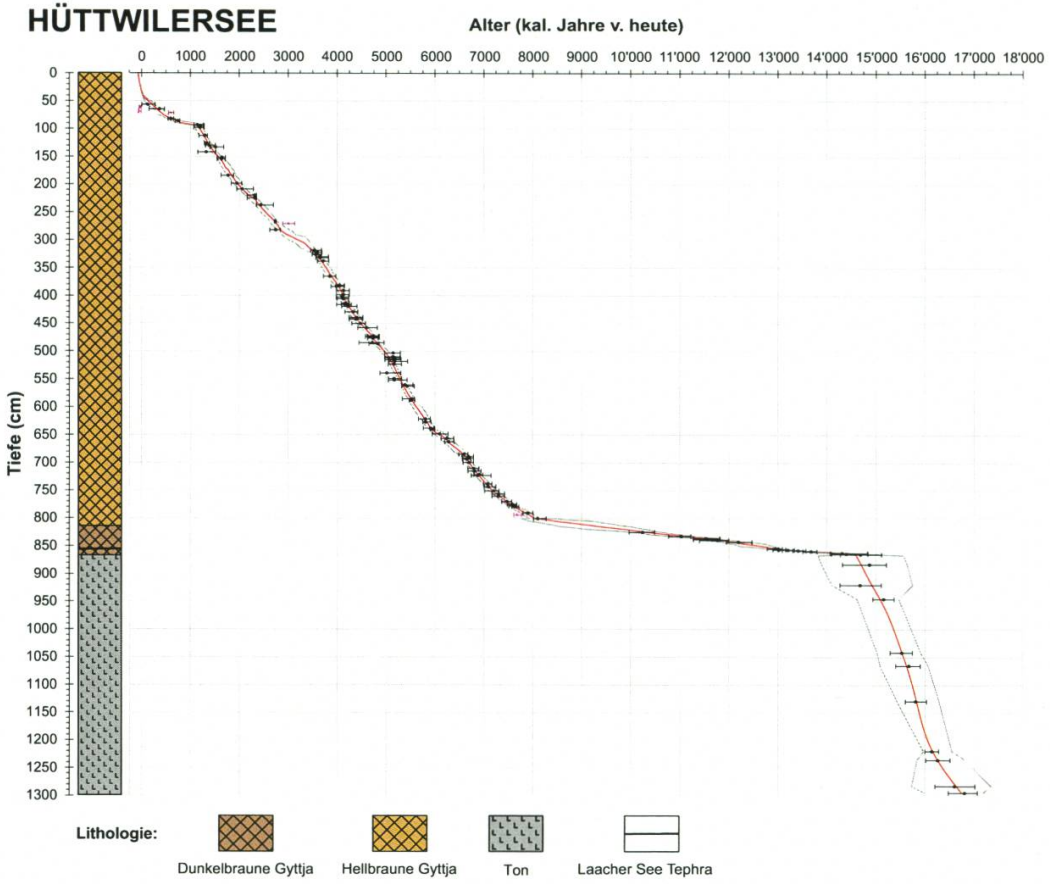
4.6 Tiefen-Alter-Modellierung

Oberste Sedimentschichten

Veränderungen in den ^{137}Cs-Aktivitäten, welche dem ersten Anstieg von Atombombentests im Jahr 1955 (40–42 cm), dem Maximum im Jahr 1963 (36–38 cm) und dem Tschernobyl-Reaktorunfall von 1986 (20–22 cm) zugeordnet werden konnten, waren in den Bichelseesedimenten klar erkennbar *(Abbildung 4-10)*. Dass das Maximum in 36–38 cm Sedimenttiefe mit dem Atombombentest-Höhepunkt in den 1960er-Jahren übereinstimmt, bestätigten auch die messbaren Aktivitäten von ^{241}Am. Beim Hüttwilersee war das erwartete Maximum von ^{137}Cs in den 1960er-Jahren schwach ausgeprägt und daher für die Datierung unbrauchbar *(Abbildung 4-10)*. Allerdings waren der Anstieg in den 1950er-Jahren (30–31 cm) sowie das Maximum infolge des Tschernobyl-Unfalls 1986 (18–21 cm) deutlich erkennbar. Die Modellierung der Beziehung zwischen Sedimenttiefe und Alter für die obersten Sedimentschichten des Bichelsees und des Hüttwilersees folgte dem *Piecewise Constant Rate of Supply Model*, beschrieben in *Bruel & Sabbatier (2020)*. Bei der Methode handelt es sich um eine Erweiterung des *Constant Rate of Supply (CRS)*-Ansatzes, der so angepasst wurde, dass die errechnete Beziehung zwischen Sedimenttiefe und Alter die Zeitintervalle miteinschliessen muss, die durch andere Datierungsmethoden unabhängig datiert worden sind (für den Bichelsee 1955, 1963 und 1986 und für den Hüttwilersee 1955 und 1986). Für eine sinnvolle Anwendung des Ansatzes müssen idealerweise Messungen oder Schätzungen des gesamten ^{210}Pb-Inventars der analysierten Ablagerung, sicher aber durchgehende Schätzungen der ^{210}Pb-Aktivitäten zwischen den auf ^{137}Cs analysierten Horizonten verfügbar sein. Für den Bichelsee wie für den Hüttwilersee wurden daher die ^{210}Pb-Aktivitäten zwischen den gemessenen Horizonten durch log-lineare Interpolation gegen das akkumulierte Sedimenttrockengewicht geschätzt. Unterhalb des untersten durch ^{137}Cs datierten Horizonts waren im Bichelsee die eingetragenen *(unsupported)* ^{210}Pb-Konzentrationen zu tief, um die Sedimente verlässlich zu datieren. Für den Hüttwilersee war eine Altersschätzung noch bis zu einer Sedimenttiefe von 42 cm möglich *(Abbildung 4-10)*, obwohl die Altersangaben unterhalb des tiefsten ^{137}Cs-datierten Horizonts durch zunehmend hohe Datierungsunsicherheiten charakterisiert waren. Modellierungen mit dem CRS-Ansatz werden stark durch fehlende Schätzungen des eingetragenen *(unsupported)* ^{210}Pb im untersten Teil von ^{210}Pb-Profilen beeinträchtigt *(Tylmann et al. 2016)*. Beim Hüttwilersee enthielten die untersten ^{210}Pb-Messungen noch eingetra-

Abbildung 4-11: Alters-Tiefenbeziehung und Lithologien für die beiden Seesedimentabfolgen (Bichelsee links und Hüttwilersee rechts). Die schwarzen Punkte zeigen die kalibrierten Alter mit 95 % (2σ) Kalibrationsbereichen (IntCal20: Reimer et al. 2020*). Die rosa Kreuze zeigen die verworfenen Alter inkl. Kalibrationsbereiche. Die roten Linien sind die modellierten Chronologien und die grauen Linien zeigen wiederum die 95 % (2σ) Wahrscheinlichkeiten der jeweiligen Modelle. Für die Bichelsee-Sequenz wurde aufgrund der fehlenden abrupten Sedimentwechsel das ganze Alters-Tiefenmodell in einem Umgang gerechnet (Bacon:* Blauuw & Christen 2011*). Für die Hüttwilersee-Chronologie sind die Berechnungen dreigeteilt, da es insgesamt zwei markante Sedimentwechsel gibt (Übergang von Ton zu dunkelbrauner Gyttja und von dunkelbrauner zu hellbrauner Gyttja). Für die oberen beiden Bereiche (Gyttja) wurde das Bacon-Modell verwendet* (Blauuw & Christen 2011). *Für den unteren Bereich (Ton) vergrössern sich die Kalibrationsbereiche, weshalb einfachere Modelle sowohl für die eigentliche Chronologie (rote Linie: clam* [Blaauw 2010]*) wie auch für den 95 % Modellbereich (graue Linien: GAM* [Heegard et al. 2005]*) gewählt wurden.*


BICHELSEE
Alter (kal. Jahre v. heute)
0 1000 2000 3000 4000 5000 6000 7000 8000 9000 10'000 11'000 12'000 13'000 14'000
Tiefe (cm)
0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700 750 800 850 900 950 1000 1050 1100
Lithologie:
Dunkelbraune Gyttja
Hellbraune Gyttja
Ton
Kalkgyttja
Turbidit


HÜTTWILERSEE
Alter (kal. Jahre v. heute)
0 1000 2000 3000 4000 5000 6000 7000 8000 9000 10'000 11'000 12'000 13'000 14'000 15'000 16'000 17'000 18'000
Tiefe (cm)
0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700 750 800 850 900 950 1000 1050 1100 1150 1200 1250 1300
Lithologie:
Dunkelbraune Gyttja
Hellbraune Gyttja
Ton
Laacher See Tephra

genes ^{210}Pb, was darauf hinweist, dass die Messungen nicht das gesamte eingetragene ^{210}Pb-Inventar umfassten. Daher wurde für die Modellierung gemäss *Tu et al. (2018)* und *Tylmann et al. (2016)* das ^{210}Pb-Inventar zwischen 42 und 53 cm durch log-lineare Extrapolation (gegen akkumuliertes Sediment-Trockengewicht) ergänzt.

Altersmodellierung der gesamten Sedimentabfolgen
Zur Berechnung der Tiefen-Altersbeziehung für die gesamte Sedimentabfolge beider Seen standen die anhand der ^{137}Cs- und ^{210}Pb-Aktivitäten geschätzten Alter, insgesamt 201 ^{14}C-Datierungen, sowie für den Hüttwilersee das Alter der Laacher See Tephra-Schicht zur Verfügung. Sämtliche Datenpunkte vom Bichelsee wurden in einem ersten Umgang für die Alters-Tiefenmodellierung verwendet. Dabei kam ein *Bayessches Modell* zur Anwendung (Bacon: *Blauuw & Christen 2011*). Das Bacon-Modell passt mit Grundannahmen zur Sedimentation die Datenpunkte (^{14}C-Datierungen, ^{210}Pb-Datierungen usw.) optimal in die ^{14}C-Kalibrationskurve (IntCal20: *Stuiver & Reimer 1993, Reimer et al. 2020*) ein. Dabei wurde für den Bichelsee eine durchschnittliche Sedimentationsrate von zehn Jahren pro Zentimeter angenommen. Nur zwei von den insgesamt 72 ^{14}C-Alter mussten schliesslich verworfen werden *(Tabelle A1, Anhang)*. Die Bichelsee-Chronologie ist somit ausserordentlich robust *(Abbildung 4-11 links)* und die zahlreich vorhandenen Turbidite scheinen keine negativen Auswirkungen auf die Qualität der Alters-Tiefenbeziehung zu haben. Für die Hüttwilersee-Chronologie mussten von den insgesamt 129 ^{14}C-Datierungen nur deren fünf verworfen werden *(Tabelle A2, Anhang)*. Als weiterer Datenpunkt wurde das Alter der Laacher See Tephra *(Kapitel 4.4)* hinzugenommen. Jenes Alter wurde kürzlich auf 13'006±9 kalibrierte Jahre vor heute präzisiert *(Reinig et al. 2021)*. Für die obersten ^{137}Cs-datierten Bereiche standen weitere sechs ^{14}C-Datierungen zur Verfügung (kalibriert mit OxCal: *Bronk Ramsey 1994, 1995*), welche sich aber nur zum qualitativen Vergleich hinzuziehen und nicht für die eigentlichen Modellberechnungen verwenden liessen. Da vom tonigen Bereich zur dunkelbraunen Gyttja und dann wieder von der dunkelbraunen zur hellbraunen Gyttja abrupte Wechsel der Sedimentationsraten zu erwarten waren, wurde die Alters-Tiefenmodellierung für die Sedimentabfolge des Hüttwilersees in drei Abschnitten durchgeführt und danach zusammengesetzt *(Abbildung 4-11 rechts)*. Für die oberen beiden Bereiche (Gyttja) kam wiederum das Bacon-Modell zur Anwendung, wobei von 0 bis 800,5 cm bei der Modellrechnung durchschnittliche Sedimentationsraten von zehn Jahren pro Zentimeter angenommen wurden. Von 800,5 bis 865,5 cm schienen sehr tiefe Sedimentationsraten plausibel, weshalb hier die vom Modell vorgeschlagenen 100 Jahre pro Zentimeter verwendet wurden. Unterhalb 865,5 cm, im tonigen Bereich, nehmen die Unsicherheiten der ^{14}C-Kalibrationskurve generell zu. Deshalb kamen für jenen Abschnitt einfachere Alters-Tiefenmodelle zur Anwendung, die nicht auf einem Bayesschen Ansatz beruhen. Der Hauptmodellkurve lag das clam-Modell zugrunde *(Blauuw 2010)*, während für den Fehlerbereich ein GAM-Modell (GAM = *generalized mixed-effect regression*) verwendet wurde *(Heegard et al. 2005)*.

Altersangaben zu den Sedimenten beider Seen in den folgenden Kapiteln beziehen sich auf die hier beschriebenen Alters-Tiefenbeziehungen und werden als kalibrierte ^{14}C-Alter vor heute (Jahre vor heute, Nullpunkt = 1950 n. Chr.) oder Jahre vor oder nach Christi Geburt (v. Chr./n. Chr.) angegeben.

4.7 Literatur

- *Blaauw, M., 2010:* Methods and code for «classical» age-modelling of radiocarbon sequences. – Quaternary Geochronology, 5, 512–528.
- *Blaauw, M. & Christen, J. A., 2011:* Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. – Bayesian Analysis, 6, 457–474.
- *Bronk Ramsey, C., 1994:* Analysis of chronological information and radiocarbon calibration: The program OxCal. – Archaeological Computing Newsletter, 41, 11–26.
- *Bronk Ramsey, C., 1995:* Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: the OxCal program. – Radiocarbon, 37, 425–430.
- *Bruel, R. & Sabatier, P., 2020:* serac: an R package for ShortlivEd RAdionuclide chronology of recent sediment cores. – Journal of Environmental Radioactivity, 225, 106449.
- *Harms, E. & Schmincke, H. U., 2000:* Volatile composition of the phonolitic Laacher See magma (12,900 yr BP): implications for syn-eruptive degassing of S, F, Cl and H_2O. – Contributions to Mineralogy and Petrology, 138, 84–98.
- *Heegaard, E., Birks, H. J. & Telford, R. J., 2005:* Relationships between calibrated ages and depth in stratigraphical sequences: An estimation procedure by mixed-effect regression. – The Holocene, 15, 612–618.
- *Heiri, O., Lotter, A. F. & Lemcke, G., 2001:* Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. – Journal of Paleolimnology, 25, 101–110.
- *Moser, Z., 2021:* The search for Laacher See Tephra and Vasset-Kilian Tephra in Swiss lake sediments. – unpubl. BSc Arbeit, ETH Zürich, Zürich, 51 pp.
- *Naeher, S., Gilli, A., North, R. P., Hamann, Y. & Schubert, C. J., 2013:* Tracing bottom water oxygenation with sedimentary Mn/Fe ratios in Lake Zurich, Switzerland. – Chemical Geology, 352, 125–133.
- *Reimer, P. J., Austin, W. E. N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P. G., Bronk Ramsey, C., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Hajdas, I., Heaton, T. J., Hogg, A. G., Hughen K. A., Kromer, B., Manning, S. W., Muscheler, R., Palmer, J. G., Pearson, C., van der Plicht, J., Reimer, R. W., Richards, D. A., Scott, E. M., Southon, J. R., Turney, C. S. M., Wacker, L., Adolphi, F., Büntgen, U., Capano, M., Fahrni, S. M., Fogtmann-Schulz, A., Friedrich, R., Köhler, P., Kudsk, S., Miyake, F., Olsen, J., Reinig, F., Sakamoto, M., Sookdeo, A., & Talamo S., 2020:* The IntCal20 northern hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). – Radiocarbon, 62, 725–757.
- *Reinig, F., Wacker, L., Jöris, O., Oppenheimer, C., Guidobaldi, G., Nievergelt, D., Adolphi, F., Cherubini, P., Engels, S., Esper, J., Land, A., Lane, C., Pfanz, H., Remmele, S., Sigl, M., Sookdeo, A., & Büntgen, U., 2021:* Precise date for the Laacher See eruption synchronizes the Younger Dryas. – Nature, 595, 66–69.
- *Stuiver, M. & Polach, H. A., 1977:* Discussion: Reporting of ^{14}C data. – Radiocarbon, 19, 355–363.
- *Stuiver, M. & Reimer, P. J., 1993:* Extended ^{14}C data base and revised CALIB 3.0 ^{14}C age calibration program. – Radiocarbon, 35, 215–230.
- *Tu, L., Zander, P., Szidat, S., Lloren, R. & Grosjean, M., 2020:* The influences of historic lake trophy and mixing regime changes on long-term phosphorus fraction

retention in sediments of deep eutrophic lakes: a case study from Lake Burgäschi, Switzerland. - Biogeosciences, 17, 2715-2729.

- *Tylmann, W., Bonk, A., Goslar, T., Wulf, S. & Grosjean, M., 2016:* Calibrating ^{210}Pb dating results with varve chronology and independent chronostratigraphic markers: problems and implications. - Quaternary Geochronology, 32, 1-10.
- *Wang, M., Zheng, H., Xie, X., Fan, D., Yang, S., Zhoa, Q. & Wang, K., 2011:* A 600-year flood history in the Yangtze River drainage: comparison between a subaqueous delta and historical records. - Chinese Science Bulletin, 56, 188-195.