

*ELSA*interactive++

Entwicklung eines Tools

zur Visualisierung und Analyse von Sedimentkerndaten
und dessen geologische Anwendung

Dissertation

zur Erlangung des Grades

„Doktor der Naturwissenschaften“

im Promotionsfach Geowissenschaften

am Fachbereich Chemie, Pharmazie,

Geographie und Geowissenschaften

der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Benedikt Werner Diensberg

geb. in Neuwied

Mainz, 2019

1. Berichterstatter: F.S.

2. Berichterstatter: E.S.

Tag der mündlichen Prüfung: 05.03.2020

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	<i>ELSA</i>interactive++	6
2.1	Einführung	6
2.2	Altersmodell	7
2.3	Statistische Methoden	8
2.3.1	Filter	8
2.3.2	Resampling	19
2.3.3	Hauptkomponentenanalyse (PCA)	20
2.3.4	Kreuzkorrelation	23
2.4	Prozesse der Radonexhalation	23
2.5	Praxis Einsatz	25
3	Sedimentationsprozess im Laacher See Becken	26
3.1	Einführung	26
3.2	Abstract	26
3.3	Introduction	27
3.4	Study area	28
3.5	Materials and Methods	29
3.6	Results	31
3.7	Discussion	35
3.8	Conclusion	35
4	AU Composit	38
4.1	Einführung	38
4.2	Verwandte Arbeiten	41
4.3	Dynamic Time Warping	41
4.4	Core Merger	43
4.5	Evaluation	45
4.6	AU Composit	47
5	Fehlerabschätzung zum Aridity-Index für PalMod	51
5.1	Einführung	51
5.2	Fehlerabschätzung	53

6	Fazit	55
7	Danksagung	56
8	Literaturverzeichnis	57
9	Appendix	67
9.1	Tabellen	67
9.2	<i>ELSAinteractive</i> ++ Bedienungsanleitung	70
9.3	<i>ELSAinteractive</i> ++ Code Dokumentation	103

Kapitel 1

Einleitung

Für diese Dissertation wurde in Zusammenarbeit der Arbeitsgruppe Klima und Sedimente des Instituts für Geologie und der Arbeitsgruppe Algorithmische Geometrie des Instituts für Informatik der Johannes Gutenberg-Universität Mainz im Rahmen des Projektes PalMod - Paleo Modelling **ELSAinteractive**++, ein Programm zur Darstellung und statistischen Auswertung von Bohrkerndaten, implementiert. Im Rahmen des Projektes Angus II wurde es um weitere statistische Methoden und Datenverarbeitungsroutinen ergänzt (Kapitel 2). Es werden drei geologische Projekte vorgestellt, in denen **ELSAinteractive**++ angewandt und praktisch getestet wurde: Die Auswertung und Wiederaufarbeitung von Bohrkerndaten des Laacher Sees (Kapitel 3), die Fehlerberechnung und \sim darstellung für einen weltweiten Aridity-Index (Kapitel 5) und der Verschmelzung zweier lückenhafter Bohrkerndatensätze des Auel Maares zu einem lückenlosen Datensatz über 60000 Jahre in Jahresauflösung "AU Composit" mit dem eigens entwickelten Tool **Core Merger** (Kapitel 4).

Kapitel 2

ELSAinteractive++

2.1 Einführung

Ziel von **ELSAinteractive**++ war es aus den Daten des **ELSA**SedimetCore-Archive schnell und intuitiv publikationsreife Plots erzeugen zu können. Insbesondere sollte es einfach möglich sein zwischen einer Alters- und einer Tiefendarstellung der Daten zu wechseln. Zudem sollte die Datenhaltung weiterhin in Form einer **Excel**-Datenbank erfolgen. Außerdem sollte es möglich sein, die Daten direkt statistisch aufzubereiten.

Zur grafischen Darstellung von Zeitreihen gibt es bereits verschiedene Möglichkeiten: Sehr einfache Darstellungen lassen sich direkt mit **Microsoft Excel** oder **Libre /Open Office Calc** erstellen. Aber diese sind stark eingeschränkt im Funktionsumfang. Großen Einfluss auf die Graphen und deren Erstellung erhält man, wenn diese mit **Matlab**, **R** oder **Python** erstellt werden. Dies erfordert allerdings Kenntnisse in der jeweiligen Programmiersprache. Sehr mächtige und dennoch ohne Programmierkenntnisse bedienbare Tools sind beispielsweise **Origin** von OriginLabs und **Grapher** von Golden Software. Nachteil hier sind die hohen Kosten. Außerdem fehlt ein schneller, sortierter Zugriff auf Daten und die Möglichkeit einer Tiefen-Alters-Umrechnung.

ELSAinteractive entstand als ein institutsübergreifendes Projekt der Arbeitsgruppe Klima und Sedimente des Instituts für Geologie und der Arbeitsgruppe Algorithmische Geometrie des Instituts für Informatik der Johannes Gutenberg Universität. Zunächst wurde es von Martin Seelge von 2008-2011 in **Java** entwickelt, basierend auf dem Eclipse-Framework. Unter anderem fehlten hier jedoch Filter und statistische Funktionen und es existierten keine Schnittstellen, um diese Funktionen einfach nachzurüsten. Außerdem war die Projektstruktur, bedingt durch das Eclipse-Framework, umständlich und der Sourcecode schlecht wartbar. Unter anderem ist es durch das Framework nicht möglich Dateien außerhalb eines speziellen Projektordners zu speichern oder zu laden.

mit der Datenreihe, bestehend aus Messdaten und zugehöriger Tiefe, und pro Bohrkern einen **Ager**. Ein **Ager** ist eine Datei, in der für bekannte stratigraphische Punkte deren Tiefe und das entsprechend zugeordnete Alter eingetragen sind. Außerdem enthält der **Ager** eine Liste aller **Events** mit ihrer Anfangs- und End-Tiefe. Als **Event** werden Ereignisse bezeichnet, welche die in situ Sedimentfolge des Kerns stören. Dies kann beispielsweise durch einen großen Sedimenteintrag während eines Hochwasserereignisses, durch eine Tephra oder durch eine Rutschung bedingt sein. Diese **Events** tragen zwar zur Länge des Kerns bei, enthalten jedoch keine zusätzliche Zeitinformation, da das gesamte Sediment eines Events innerhalb eines extrem kurzen Zeitraumes eingetragen wurde. Solche **Events** werden bei der Altersumrechnung herausgerechnet. Das Alter a zu einer Tiefe d wird dabei über eine modifizierte lineare Interpolation zwischen den beiden nächsten umgebenden stratigraphischen Alters-Tiefen-Paaren (d_L, a_L) und (d_H, a_H) berechnet. Wobei d_L die größte und d_H die kleinste Tiefe im **Ager** sind, für die gilt $d_L \leq d < d_H$. Außerdem sei e_G die Summe der Längen aller **Events** zwischen d_L und d_H und e_D die Summe der Längen aller **Events** zwischen d_L und d . Dann wird das Alter berechnet als:

$$a = a_L + (a_H - a_L) \frac{d - d_L - e_D}{d_H - d_L - e_G}$$

Liegt d oberhalb oder unterhalb aller im **Ager** definierten Tiefen, so wird das Alter stattdessen extrapoliert, indem die beiden letzten bzw. ersten Alters-Tiefen-Paare eingesetzt werden.

Mit **ELSAinteractive++** dargestellte Graphen können als Bilder im **png**-, **pdf**- oder **svg**-Format exportiert werden oder als Datentabelle zur weiteren Bearbeitung mit anderen Programmen.

2.3 Statistische Methoden

ELSAinteractive++ bietet verschiedene Möglichkeiten Daten statistisch auszuwerten und zu bearbeiten, welche im Folgenden beispielhaft an der Bearbeitung der Daten aus den Projekten zum AU Composit (4.6) und zur Radonexhalation (2.4) näher beschrieben werden:

2.3.1 Filter

Allgemein sind Filter Operatoren, die aus einer Zeitreihe bestimmte Anteile entfernen. Ziel der Anwendung von Filtern ist es aus überlagerten Signalen, die zugrundeliegenden Signale zu rekonstruieren und Störsignale, wie z.B. Messrauschen, zu entfernen. Filter können so konstruiert werden, dass sie entweder direkt in der Zeitdomäne, oder in der Frequenzdomäne wirken. Für letztere wird die Zeitreihe mithilfe einer Fouriertransformation (FT) in Frequenzdomäne überführt, dort das Filter angewandt und über eine inverse FT

wieder in die Zeitdomäne überführt. Man unterscheidet in der Frequenzdomäne zwischen Hochpass-, Tiefpass- und Bandpass-Filtern. Ein Tiefpassfilter lässt nur Frequenzen unterhalb einer vorgegebenen Grenzfrequenz durch und dämpft alle anderen. Analog lässt ein Hochpassfilter Frequenzen oberhalb passieren und ein Bandpassfilter dämpft alle Frequenzen außerhalb eines vorgegebenen Frequenzbandes. Ein Filter eines Typs lässt sich einfach in einen entsprechenden anderen transformieren (Zumbahlen, 2007).

In der Zeitreihenanalyse werden Filter dazu eingesetzt eine Zeitreihe zu glätten, gezielt störende Anteile zu entfernen (z.B. saisonale Schwankungen) oder Trends heraus zu rechnen.

Im Folgenden wird die Funktionsweise der implementierten Filter und ihre Auswirkung auf eine Zeitreihe erläutert. Bei allen vorgestellten Filtern handelt es sich um Tiefpassfilter, die Aussagen gelten ebenso für die entsprechenden Hochpassfilter. Bis auf das Bessel- und Butterworthfilter werden die Varianten der Filter in der Zeitdomäne vorgestellt. Zur Veranschaulichung wurde ein künstlicher Datensatz aus einem Sinus Chirp erzeugt, welches mit additivem, gaußischem Rauschen gestört wurde. Zusätzlich wurden bei 40, 50, 62 und 90 s manuell extreme Ausreißer eingefügt (s. Abb. 2.2). Außerdem wurden die Filter auf einen Ausschnitt des ELSA-19-*C_{org}*-Stack (aus (Sirocco et al., 2020), s. Kapitel 4), konkret dem dritten Grönland-Interstadial (GI3), und einen Radon-Datensatz (aus Mudelsee et al. (2020), s. Kapitel 2.4) angewandt, um die Auswirkung auf reale Daten zu zeigen. Bei allen Abbildungen ist hinter der gefilterten Kurve (schwarz) auch die ungefilterte Kurve (türkis) und bei den künstlichen Daten die originale ungestörte Kurve (orange) dargestellt.

2.3.1.1 Gleitender Mittelwert

Der gleitende Mittelwert ist wohl eines der bekanntesten Filter. Er ersetzt jeden x-Wert x_i eines Punktes $p_i = (x_i, y_i)$ eines Datensatzes durch den Mittelwert der x-Werte einer bestimmten Menge von Punkten um p_i . In *ELSAinteractive++* sind drei Varianten dieses Filters implementiert:

2.3.1.1.1 Punktweiser gleitender Mittelwert Der punktweise gleitende Mittelwert ist die einfachste Variante des gleitenden Mittelwertes. Zu jedem Punkt p_i wird der Mittelwert der x-Werte aus d Punkten symmetrisch um p_i gebildet und x_i durch diesen Mittelwert ersetzt, für $d \in \mathbb{N}$ ungerade.

$$x'_i = \sum_{k=i-\frac{d}{2}}^{i+\frac{d}{2}} x_k$$

Abbildung 2.2 zeigt den Effekt dieses Filters auf eine Datenkurve: Die Punkte werden um ihren Mittelwert zusammengezogen, dadurch werden Extrema kleiner, aber breiter. Dies gilt auch für einzelne Ausreißer.

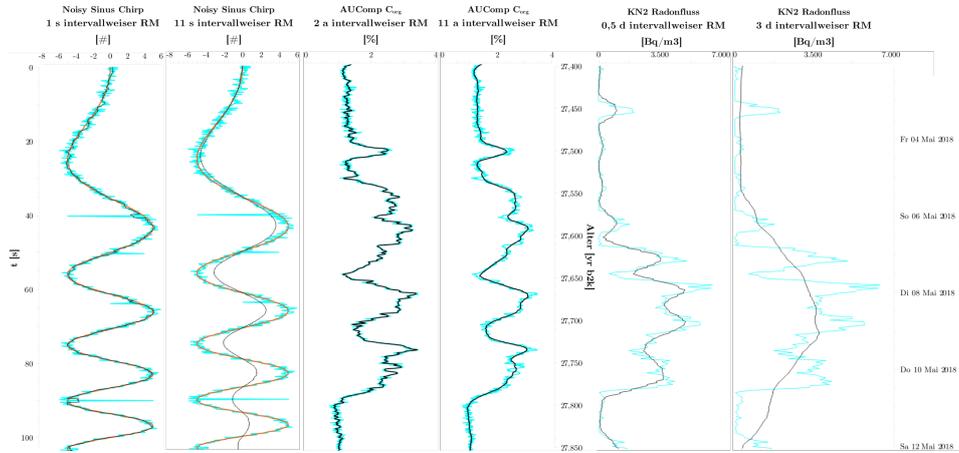


Abbildung 2.3: Daten gefiltert mit 5 bzw. 55 Punkt gleitendem Mittelwert. Links synthetischer Datensatz aus Sinus-Chirp mit additivem gaußischem Rauschen, mitte Daten des AUComp C_{org} (Sirocko et al., 2020) und rechts Radonexhalation Datensatz aus Mudelsee et al. (2020). Orange: unverrauschte Daten (nur synthetisch), türkis: verrauschte Daten, schwarz: gefilterte Kurve.

2.3.1.1.3 Gewichteter gleitender Mittelwert Der gewichtete gleitende Mittelwert berechnet sich ähnlich wie der punktweise. Statt eines einfachen Mittelwertes über x_i wird jeder Wert x_i zusätzlich mit einem Gewichtsfaktor w_i multipliziert. Durch die Wahl der Gewichte kann somit der Einfluss der einzelnen Punkte auf den aktuellen Wert abhängig von ihrem Abstand variiert werden. Für einen Punkt p_i berechnet sich der neue x-Wert als:

$$x'_i = \sum_{k=i-\frac{d}{2}}^{i+\frac{d}{2}} w_k x_k$$

Wobei für die Gewichte gilt:

$$\sum_i w_i = 1$$

Meist wird eine Verteilung der Gewichte symmetrisch vom Mittelpunkt absteigend gewählt, um abzubilden, dass der Einfluss eines Ereignisses auf den aktuellen Wert mit größerem (zeitlichen) Abstand abnimmt. Durch die Wahl anderer Gewichte können andere Arten der Beeinflussung der Daten untereinander abgebildet werden. Beispielsweise kann durch asymmetrische Gewichte der Einfluss vorheriger Datenpunkte stärker (oder schwächer) in die Glättung eingehen als der nachfolgender.

In Abbildung 2.4 wurden symmetrische, exponentiell abnehmende Gewichte verwendet. Im Vergleich mit Abbildung 2.2 erkennt man, dass der

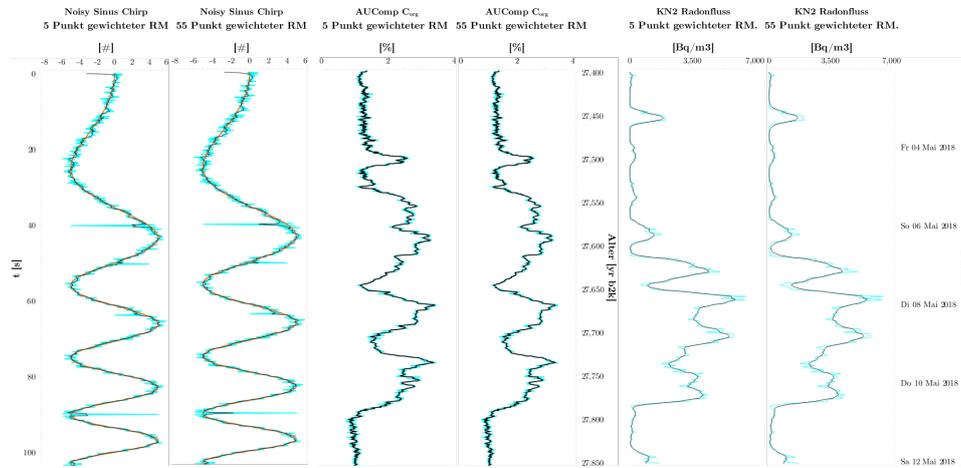


Abbildung 2.4: Daten gefiltert mit 5 bzw. 55 Punkt gewichtetem gleitendem Mittelwert. Links synthetischer Datensatz aus Sinus-Chirp mit additivem gaußischem Rauschen, mitte Daten des AUComp C_{org} (Sirocko et al., 2020) und rechts Radonexhalation Datensatz aus Mudelsee et al. (2020). Orange: unverrauschte Daten (nur synthetisch), türkis: verrauschte Daten, schwarz: gefilterte Kurve.

Effekt auf eine Datenkurve ähnlich dem des ungewichteten gleitenden Mittelwertes ist. Extrema werden nicht so stark in die Breite gezogen, da der Einfluss eines Datenpunktes auf die Berechnung eines anderen Wertes mit zunehmendem Abstand langsam abnimmt.

2.3.1.2 Median Filter

Das Median Filter nimmt zu jedem Punkt p den Median aus d Punkten symmetrisch um p und ersetze p durch den Median. Durch dieses Vorgehen werden schon bei kleinem d einzelne Ausreißer aus einer Kurve entfernt (s. Abb. 2.5, Kreise). Starke Signalwechsel bleiben aber auch bei großer Fensterbreite erhalten, z.B. die Flanken der Sinuskurven, langsame Wechsel werden abgeflacht, z.B. an den Extrema der zweiten Kurve.

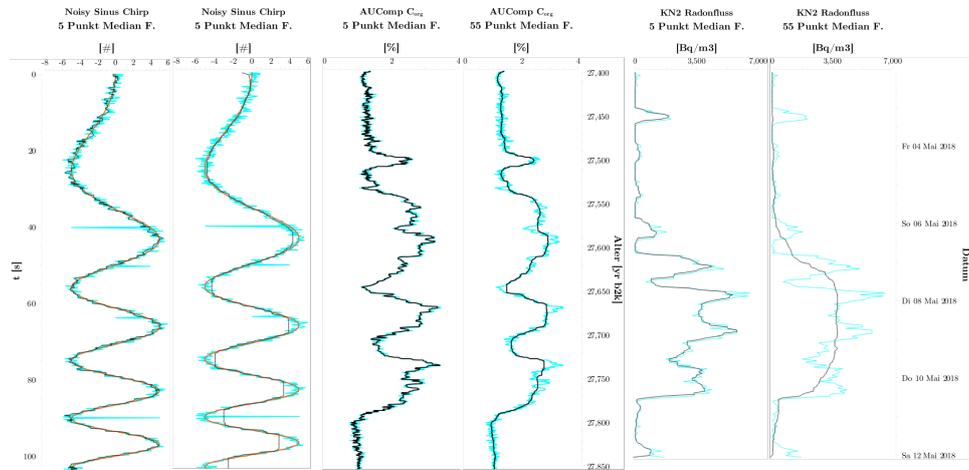


Abbildung 2.5: Daten gefiltert mit 5 bzw. 55 Punkt Median Filter. Links synthetischer Datensatz aus Sinus-Chirp mit additivem gaußischem Rauschen, mitte Daten des AUComp C_{org} (Sirocko et al., 2020) und rechts Radonexhalation Datensatz aus Mudelsee et al. (2020). Orange: unverrauschte Daten (nur synthetisch), türkis: verrauschte Daten, schwarz: gefilterte Kurve.

2.3.1.3 Savitzky-Golay Filter

Das Savitzky-Golay Filter wurde ursprünglich zur Analyse chemischer Datenreihen entwickelt (Savitzky u. Golay, 1964). Für jeden Punkt p_i wird die Kurve innerhalb eines Fensters der Breite d mit einem Polynom vom Grad g mittels eines Least-Squares-Fit angenähert und dadurch Koeffizienten für eine Glättung bestimmt. Die Glättung hängt von der Fensterbreite und dem Grad der Polynome ab: Bei zunehmender Fensterbreite wird die Glättung, wie bei den anderen o.g. Filtern, stärker, wie in Abbildung 2.6 erkennbar. Elemente, die deutlich schmaler sind als die Fensterbreite, bleiben dagegen schlechter erhalten und Elemente, die breiter sind, werden weniger stark geglättet (Press et al., 2007) (s. Abb. 2.7). Mit zunehmender Ordnung der Polynome wird die (gestörte) Eingangskurve besser angenähert und kleine Elemente besser erhalten (Eine Ordnung von 1 entspräche einer linearen Interpolation innerhalb des Fensters). Das Filter hat die Eigenschaft bei der Glättung die Höhe und Form von Signalpeaks gut zu erhalten. In den Abbildungen 2.6, 2.7 und 2.8 wird sichtbar, dass die geglättete Kurve sehr nah am Verlauf der ungestörten Daten liegt.

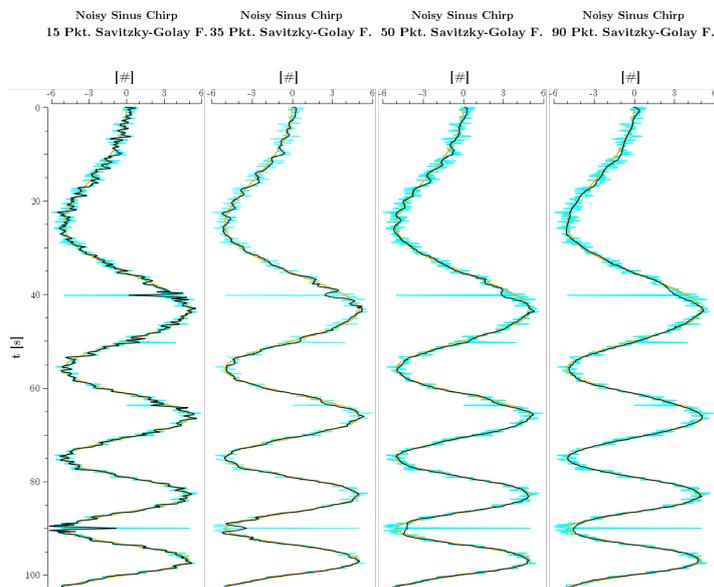


Abbildung 2.6: Daten gefiltert mit Savitzky-Golay Filtern der Ordnung 8 und unterschiedlichen Fensterbreiten. Synthetischer Datensatz aus Sinus-Chirp mit additivem gaußischem Rauschen. Orange: unverrauschte Daten, türkis: verrauschte Daten, schwarz: gefilterte Kurve.

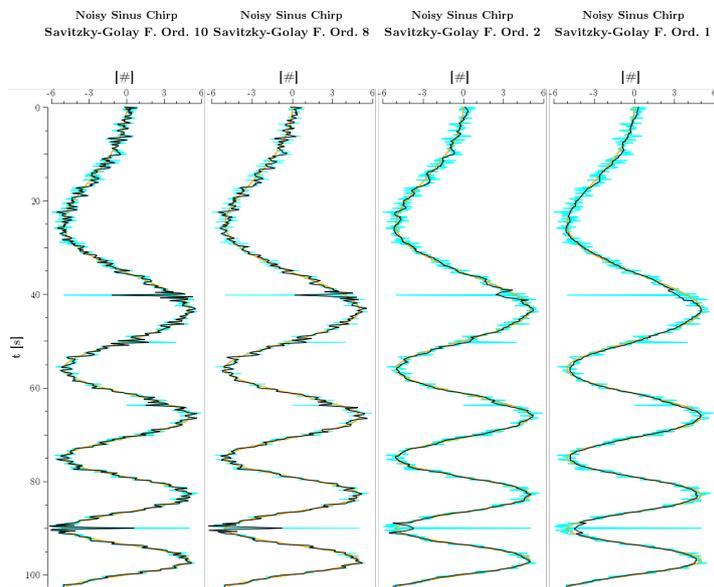


Abbildung 2.7: Daten gefiltert mit Savitzky-Golay Filtern mit Fensterbreite 15 und unterschiedlichen Ordnungen. Synthetischer Datensatz aus Sinus-Chirp mit additivem gaußischem Rauschen. Orange: unverrauschte Daten, türkis: verrauschte Daten, schwarz: gefilterte Kurve.

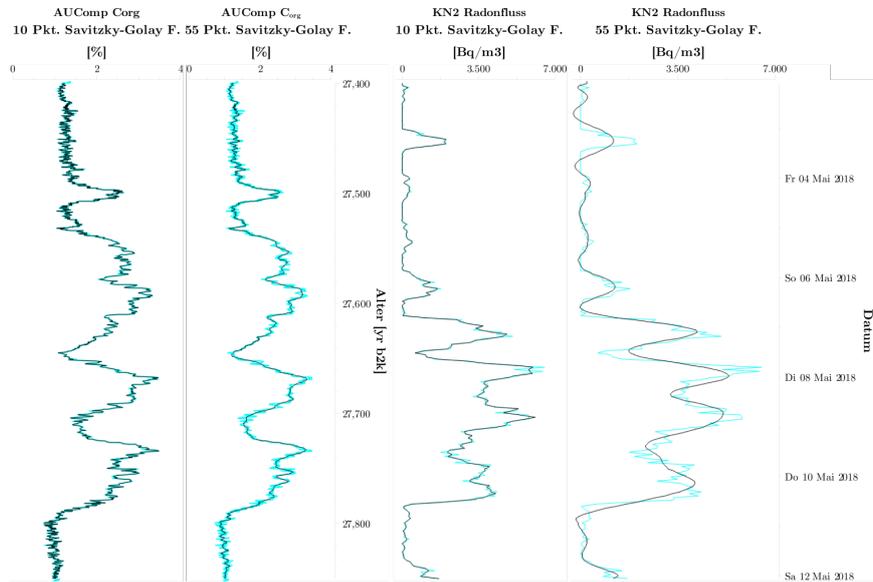


Abbildung 2.8: Reale Daten gefiltert mit Savitzky-Golay Filtern der Ordnung 8 und unterschiedlichen Fensterbreiten. Links Daten des AUComp C_{org} (Sirocco et al., 2020) und rechts Radonexhalation Datensatz aus Mudelsee et al. (2020) Türkis: verrauschte Daten, schwarz: gefilterte Kurve.

2.3.1.4 Butterworth Filter

Das Butterworthfilter wurde, ebenso wie das untenstehende Besselfilter, als Filter in der Frequenzdomäne entwickelt, um dort besondere Eigenschaften aufzuweisen. Das Butterworth Filter wurde von Butterworth (1930) so konstruiert, dass sein Frequenzgang im Durchlassbereich so flach wie maximal möglich ist. Dafür besitzt es eine geringere Flankensteilheit im Übergangsbereich als ein ideales Filter (s. Abb. 2.10).

Die Transferfunktion des Butterworthfilters lautet:

$$H(s) = \frac{G_0}{\prod_{k=1}^n \frac{s - s_k}{\omega_c}}$$

Mit der Gleichspannungsverstärkung G_0 , der Grenzfrequenz ω_c und der Ordnung n . Der Term im Nenner wird auch als Butterworthpolynom von s der Ordnung n bezeichnet.

Um die auftretende Frequenzverschiebung zu kompensieren, wird das Butterworthfilter in *ELSAinteractive++* sowohl vorwärts als auch rückwärts auf die Zeitreihen angewandt (Filtfilt). Abbildung 2.9 zeigt, dass, ähnlich zum oben genannten Savitzky-Golay Filter, die geglättete Kurve mit zunehmender Ordnung näher an der Eingangskurve liegt. Den geglätteten Kurven fehlen die hochfrequenten Anteile, während die niederfrequenten gut erhalten bleiben.

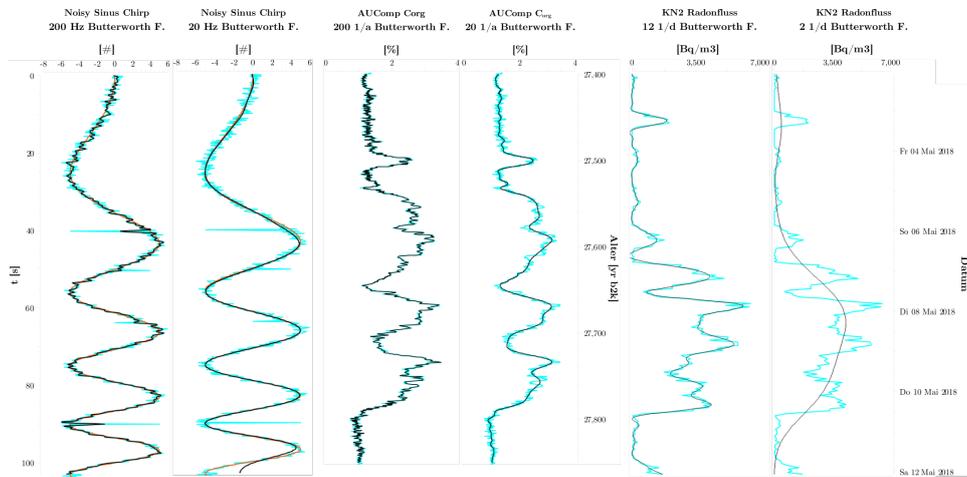


Abbildung 2.9: Daten gefiltert mit Butterworth Tiefpassfilter der Ordnung 8 unterschiedlicher Grenzfrequenzen. Links synthetischer Datensatz aus Sinus-Chirp mit additivem gaußischem Rauschen, mitte Daten des AUComp C_{org} (Sirocko et al., 2020) und rechts Radonexhalation Datensatz aus Mudelsee et al. (2020). Orange: unverrauschte Daten (nur synthetisch), türkis: ver-
 rauschte Daten, schwarz: gefilterte Kurve.

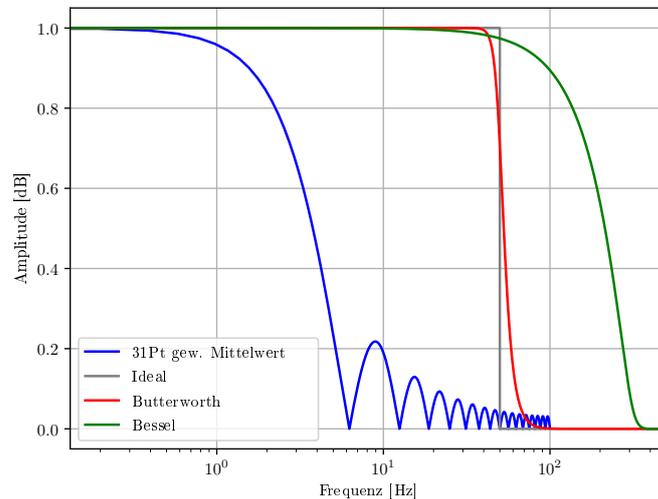


Abbildung 2.10: Frequenzgang von Bessel, Butterworth und idealem Filter bei einer Grenzfrequenz von 50 Hz. Zum Vergleich der Frequenzgang eines 31 Punkt gewichteten Mittelwertes.

2.3.1.5 Bessel Filter

1949 wurde von Thomson (1949) das Besselfilter als Filter mit maximal flacher Gruppenlaufzeit konstruiert. Dafür ist sein Frequenzgang etwas flacher, als der des Butterworth-Filters, wie man in Abbildung 2.10 sieht. Hierdurch werden beim Glätten die Frequenzen im Übergangsbereich nicht so scharf abgeschnitten, wie man in Abbildung 2.11 erkennen kann. Die Transferfunktion des Besselfilters ist:

$$H(s) = \frac{\theta_n(0)}{\theta_n\left(\frac{s}{\omega_c}\right)}$$

Mit der Grenzfrequenz ω_c , der Ordnung n und den umgekehrten Besselpolynomen θ_n :

$$\theta_n(x) := \sum_{k=0}^n \frac{(n+k)!}{(n-k)!k!} \frac{x^{n-k}}{2^k}$$

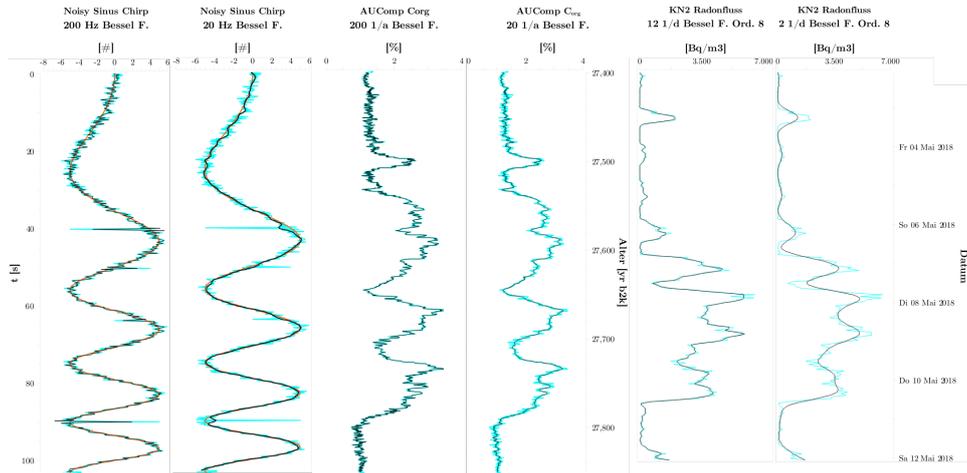


Abbildung 2.11: Daten gefiltert mit Bessel Tiefpassfilter der Ordnung 8 unterschiedlicher Grenzfrequenzen. Links synthetischer Datensatz aus Sinus-Chirp mit additivem gaußischem Rauschen, mitte Daten des AUComp C_{org} (Sirocko et al., 2020) und rechts Radonexhalation Datensatz aus Mudelsee et al. (2020). Orange: unverrauschte Daten (nur synthetisch), türkis: ver-rauschte Daten, schwarz: gefilterte Kurve.

2.3.1.6 Weeding Filter

Das Weeding Filter implementiert eine Variante des Douglas-Peucker Algorithmus (Douglas u. Peucker, 1973; Ramer, 1972). Hierbei werden bei einer vorgegebenen Kurve C solange Punkte entfernt, wie die daraus entstehende Kurve C' nicht weiter als d von der ursprünglichen Kurve C abweicht. Im Gegensatz zum Median Filter werden hierbei zuerst sehr kleine Peaks entfernt.

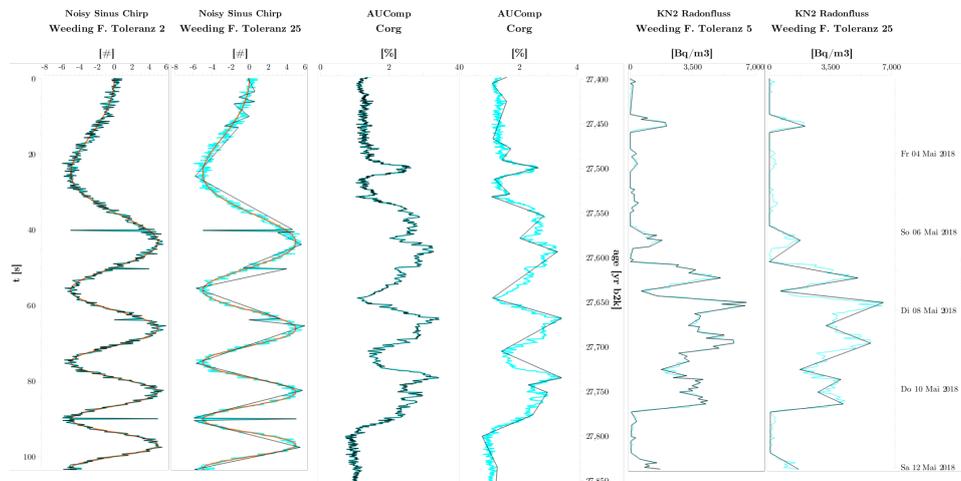


Abbildung 2.12: Daten gefiltert mit einem Weeding Filter mit Toleranz 5 bzw. 33. Links synthetischer Datensatz aus Sinus-Chirp mit additivem gaußischem Rauschen, mitte Daten des AUComp C_{org} (Sirocko et al., 2020) und rechts Radonexhalation Datensatz aus Mudelsee et al. (2020). Orange: unverrauschte Daten (nur synthetisch), türkis: verrauschte Daten, schwarz: gefilterte Kurve.

Das Weeding Filter ist mit einem einfachen Tiefpassfilter vergleichbar. Da Punkte entfernt werden, nimmt die Auflösung einer Kurve schnell ab und die Kurve wird kantiger (s. Abb. 2.12). Außerdem ist die Zeitreihe anschließend nicht mehr äquidistant.

2.3.1.7 Zusammenfassung

Jedes Filter hat unterschiedliche Eigenschaften und die Auswahl eines geeigneten Filters hängt sehr stark von der zugrundeliegenden Zeitreihe und den zu untersuchenden Phänomenen ab. Das eine Filter für alle Anwendungen gibt es nicht. Die Anwendung von Filtern bedeutet immer Informationsverlust und eine Veränderung der Daten. Daher sollte man Filter sparsam einsetzen und vor Verwendung anderer statistischer Analysen nach Möglichkeit vermeiden.

Beurteilt man die Qualität eines Filters nach seiner Fähigkeit gezielt bestimmte Signal zu unterdrücken, während die zugrundeliegenden Daten wenig verfälscht werden, so kann zumindest eine Eignung der obigen Filter für die verwendeten Beispielzeitreihen angegeben werden: Der ungewichtete Gleitende Mittelwert verfälscht das Signal sehr stark und eignet sich hauptsächlich dazu Daten für die erste optische Analyse schnell aufzubereiten. Über geeignete Gewichte kann die Degradation des Signals eingeschränkt werden. Das Median Filter verändert das Signal ebenfalls stark. Es ist jedoch sehr gut geeignet einzelne große Ausreißer schon bei kleiner Fensterbreite zu

eliminieren. Bei Datensätzen mit hoher Auflösung und einigen messbedingten Ausreißern, wie dem ELSA-19-Stack, kann es daher sinnvoll sein einen Drei- oder Fünfpunkt Median Filter anzuwenden. Savitzky-Golay, Butterworth und Bessel Filter hoher Ordnungen erhalten das Signal alle drei sehr gut. Der Hauptunterschied in der Anwendung zwischen ihnen liegt in der Art, wie die gefilterten Daten bestimmt werden: Beim Savitzky-Golay Filter geschieht dies über die Fensterbreite, Elemente größer als diese bleiben erhalten. Bei den beiden anderen Filtern kann explizit angegeben werden ab bzw. bis zu welcher Grenzfrequenz die Frequenzen des Signal ausgefiltert werden sollen. Ein Butterworth Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von $365 \frac{1}{a}$ unterdrückt bei den Radondaten beispielsweise alle Schwankungen kleiner als ein Tag. Ebenso unterdrückt eine Grenzfrequenz von $0,5 \frac{1}{a}$ im ELSA-19-Stack Schwankungen unterhalb von zwei Jahren. Das Bessel Filter unterscheidet sich vom Butterworth Filter in erster Linie durch den flacheren Frequenzgang, wodurch Frequenzen im Übergangsbereich um die Grenzfrequenz nicht so scharf abgeschnitten werden. Dies kann vorteilhaft sein, wenn im Übergangsbereich gewollte und ungewollte Signale überlappen.

2.3.2 Resampling

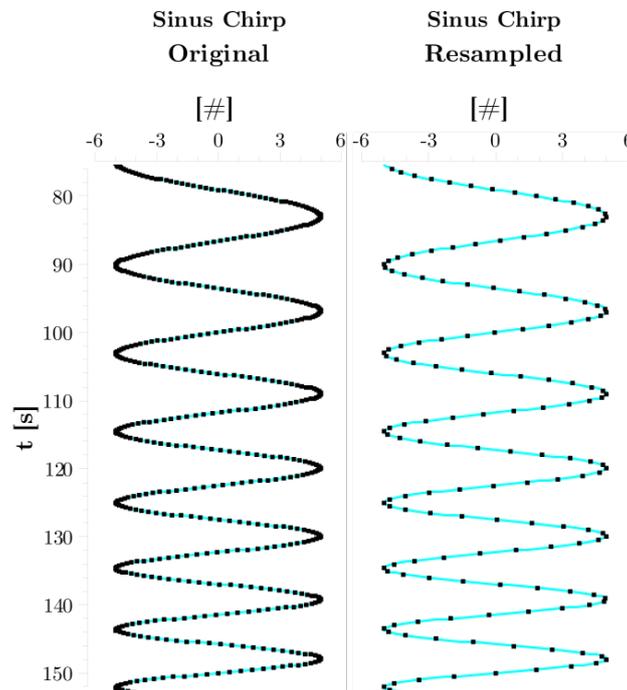


Abbildung 2.13: Sinus Chirp links mit ungleichmäßiger Verteilung der Datenpunkten, rechts resampled auf 0,5 Hz

Als Resampling oder Abtastratenkonvertierung bezeichnet man die Änderung der Abtastrate eines diskreten Signals (hier Messdaten), um eine neue diskrete Repräsentation des zugrundeliegenden kontinuierlichen Signals zu erhalten (Oppenheim et al., 1999). Man unterscheidet zwischen Upsampling und Downsampling: Upsampling ist das Erhöhen der Abtastrate und das Einfügen neuer Punkte in das Signal. Dies ist bei Messdaten ungeeignet, da künstliche Punkte eingefügt werden, die eine höhere Genauigkeit der Daten implizieren, als eigentlich vorliegt. Downsampling ist der gegenteilige Prozess, die Reduktion der Abtastrate und damit die Verringerung der Anzahl der Datenpunkte (siehe 2.13). Hier implementiert ist die einfachste Variante eines Resamplings mittels linearer Interpolation. Hierbei wird aus einem gegebenen Signal aus n Punkten $(x_k, y_k), k \in [0, n - 1]$ und m vorgegebenen neuen Stützstellen $\{y'_i, i \in [0, m - 1]\}$ neue Punkte $\{(x'_i, y'_i), i \in [0, m - 1]\}$ berechnet als:

$$x'_i = x_0 + (y'_i - y_{0i}) * \frac{x_{1i} - x_{0i}}{y_{1i} - y_{0i}}$$

Wobei $(x_{0i}, y_{0i}) \leq (x'_i, y'_i) \leq (x_{1i}, y_{1i})$ die nächsten Punkte (auf der y-Achse) des neuen Punktes sind.

Für geologische Zeitreihen ist das Resampling interessant, da eine äquidistante Beprobung eines Sedimentkerns entlang seiner Tiefe (z.B. eine Probe pro Millimeter) durch schwankende Sedimentationsraten zeitlich nicht äquidistant ist. Beispielsweise weist das Auel Maar eine durchschnittliche Sedimentationsrate von 2 mm/a auf und die Sedimentkerne AU3 und AU4 wurden mit einer Auflösung von 1 mm beprobt (Sirocko et al., 2020). Durch schwankende Sedimentationsraten weisen die Kerne auf einer Jahresachse keine äquidistanten Messpunkte mehr auf, haben allerdings immer noch eine Auflösung von mindestens einem Jahr. Durch ein Downsampling der Zeitreihe wird eine äquidistante jahresaufgelöste Zeitreihe erzeugt.

2.3.3 Hauptkomponentenanalyse (PCA)

Um `ELSAinteractive++` einfach mit weiteren mathematischen Methoden ergänzen zu können, ist eine Schnittstelle für den Aufruf beliebiger **R**- und **Python**-Scripte vorhanden. Eine so ergänzte Funktionalität ist beispielsweise die Hauptkomponentenanalyse (PCA, Principal Components Analysis):

Die PCA ist eine Methode, um einen anderen Blick auf eine große Menge an korrelierten Variablen zu erhalten. In einem zweiten Schritt ermöglicht die PCA diese Menge an Variablen auf eine kleinere Menge unkorrelierter Variablen zu reduzieren, dabei jedoch so viel Information zu erhalten wie möglich. Die einzelnen Variablen können beispielsweise Datenzeitreihen n unterschiedlicher Messungen an d Punkten an einem Bohrkern sein, wie C_{org} und Si/Al in Abbildung 2.15. Die heutige Form der PCA geht auf Hotelling (1933) zurück.

Die Funktionsweise der PCA ist dabei relativ einfach (Abdi u. Williams, 2010; Smith, 2002): Man fasst alle Variablen $\{x_i \in \mathbb{R}^d \mid i \in [0, \dots, n-1]\}$ zu einer Datenmatrix $M := (x_0, \dots, x_{n-1}) \in \mathbb{R}^{d \times n}$ zusammen. Da die PCA empfindlich gegenüber Skalierungen ist, ist darauf zu achten, dass die Variablen alle die gleiche Größenordnung haben. Es empfiehlt sich, die Variablen vorher zu standardisieren und zu normieren. Zu M bestimmt man die Kovarianzmatrix

$$C = \frac{1}{n}MM^T \in \mathbb{R}^{d \times d}$$

und ihre Eigenwertzerlegung

$$C = H\lambda H^T$$

mit $\lambda := \text{diag}(e_0, \dots, e_{n-1})$ der Diagonalmatrix der Eigenwerte e_i nach absteigender Größe, also mit $e_i > e_j \Leftrightarrow i > j$, und $H = (ev_0, \dots, ev_{n-1}) \in \mathbb{R}^{d \times n}$ der korrespondierenden Matrix der Eigenvektoren ev_i . Die Eigenvektoren bezeichnet man auch als Hauptkomponenten (PC, Principal Component). Die Hauptkomponenten bilden eine Orthogonalbasis des Raums der Variablen. Wobei die PC zum größten Eigenwert der Richtung entspricht, entlang der die Daten mit der größten Varianz liegen. Sie ist also die Komponente, die die meiste Korrelation der Daten erklärt. Auf diese Weise erhält man die gleiche Anzahl PCs wie Eingangsvariablen. Durch Basistransformation der Daten M auf die Basis der Hauptkomponenten gewinnt man Information über die erklärte Varianz, verliert dafür die Information über das Messsystem:

$$X := H^T M$$

Die PC zum kleinsten Eigenwert entspricht der Richtung, entlang der die Daten mit der kleinsten Varianz liegen. Dies kann zur Datenreduktion genutzt werden: Verwirft man PCs zu den kleinsten Eigenwerten, entfernt man die Dimensionen, die für die geringste Varianz der Daten verantwortlich sind. Es gibt keine exakte Angabe wie viele PCs behalten werden sollten. Es sollten so viele sein, dass der größte Teil der Varianz aller Daten mit den verwendeten PCs abgebildet werden kann. Für genaueres siehe Shlens (2014). Variablen in den Geowissenschaften können beispielsweise die Daten verschiedener Analysen eines Bohrkerns sein, wie Pollengehalt oder Mineralzusammensetzung, die sich auf ihre Haupteinflüsse wie z.B. Temperatur und Feuchtigkeit reduzieren lassen. Abbildung 2.14 zeigt die Absorptionsraten organikreichen Sediments bei verschiedenen Wellenlängen um 430 nm und 660 nm und die transformierten Daten entlang der daraus berechnete PC zum größten Eigenwert (einmal mit Normierung der Datenreihen vor der PCA und einmal ohne). Die PC entspricht in diesem Fall gerade dem Anteil an Chlorophyll a, da es genau diese Wellenlängen absorbiert. PC0n zeigt deutlich mehr Einfluss der Wellenlängen um 430 nm als PC0, da diese Absorptionen deutlich schwächer sind als die um 660 nm.

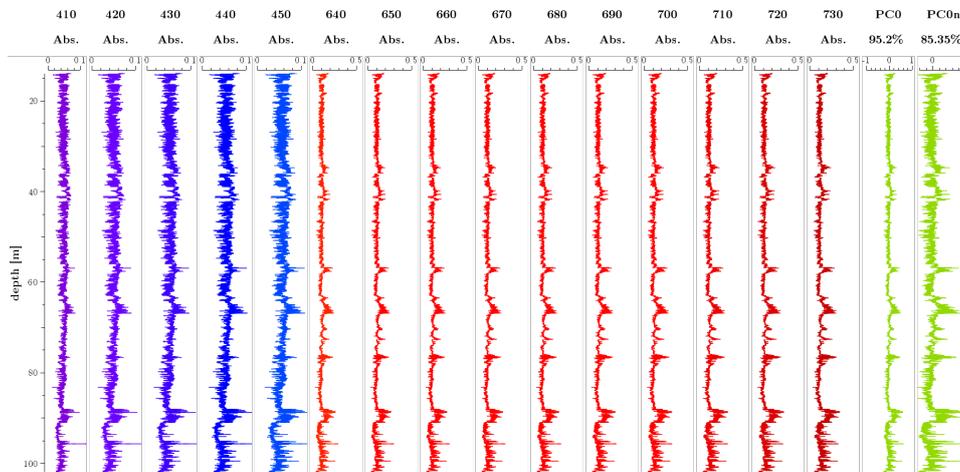


Abbildung 2.14: Absorptionsraten verschiedener Wellenlängen in organikreichem Sediment und die transformierten Daten entlang der ersten PC. PC0 zeigt die transformierten Daten nach einer einfachen PCA, PC0n, wenn die Messreihen vor der PCA standardisiert wurden. Unter den PCs ist jeweils die erklärte Varianz angegeben. Daten des AU3 aus Sirocko et al. (2020)

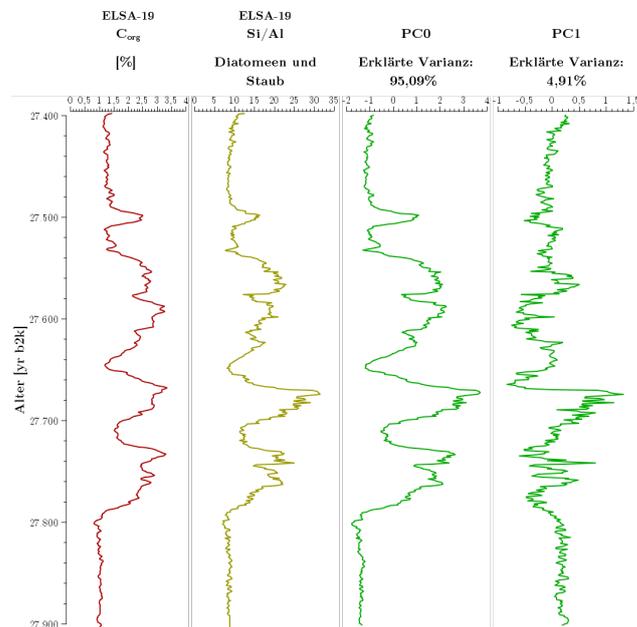


Abbildung 2.15: PCA des C_{org} und des Si/Al Datensatzes aus Sirocko et al. (2020).

Hieran erkennt man den Einfluss von Normierung auf die PCA. Ein weiteres Beispiel für die Anwendung der PCA zeigt Abbildung 2.15: Die beiden Datensätze des ELSA-19 Stacks (Sirocko et al., 2020) zum C_{org} und dem Si/Al Verhältnis haben eine Hauptkomponente, die über 95% der Varianz erklärt, was bedeutet, dass beide hauptsächlich den selben Prozess zeigen. Dies ist plausibel, da der größte Teil des C_{org} in einem See von Diatomeen stammt. Die zweite Hauptkomponente beschreibt wahrscheinlich den Unterschied durch Rauschen, verursacht u.a. durch den Eintrag von Organik aus anderen Quellen (Uferpflanzen, Tiere,...) bzw. Flugsande und Erosion in Zuflüssen als andere Siliziumquellen.

Aber Vorsicht: Die Hauptkomponenten aus einer PCA sind rein mathematisch und nicht immer interpretierbar. Mit einer PCA können nur lineare Zusammenhänge aufgelöst werden, nichtlineare werden im Allgemeinen nicht erkannt. Ebenso extrahiert eine PCA nur orthogonale Hauptkomponenten, korrelierte Faktoren können nicht isoliert werden. Außerdem nimmt die PCA als Maß für den Einfluss von Daten deren Varianz, was nicht für alle Arten von Daten geeignet ist (Shlens, 2014; Lever et al., 2017).

2.3.4 Kreuzkorrelation

Die Kreuzkorrelation ist eine der Standardmethoden zum Vergleich der Ähnlichkeit zweier Zeitreihen. Für zwei Zeitreihen $f(t)$ und $g(t) = f(t + x)$, bei denen eine nur eine zeitliche Verschiebung der anderen um x ist, hat die Kreuzkorrelation

$$K(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) * g(t + \tau) dt$$

ein Maximum bei $\tau = x$. Dies gilt auch noch für stark verrauschte Zeitreihen f und g . Somit kann die Kreuzkorrelation genutzt werden, um eine zeitliche Verschiebung zweier Zeitreihen zu bestimmen. Normiert man die Kreuzkorrelation durch den Betrag der beiden Zeitreihen, erhält man darüber hinaus ein Maß für die Ähnlichkeit der beiden Reihen.

2.4 Prozesse der Radonexhalation

Das Forschungsprojekt Angus II untersucht die "Auswirkungen der Nutzung des geologischen Untergrundes als thermischer, elektrischer oder stofflicher Speicher" und die "Integration unterirdischer Speichertechnologien in die Energiesystemtransformation am Beispiel des Modellgebietes Schleswig-Holstein" (Angus II, 2019). Unsere Arbeitsgruppe Klima und Sedimente übernimmt in diesem Zusammenhang das Teilprojekt "Bewertung von Störungszonen". Bei geotechnischen Speichern können Störungszonen dazu führen, dass das Gespeicherte entweicht und im schlimmsten Fall Grundwasser u.ä. negativ beeinflusst. Daher ist es wichtig, diese zu erkennen und ihre Reichweite, sowie ihre Durchlässigkeit für Gase bewerten zu können.

Die Arbeitsgruppe untersucht den Ansatz diese Störungen über Unterschiede der Radonexhalation zur Umgebung zu bestimmen. ^{222}Rn wird im Erdreich kontinuierlich aus der Zerfallsreihe von ^{238}U gebildet. Es entweicht aus den oberen Erdschichten in die Atmosphäre. Aufgrund seiner kurzen Halbwertszeit von 3,8 Tagen, zerfällt Radon aus tieferen Schichten normalerweise bevor es die Erdoberfläche erreicht. An Störungen kann aber auch tiefes Radon zur Oberfläche aufsteigen, woraus sich hier ein erhöhter Radonfluss vom Boden in die Atmosphäre ergibt. Der Radonexhalation an einem Ort hängt aber neben der Bodenbeschaffenheit auch von variablen Umweltfaktoren ab wie Temperatur, Luftdruck, Niederschlag usw. Um die Auswirkungen dieser Faktoren zu untersuchen werden in unserer Arbeitsgruppe Langzeitmessungen mit verschiedenen Radonmessgeräten durchgeführt. Im Rahmen

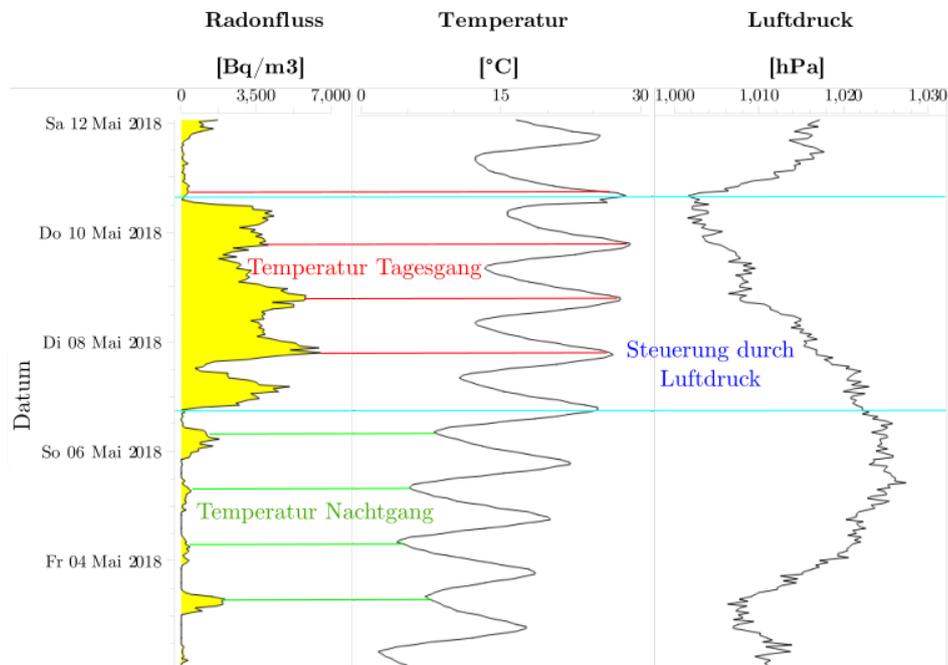


Abbildung 2.16: Radonfluss eines Brunnens in Kleinneudorf über zehn Tage, nach Mudelsee et al. (2020).

dieses Projektes wurden in *ELSAinteractive++* Routinen zum einlesen und konvertieren in MS-Excel Dateien der von den Messgeräten ausgegebenen Messdaten integriert. Abbildung 2.16 zeigt einen Ausschnitt aus einem solchen Datensatz. Im gezeigten Zeitraum findet ein Wechsel der Korrelation zwischen Radonfluss und Temperatur (Tagesgang, rot) zu einer Antikorrelation (Nachtgang, grün) statt. Ebenfalls ist das antikorrelierte Verhalten zum Luftdruck (blau) erkennbar.

Außerdem wurde von Mudelsee et al. (2020) ein Algorithmus zur Vorhersage der Radonexhalation basierend auf den aktuellen Umweltfaktoren entwi-

ckelt, welcher in seinem aktuellen Stand (01.12.2019) in *ELSAinteractive++* implementiert wurde.

2.5 Praxis Einsatz

ELSAinteractive++ wird seit über zweieinhalb Jahren erfolgreich innerhalb der Arbeitsgruppe Klima und Sedimente produktiv eingesetzt. Durch diesen Einsatz konnte *ELSAinteractive++* kontinuierlich weiterentwickelt und optimiert werden. In den folgenden Kapiteln werden vier Projekte vorgestellt, deren Daten mit Hilfe von *ELSAinteractive++* aufbereitet, analysiert und visualisiert wurden und an denen im Rahmen dieser Dissertation weitergehend gearbeitet wurde:

Kapitel 3

Sedimentationsprozess im Laacher See Becken

3.1 Einführung

Bei der ersten Arbeit handelt es sich um ein Paper zum Sedimentationsprozess des Laacher Sees, welche beim International Journal of Geosciences eingereicht, jedoch noch nicht veröffentlicht (Diensberg u. Sirocko, 2020) wurde. Die Daten dieses Papers entstammen einem Forschungsprojekt unserer Arbeitsgruppe Klima und Sedimente aus dem Jahr 2011 im Auftrag des Landesamtes für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU) zur Untersuchung der Trophie des Laacher Sees in den letzten 2000 Jahren. Diese Daten wurden im Rahmen dieses Papers neu aufgearbeitet und hinsichtlich der Sedimentationsprozesse seit dem Ausbruch des Laacher See Vulkans analysiert. Alte Ergebnisse wurden mit der Literatur abgeglichen und ggf. nach heutigem Forschungsstand neu interpretiert. Die alte Stratigraphie wurde überarbeitet und bis zum Beginn der Jüngeren Dryas erweitert. Der Text des Papers ist im Folgenden in englisch wiedergegeben, wie er eingereicht wurde:

3.2 Abstract

In this paper, we present the first published sediment record of the Laacher See volcanic lake. Being one of the largest volcanic eruptions on the Northern Hemisphere in the late Quaternary, the Laacher See Tephra is an important isochrone for Europe. The caldera today is filled with water, but having only a low influx by a small creek, the sedimentation rates are very low in the center (~ 0.3 mm). They are higher close to shore but disturbed by bioturbation, erosion from strong waves and two anthropogenic sea level decreases. At a shallow depth of max. 4 m, the lower sediments consist of a thick ash and pumice layer formed during the eruption that formed the caldera. Nonetheless, we can show that its palynostratigraphy is consistent

to other Eifel maars and even shows the typical signals of the beginning of the Younger Dryas just above the ash layers. We also found signs of a relocation event shortly after the eruption, which also can be seen in other close Eifel maars as a second, reworked layer of Laacher See Tephra.

3.3 Introduction

The Laacher See volcano is located in the East Eifel volcanic field in western Germany. It was one of the largest late Quaternary eruptions of the Northern Hemisphere with a calculated magnitude of ~ 5.8 (Riede u. Bazely, 2009). An estimated area of more than 225000 km^2 was affected by the tephra fallout (Fisher u. Schmincke, 1984; Schmincke, 2014). Its deposits can be found in large parts of Central Europe (Riede et al., 2011) up to Sweden (Larsson u. Wastegard, 2018) and to the Czech Republic (Prochazka et al., 2019). The Laacher See Tephra (LST) has been dated at 10931 ± 40 BC (12880 BP) in varve chronologies of several maars (Brauer et al., 1999b,a; Neugebauer et al., 2012; Wulf et al., 2013) and by ^{14}C dating of trees buried inside the LST (Litt et al., 2003), matched by $^{40}Ar/^{39}Ar$ (van den Bogaard, 1995) dating as well as U-Th disequilibria (Bourdon et al., 1994).

Although the age of the Laacher See Eruption is well constrained, there is an ongoing debate over its dating relative to the Younger Dryas: Whether the eruption predates the Younger Dryas by ~ 200 years e.g. (Brauer et al., 1999b) or whether it was one of the triggers starting the cooling of the Younger Dryas (Baldini et al., 2018).

The LT plays an important role in correlating geological records and is an important isochrone for Europe. Furthermore the thick tephra blanket covered and preserved animal tracks e.g. (Baales, 1997, 2002b), burned wood landscapes and other botanical macroremains e.g. (Baales, 1999; Fiedel et al., 2013) and several archaeological sites e.g. (Baales, 2002a, 2006). The influence of the eruption on human societies (Riede, 2016; Riede et al., 2018) and on the environment close to the Laacher See (Schmincke et al., 1999; Schmincke, 2006; Engels et al., 2015) as well as further away (de Klerk et al., 2008) have been extensively researched.

After the eruption, the caldera collapsed, filled with water and created the ~ 65 m deep Laacher See (Lake Laach). The only influx above ground is a small stream from the south-west, the Beller Wiesenbach. Its catchment area is about 8.77 km^2 , making groundwater the main water source of the lake. Since 1093 AD a monastery is located inside the crater, close to the lake (Figure 3.1). The Lake has no natural outlet. But to gain more arable land for the monastery, the lake level of the Laacher See has been artificially lowered twice: Once 10 m in 1164 AD and a second time 5 m in 1844 AD via an artificial tunnel at the south, the so called Fulbert Stollen, to its present-day depth of ~ 52 m. The lake today has a water volume of 0.105 km^3 with a

surface area of 3.33 km² (LfU, 2013). Despite this importance and influence on other geological records, until now there is no published sediment record of the Laacher See itself.

In 2011 AD the Institute for Geoscience was funded by the Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU) to analyse the sedimentation processes in the Laacher See. In this paper we present the sediment record and the palynostratigraphy gained from these cores.

3.4 Study area

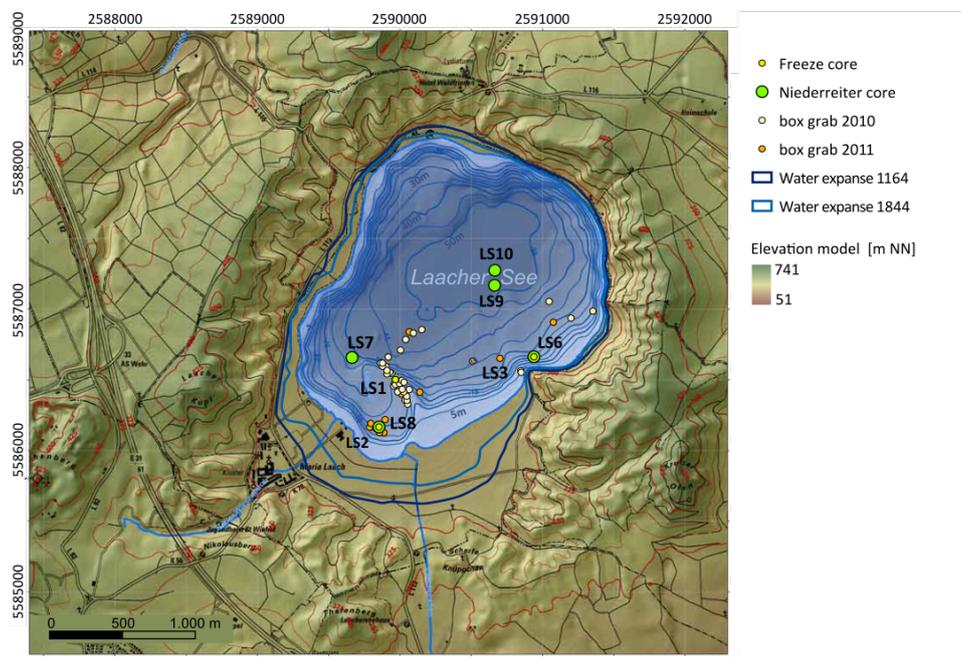


Abbildung 3.1: Terrain model of the Laacher See (by LfU and LfVermGeo)

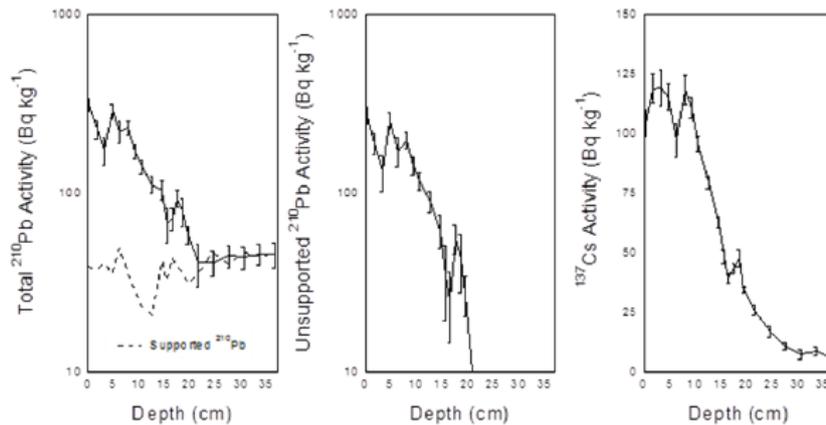
Eight cores were taken from the lake: Three freeze-cores (LS1, 2 & 3) and five Niederreiter cores (LS6, 7, 8, 9 & 10). Their locations are shown in figure 3.1. The 8 m long LS9 and the 9 m long LS10 were taken at the deepest site of the lake with a water depth of 52 m. LS7 was taken at a depth of 38 m on the south-western part of the lake and is 3.43 m long. LS2 with a length of 1.77 m, LS3 with 1.64 m, LS6 with 3.48 m and LS8 with 2.60 m were taken near the south-eastern shore, at depth of ~20 m. And the 0.94 m long LS1 was taken on top of a ridge at the south-west, the so called Barschbuckel, at a depth of 16 m.

Co- re	Depth [m]	Material	^{14}C age [years]	^{14}C error [years]	cal. age [cal BP]	cal age [BC]	$\delta^{13}\text{C}$
LS3	0.72	Twigs	3455	20	3718	1768	-
							27.01
LS3	1.16	Plant debris	4770	30	5520	3570	-
							26.46
LS3	1.18	Plant debris	5195	30	5949	3999	-
							24.16
LS6	1.79	Plant debris	10030	90	11557	9607	-
							24.81
LS6	2.12	Plant debris	10250	60	12001	10051	-
							24.91
LS8	1.50	Plant debris	5775	30	6580	4630	-
							27.82
LS8	2.40	Plant debris	11540	70	13384	11434	-
							29.19
LS8	2.40	Plant debris	11920	130	13770	11820	-
							25.41
LS8	2.55	Plant debris	11595	60	13432	11482	-
							26.76

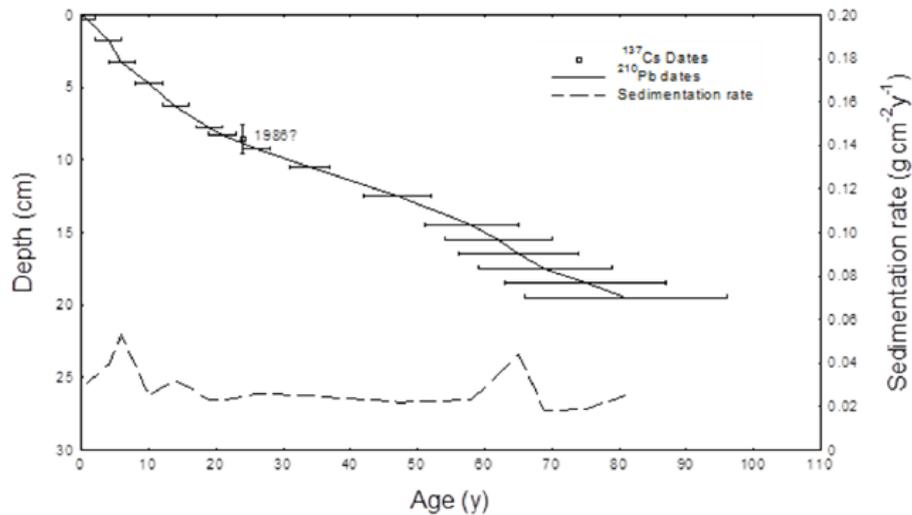
Tabelle 3.1: ^{14}C datings of plant material from base residue in different cores (Leibnitz-Labor Kiel)

3.5 Materials and Methods

All cores were analysed lithographically. LS1 and LS3 were dated via ^{210}Pb and ^{137}Cs by Prof. Appleby, Univ. of Liverpool (Figure 3.2). Pollen analysis for LS3, LS7 and LS9 was done by Frank Dreher by counting at least 200 pollen per sample (500 for LS3). A total of eight ^{14}C dates were determined from plant debris and twigs from LS3, LS6, LS7 and LS8 at the Leibnitz-Labor Kiel.



Fallout radionuclides in the Laachersee sediment core LS3 showing (a) total and supported ^{210}Pb , (b) unsupported ^{210}Pb , (c) ^{137}Cs concentrations versus depth.



Radiometric chronology of the Laachersee sediment core LS3 showing the ^{210}Pb dates and sedimentation rates and also the possible 1986 depth suggested by the ^{137}Cs record.

Abbildung 3.2: ^{210}Pb and ^{137}Cs datings of core LS3 (Prof. Appleby)

3.6 Results

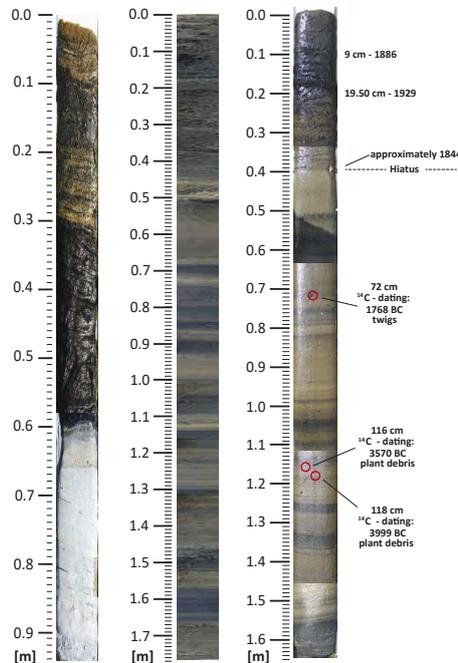


Abbildung 3.3: Freeze cores LS1, LS2 and LS3

^{210}Pb and ^{137}Cs datings show LS1 consists only of relict sediment of unknown age. This is likely the result of erosive currents through strong winds and waves. It was possible to date LS3 down to 0.20 m as 1929 AD via ^{210}Pb and ^{137}Cs dating (3.2). Below the ^{210}Pb profile is disturbed and could not be interpreted any further. This corresponds to a sedimentation ratio of 2.4 mm/year. Assuming a constant sedimentation rate, the change in color at 0.40 m would mark the year 1844 AD (Figure 3.3), which is the date of the second anthropogenic lake level decrease. ^{14}C dating of some twigs from 0.72 m showed an age of 1768 [± 20] BC (Table 3.1). The palynostratigraphy of LS3 is also missing the data between 1844 AD and 1768 BC, which is visible in LS7 and LS9. The only explanation for an age gap of that magnitude is a long hiatus, probably caused by erosion subsequent to the two man made lake level decreases 1844 AD and 1164 AD, resulting in the loss of sediment from early to late middle age. The lithography of LS2 is very similar to LS3 (3.3). The maximum of *Cerialia* congruently with a minimum in *Fagus*, *Ulmus*, *Quercus* and *Poaceae* at 0.52 m in LS7 (Figure 3.6) hints at the start of the construction of the monastery in 1093 AD: Lumber for the new buildings was cut and wheat for food was planted. In LS7 from 0.7 m to 0.88 m and from 0.35 to 0.9 m in LS9 (3.8) a clear maximum of *Carpinus* can be seen.

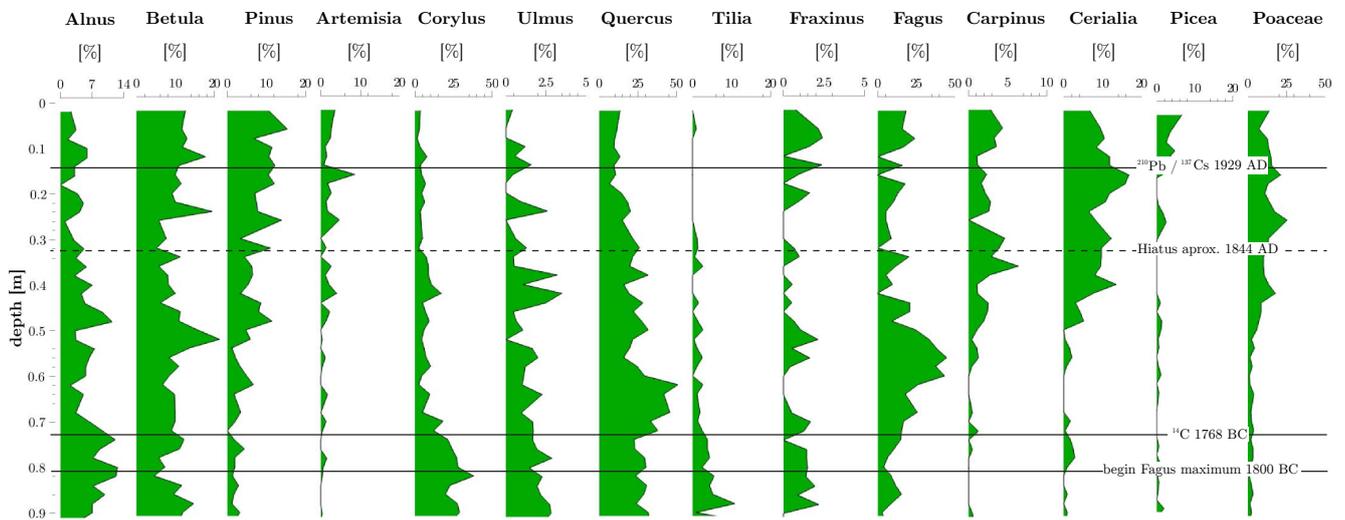


Abbildung 3.4: Pollen contents in LS3 (counted by F. Dreher)

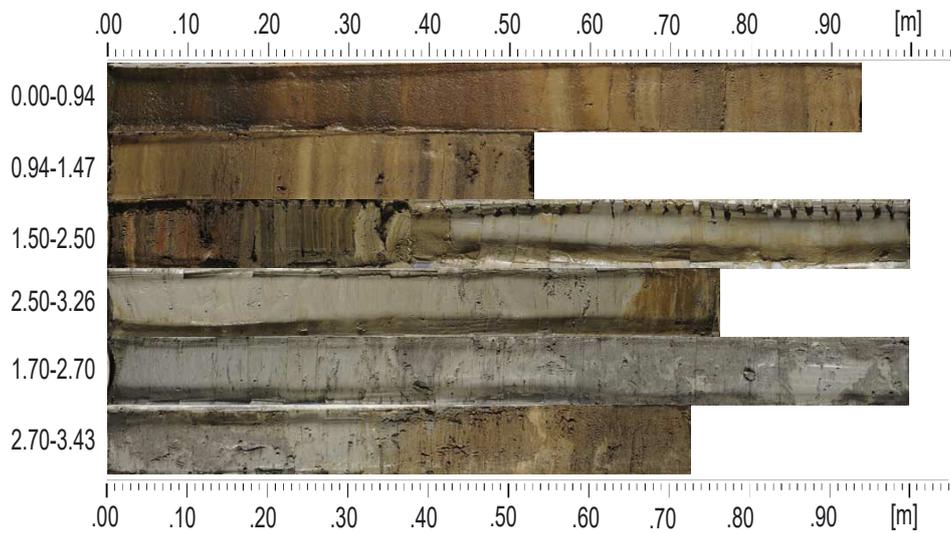


Abbildung 3.5: Section of core LS7

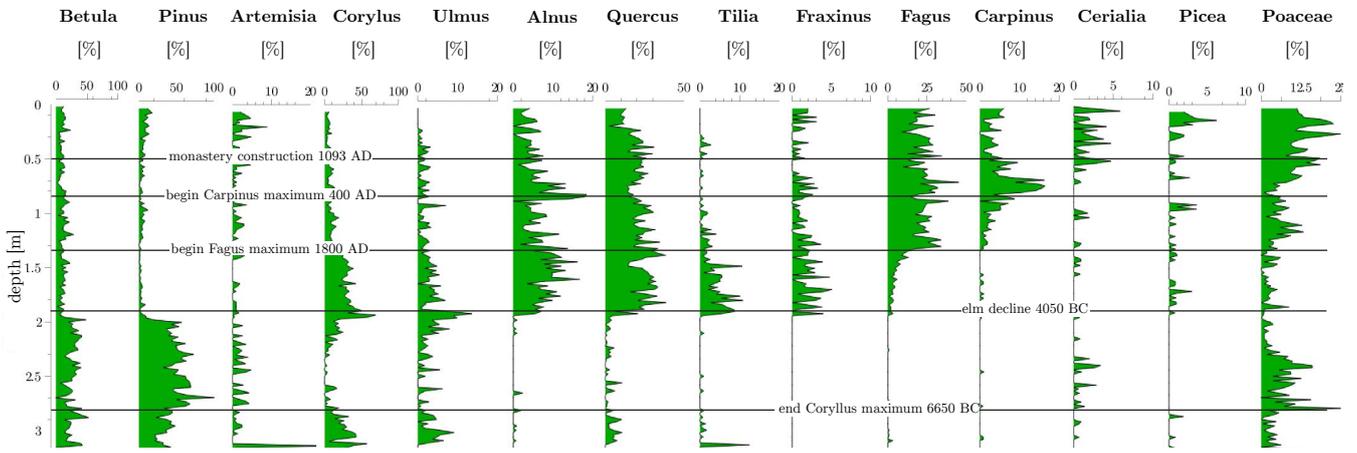


Abbildung 3.6: Pollen contents in LS7 (counted by F. Dreher)

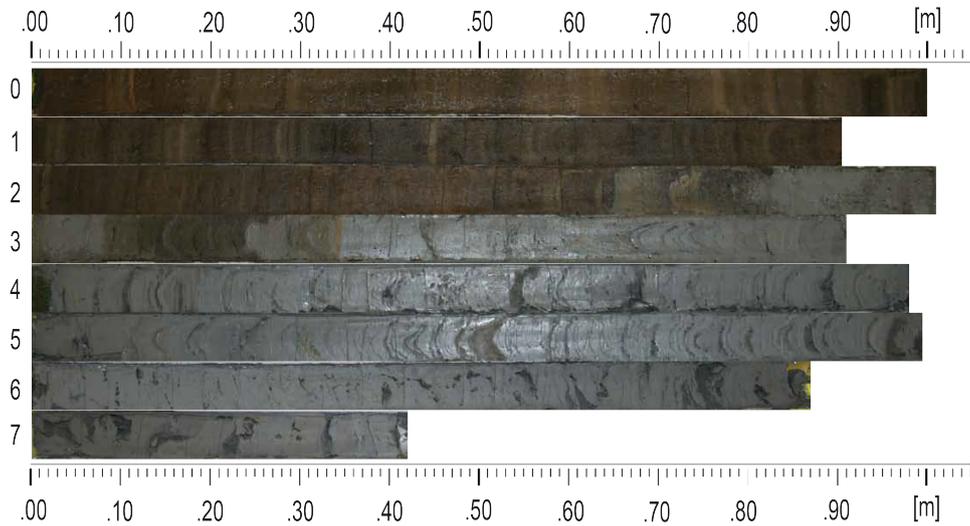


Abbildung 3.7: Section of core LS9

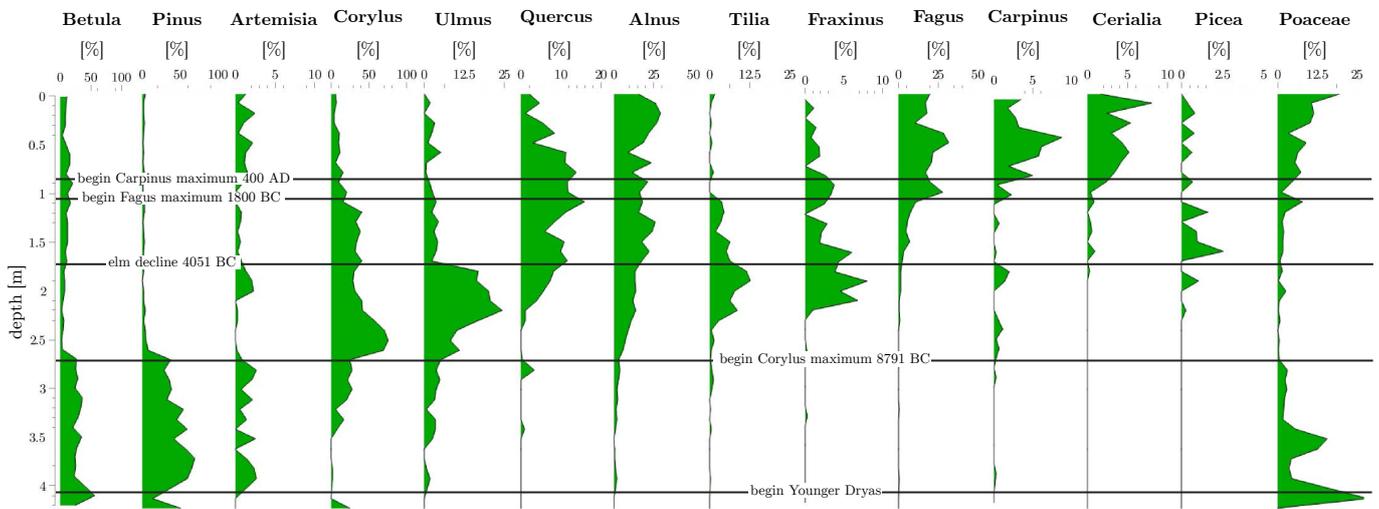


Abbildung 3.8: Pollen contents in LS9 (counted by F. Dreher)

In Europe this indicates the woodland re-expansion during the Migration period between 400 AD and 750 AD, after the romans retreated (Ralska-Jasiewiczowa et al., 2003). The *Carpinus* maximum is noticeably missing in LS3 (Figure 3.3). An increase of *Fagus* pollen at 0.80 m in LS3, 1.35 m in LS7 and 1.10 m in LS9 marks the immigration of beech around 1800 BC (Ralska-Jasiewiczowa et al., 2003). Two more ^{14}C dates could be retrieved from plant debris in LS3 at 1.16 m with an age of $3570 [\pm 30]$ BC and at 1.18 with $3999 [\pm 30]$ BC. These both seem consistent with the lithography. At 1.90 m LS7 and at 1.75 m LS9 show a sudden drop in *Ulmus* pollen. This corresponds to the elm decline, which can be seen all around Western Europe and is dated at around 4000 BC (Parker et al., 2002). The second coring segments of LS7 shows sudden dark sediments at its base (Figure 3.5). These are very likely the result of repeated sediment penetration due to strong waves on the day of coring (>1 m). Thus the data from LS7 cannot be interpreted after the second segment, below 3.00 m. From 2.20 to 2.70 m a high amount of *Corylus* can be found in LS9 and in LS7 from 2.80 m beyond 3 m. This correlates to the *Corylus* maximum 8791 BC - 6651 BC which marks the beginning of the Boreal (Theuerkauf et al., 2014). Below 2.70 m up to 4.1 m in the top of the ash layers mainly *Pinus*, *Betula* and *Poaceae* pollen are visible. This is the characteristic vegetation of the Younger Dryas (YD) as described by (Giesecke et al. 2011). At 4.0 m *Betula* pollen decrease, while *Pinus* and *Artemisia* pollen increase, which matches the development at the transition from Allerød to YD (de Klerk et al., 2008; Neugebauer et al., 2012). Below 4.1 m no more pollen could be found in LS9. Interesting is also the layer of darker sediment from 3.34 m to 3.09 m between two phases of grey clastic ash-sediment. This could be a coring artefact or the effects of

a relocation event. An analogue layering is visible in LS10 from 3.23 m to 3.06 m, although not as thick (Figure 3.11). A similar occurrence can be found in other Eifel Maars, where the LST tephra particles appears in two flood layers above the LST (unpubl. Results ELSA Project, Mainz). These hint at a bigger event at the end of the YD after the eruption where larger amounts of sediment have been relocated. The remaining lithology of LS10 is also very similar to that of LS9. In LS6 two ^{14}C datings were measured from plant debris: One at 1.79 m with an age of 9607 [± 90] BC and one at 2.12 m with 10051 [± 60] BC (Table 3.1). These two locate the lithological change at 1.85 m (Figure 3.9) at the end of the YD. This indicates the light, clastic, but laminated sediment below 1.85 m are ashes and pumice particles from the Laacher See eruption. Three ^{14}C datings were done on twigs found in the lower ash layer of LS8 with ages of 11434 [± 70] BC, 11482 [± 60] BC and 11830 [± 130] BC (Table 3.1). These date older than the lake eruption at 10931 BC. Probably older material from the edge of the caldera fell into the crater after the eruption or got washed in. Findings of palaeobotanical macroremains were very sparse, so they could only be used for ^{14}C datings.

3.7 Discussion

The palynostratigraphic and isotope data (^{210}Pb , ^{137}Cs and ^{14}C) are in accordance with data from other Eifel maars like Ulmener Maar (Sirocko, 2016), Eichholzmaar (Houben et al., 2013), Holzmaar or the Meerfelder Maar (Litt et al., 2009; Kubitz, 2000; Brauer et al., 1999b). Pollen records date the eruption right before the Allerød / YD transition. But due to the low sedimentation rate and the strong sediment-disturbances an exact time difference cannot be given. Another possibility is this simply being the succession of pioneer plants repopulating the devastated landscape after the eruption. This should be explored in further research. The Laacher See shows very dynamic sedimentation processes. The finding from LS1, the Barschbuckel being eroded to a water depth of 16 m, indicate regular occurring waves higher than 2 m. These are the consequence of the steep surrounding crater walls with heights of 150 m, except on the south-west side. This causes strong erosions of the shore and strong sediment relocation. This process is further increased by the recent lake level decrease, so the new lake terrace has not been formed yet (LfU, 2013). The recent sediment surface is disturbed by bioturbation, especially near the shore area.

3.8 Conclusion

The Laacher See Tephra is well dated in varve chronologies of several maars; it is also an important chronological marker in many European records. The sediments in the caldera lake are however highly disturbed by reworking

processes on the flank of the crater basin, especially the two anthropogenic lake level decreases. The sediments in the centre of the lake have a very low sedimentation rate and show the entire last 12800 years in only 3.x m, which are in addition heavily bioturbated. Our studies is the first to describe the sedimentation processes in this large lake, but the low sedimentation does not allow any robust paleoenvironmental inferences. Nevertheless, date pollen records the eruption right before the Allerød / YD transition, although no exact time frame can be given for above mentioned reasons. Also notable are signs of a relocation event at the top of the ash layers in LS9 and LS10, which is in accordance with findings of a two layered LST in other Eifel Maars. This phenomenon should be explored further in future research projects.

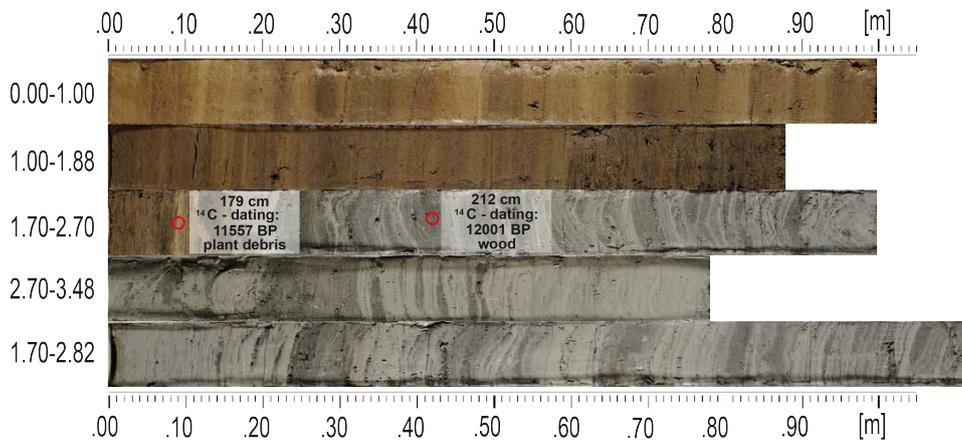


Abbildung 3.9: Section of core LS6

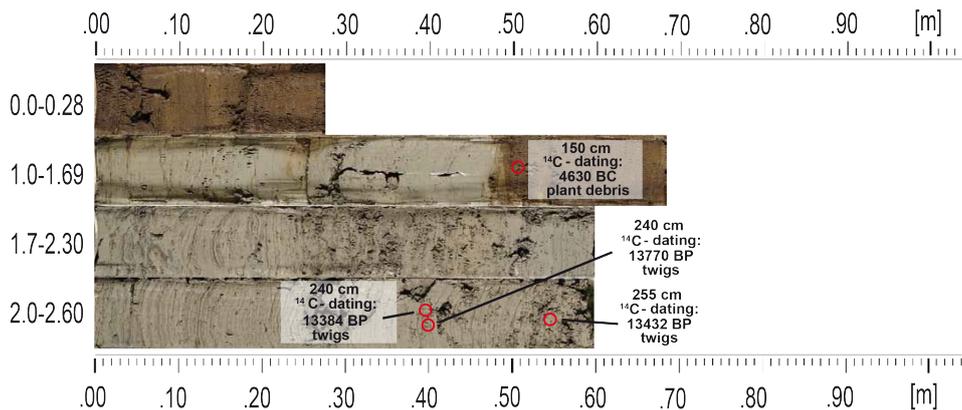


Abbildung 3.10: Section of core LS8

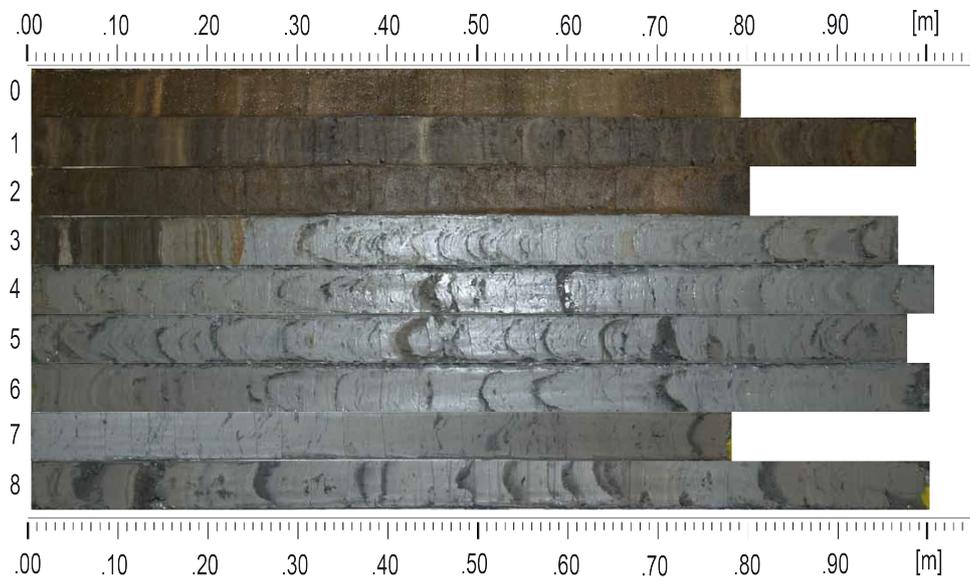


Abbildung 3.11: Section of core LS10

Kapitel 4

AU Composit

4.1 Einführung

Im Rahmen der Publikation von Sirocko et al. (2020) entstand der ELSA-19-Stack, ein kontinuierlicher Sedimentdatensatz der letzten 60000 Jahre mit jährlicher Auflösung. Der ELSA-19-Stack setzt sich aus den Daten mehrerer Sedimentbohrkerne zwei benachbarter Eifelmaare zusammen, dem Holzmaar und dem Auel Maar. Wobei zwei parallele Kerne des Auel Maares, die Kerne AU3 und AU4, den größten Teil des Stacks ausmachen. Die Kerne wurden mit verschiedenen Methoden analysiert. Unter anderem wurde mittels der ISRS670-Methode (Rein u. Sirocko, 2002) der Gehalt an Kohlenstoff aus Organik (C_{org}) der Kerne mit einer Auflösung von 1 mm bestimmt. Die Analysen und deren Auswertungen wurden von den Kollegen und Coautoren von Sirocko et al. (2020) durchgeführt und sind nicht Teil dieser Dissertation. Der Fokus in dieser Arbeit liegt auf der Zusammenführung der C_{org} -Datensätze der beiden Bohrkerne des Auel Maares, AU3 und AU4.

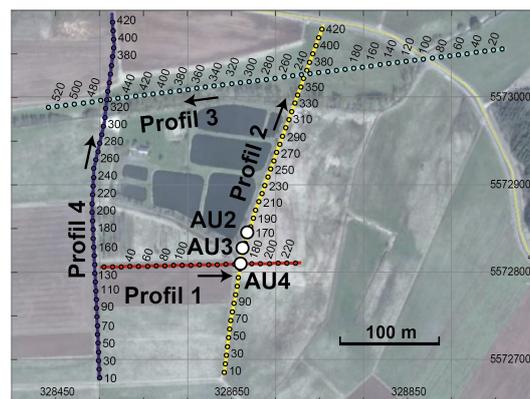


Abbildung 4.1: Geländekarte des Auel Maares mit den Bohrorten der Kerne.(Sirocko et al., 2020)

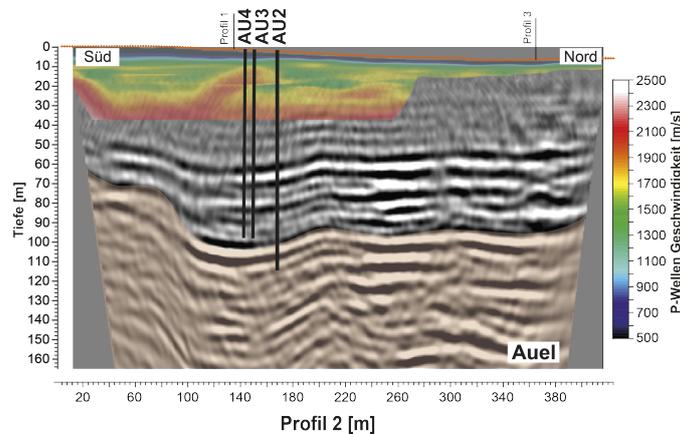


Abbildung 4.2: Seismisches Profil des Auel Maar mit Bohrorten der Kerne (Sirocko et al., 2020)

Die beiden je ca. 100 m langen Bohrkern wurden im Abstand von 5 m zueinander in 1 m Segmenten gebohrt (Abbildung 4.1), wobei für den AU Composit nur die Segmente von ca. 14 bis 104 m verwendet wurden. Als Folge der Sedimentbeschaffenheit oder des Bohrvorgangs (beispielsweise an den Segmentwechsellern) treten Störungen und Lücken in den Kernen auf, die nicht mit dem ISRS-Spektrometer gemessen werden können. Dadurch kam es im C_{org} -Datensatz des AU4 zu 260 Lücken, was etwa drei Lücken pro Meter entspricht (Abbildung 4.3). Beide Kerne wurden zueinander höhenversetzt gebohrt, mit der Absicht fehlende Daten eines Kerns, dennoch im anderen zu finden. Die Lücken in den Daten des AU4 sollten mit den entsprechenden Daten aus AU3 (Abbildung 4.4) gefüllt werden, um einen lückenfreien Datensatz zu erhalten, den AU Composit (AUComp). Bei Kernen mit wenigen Lücken wird dies oft noch manuell anhand stratigraphischer Marker durchgeführt. So beispielsweise auch für die Kerne HM3 und HM4 des ELSA-19-Stack. Aufgrund der großen Anzahl an Lücken in AU3 und AU4 sollte diese Arbeit automatisiert werden. Für diese Aufgabe wurde **Core Merger** entwickelt.

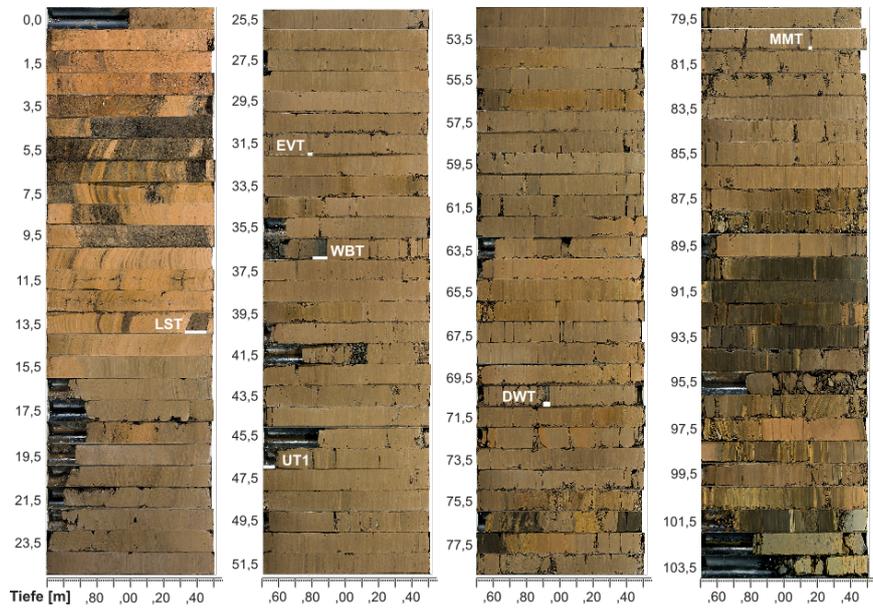


Abbildung 4.3: Bohrkern AU4 mit eingezeichneten Tephren. Gut sichtbar die vielen Störungen, z.B. ab 36,5 m, ab 41,5 m und am Ende des Kerns ab 95,5 m (Sirocko et al., 2020)

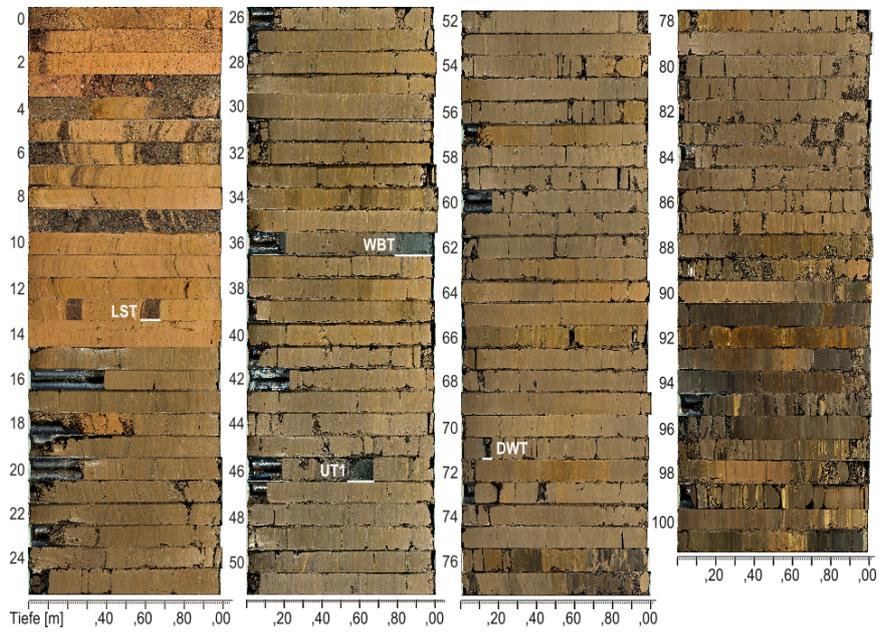


Abbildung 4.4: Bohrkern AU3 mit eingezeichneten Tephren. Auch dieser mit vielen Störungen. (Sirocko et al., 2020)

4.2 Verwandte Arbeiten

Eines der meist genutzten Tools in der marinen Community zur Korrelation zweier paralleler Bohrkerne ist **Corelator**, ursprünglich von Olea (1994). Es basiert auf Kreuzkorrelation. Dieser Ansatz ist jedoch zu unflexibel im Hinblick auf die großen stratigraphischen Unterschiede von Maar- Bohrkernen im Gegensatz zu marinen Bohrkernen. Bei marinen Bohrungen werden parallele Kerne meist gleichzeitig mit einem sog. Multicorer entnommen, was einen Kernabstand von unter einem Meter erlaubt. Dies war bei den Kernen im Auel Maar nicht möglich. Am seismischen Profil des Maares (Abbildung 4.2) erkennt man, dass der Verlauf und die Dicke der verschiedenen Sedimentschichten in beiden Kernen teilweise stark versetzt ist. Insbesondere ist dieser Versatz nicht konstant, an einigen Stellen sogar in unterschiedliche Richtungen. Deutlicher wird dies bei der Zuordnung stratigraphischer Markerlagen (siehe Abbildung 4.8). Eine Kreuzkorrelation benötigt für optimale Ergebnisse jedoch lange, ähnliche Stücke mit monodirektionaler Verschiebung und möglichst gleicher Sedimentationsrate in beiden Kernen. Deutlich flexibler und unanfälliger für variable Sedimentationsraten in kurzen Segmenten ist Dynamic Time Warping (**DTW**). **DTW** wurde ursprünglich zur Spracherkennung entwickelt (Sakoe u. Chiba, 1978), wurde aber sehr schnell für andere Aufgaben im **Pattern Matching** eingesetzt. Den Nutzen von **DTW** für stratigraphische Korrelationen wurde von Pälke (2002) und Lallier et al. (2009) gezeigt. Kotov u. Paelike (2017) nutzte eine **DTW**-Variante zum Signaltuning. Alle obigen Algorithmen werden zwar zur Korrelation von Sedimentkernen eingesetzt, aber es gibt kein Werkzeug, um automatisch Lücken zu schließen. Dieser Schritt wird noch manuell durchgeführt. **Core Merger** basiert auf **Subsequence DTW** zur Kernkorrelation und nutzt diese Korrelation, um Lücken des einen Kerns mit den korrespondierenden Daten des anderen zu füllen.

4.3 Dynamic Time Warping

Ebenso wie die Kreuzkorrelation, ist Dynamic Time Warping (**DTW**) ein Algorithmus, um die Ähnlichkeit zweier Zeitreihen zu bestimmen. Im Gegensatz zur Kreuzkorrelation berücksichtigt **DTW** nicht nur konstante Verschiebungen der Zeitreihen gegeneinander, sondern auch Streckungen und Stauchungen. Beim Vergleich von Bohrkerndaten können dies beispielsweise unterschiedliche Schichtdicken durch leicht verschiedene Sedimentationsraten sein. Hierzu bedient man sich der dynamischen Programmierung: Sei ts_1 eine Zeitreihe der Länge m und ts_2 eine der Länge n , dann berechnet sich die Kostenmatrix C der Dimension $m \times n$ mit den Einträgen c_{ij} als:

$$c_{ij} = \text{dist}(ts_{1,i}, ts_{2,j}) + \min(c_{i-1,j-1}, c_{i-1,j}, c_{i,j-1})$$

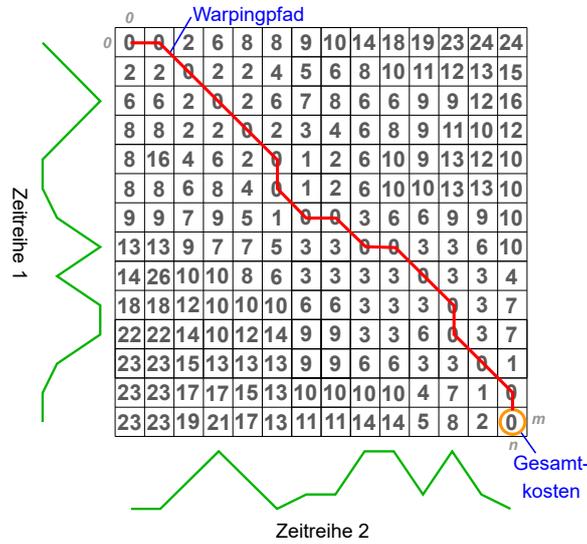


Abbildung 4.5: DTW-Kostenmatrix mit Gesamtkosten (orange) und optimalen Warping Pfad (rot) zweier Zeitreihen

Wobei $c_{-1-1} = 0$ und $c_{-1x} = c_{x-1} = \infty \forall x \in \mathbb{N}_0$ sind und $dist$ ein Abstandsmaß, hier wurde der euklidische Abstand gewählt, da es sich um räumliche Verschiebungen von Sedimentschichten handelt. Jeder Eintrag c_{ij} der Matrix entspricht somit den minimalen Kosten einer Zuordnung der Teilstücke von ts_1 bis Index i und ts_2 bis Index j . Für die Gesamtkosten gilt dann:

$$DTW(ts_1, ts_2) = c_{m-1n-1}$$

Diese Gesamtkosten $DTW(ts_1, ts_2)$ sind ein Maß für die Ähnlichkeit der beiden Zeitreihen (Akl u. Valaee, 2010). Merkt man sich zudem an jedem Schritt der Berechnung von c_{ij} die Vorgängerindizes, so kann man durch "zurücklaufen" alle für die berechneten Kosten genutzten Indexzuordnungen von ts_1 zu ts_2 rekonstruieren, den sogenannten Warping Pfad. DTW berechnet also den Pfad mit den geringsten akkumulierten Kosten durch die Kostenmatrix, wie in Abbildung 4.5 veranschaulicht. Hierdurch werden nicht nur Informationen über die Ähnlichkeit der beiden gesamten Zeitreihen, sondern auch über die Zuordnungen der einzelnen Teilstücke gewonnen.

Bei der Berechnung gelten folgende Regeln:

- Der erste Punkt von ts_1 muss mit dem ersten von ts_2 gematcht werden und ebenso der jeweils letzte Punkt. (Der Pfad startet immer bei c_{00} und endet immer bei c_{m-1n-1})
- Jeder Punkt von ts_1 muss mit mindestens einem von ts_2 gepaart werden und umgekehrt, Mehrfachzuordnungen sind erlaubt. (Es dürfen keine Zeilen oder Spalten übersprungen werden)

- Die Zuordnung der Punkte muss monoton aufsteigend erfolgen. (Es sind nur Bewegungen nach unten, rechts oder diagonal rechts unten erlaubt)

Ein Pfad entlang der Diagonalen von C entspricht der Kreuzkorrelation von ts_1 und ts_2 .

Subsequence DTW ist eine DTW-Variante von Rabiner et al. (1978), bei der eine kurze Sequenz innerhalb einer längeren Zeitreihe gesucht wird. Hierzu wird die erste Regel gelockert. Stattdessen wird mittels eines flexiblen gleitenden Fensters das Stück der längeren Zeitreihe gesucht, welches die größte Übereinstimmung mit der kurzen Sequenz aufweist. Diese Variante wird in **Core Merger** eingesetzt.

4.4 Core Merger

Als Eingabe für den **CoreMerger** dient der äquidistante Datensatz des zu ergänzenden Kerns **core**, der äquidistante Datensatz **filler**, aus welchen die Daten entnommen werden sollen, und eine Liste mit Zuordnungen gemeinsamer stratigraphischer und sedimentologischer Markerlagen beider Kerne. Hierbei handelt es sich beispielsweise um Tephren oder charakteristische Sedimentwechsel. Diese Markerlagen dienen als Fixpunkte der weiteren Korrelation der Kerne zueinander. Dies ist wichtig, um solche klaren Zuordnungen nicht versehentlich zu verletzen. Lücken werden durch Wiederholung des letzten Wertes davor aufgefüllt, außerdem wird ihre Position in der Liste **TrustList** gespeichert. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass Elementen in einer Lücke ebenfalls Punkte zugewiesen werden und diese Punkte nicht zu weit von den umgebenden Daten entfernt sind. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit des Überspringens von Lücken oder einer übermäßigen Zuordnung von Daten zu einer Lücke unter **DTW** verringert. Zusätzlich wird für jeden Kern eine Liste mit **Events** benötigt (s. Kapitel 2.2). Daten innerhalb eines **Events** von **filler** sollten nicht in **core** eingefügt werden, ebenso ist eine Datenlücke in **core** während eines **Events** nicht von Bedeutung. Messdaten innerhalb von **Events** sind beim Vergleich zweier Kerne quasi Rauschen. Daher werden vor dem Vergleich alle Daten innerhalb von **Events** aus den Datensätzen entfernt. **Filler** und **core** werden jeweils an den Markerlagen in Stücke m_i zerschnitten. Eine Korrelation erfolgt immer zwischen zwei, durch die selben Markerlagen begrenzten Stücke $m_{i,core}$ und $m_{i,filler}$.

Die Vorbereitungen nochmal in Pseudo-Code zusammengefasst:

```
entferne_Events (core , coreAger)
entferne_Events (filler , fillerAger)

erzeuge_TrustLists(core , filler)
fülle_Lücken_temporär(core , filler)

m_core = zerschneide core an Markerlagen
```

```
 $m_{filler}$  = zerschneide filler an Markerlagen
```

Durch unterschiedliche Sedimentationsraten, enthaltene Lücken u.ä. können diese beiden Stücke unterschiedlich lang sein. Außerdem können durch Varianzen der Messmethoden die Amplituden der beiden Datensätze verschieden sein. Zur besseren Vergleichbarkeit werden deshalb die Stücke z-normiert. Diese so aufbereiteten Segmente von $m_{i,core}$ werden an den enthaltenen Lücken nochmal in s Subsegmente $sm_{ij,core}$ zerteilt und die Lücken verworfen. Wobei $j \in [1, s]$ und s die Anzahl der Lücken in $m_{i,core}$ plus eins ist. Für diese Subsegmente $sm_{ij,core}$ wird eine Zuordnung als Subsequenz von $m_{i,filler}$ mittels **Subsequence DTW** bestimmt. Um zu garantieren, dass keine Überschneidungen auftreten, wird $sm_{ij,core}$ erst ab dem letzten zugeordneten Punkt von $sm_{i-1,j,core}$ zu $m_{i,filler}$ gesucht. Bei dieser Zuordnung werden die Zeitwerte ignoriert. Daher ist es wichtig, dass die beiden Zeitreihen *core* und *filler* äquidistant sind.

```
for i :
  z-normalize( $m_{i,core}$ )
  z-normalize( $m_{i,filler}$ )

   $sm_{ij,core}$  = teile  $m_{i,core}$  an den Lücken

  le = 0
  for seg in  $sm_{ij,core}$  :
    wPath = subsequenceDTW(seg.y ,  $m_{i,filler}$ [le : ].y)
    le = wPath[-1,1]
    fullWarpingPath.append(wPath)
```

Dies ergibt einen Warping Pfad für jedes Teilstück der Kerne und zusammengesetzt einen gesamten Warping Pfad über das ganze Kernpaar, bei dem die Markerlagen immer genau aufeinander fallen. Zum Verschließen einer Lücke $gap := (p_a, p_b)$ in *core* werden im Warping Pfad die zugeordneten Punkte q_c zu p_a und q_d zu p_b aus *filler* gesucht. Anhand der *TrustList* wird überprüft, ob es sich hierbei vollständig um Daten aus einer Lücke in *filler* handelt. In diesem Fall werden die Datenpunkte verworfen und nicht eingefügt. Die Lücke bleibt bestehen. Handelt es sich nicht um eine Lücke, so werden die Daten $fill := (q_c, q_d)$ an den Bereich in *core* angepasst. Hierzu wird ein Algorithmus zur Datenfusion genutzt, den wir in Andrés López et al. (2017) präsentiert haben:

Zuerst wurden die Daten auf die Umgebung in *core* renormiert, um messbedingte Unterschiede in den Amplituden auszugleichen. Hierzu wurden die beiden Mengen $P_{prev} := [p_{a-w}, p_a]$ und $P_{next} := [p_b, p_{b+w}]$ betrachtet, mit $w = \max(15, ||gap|| * 0, 1)$. Sei P diejenige der beiden Mengen mit der kleinsten Differenz zwischen Minimum und Maximum, dann werden die renormier-

ten Punkte berechnet als:

$$fill'_i = \frac{fill_i - \min(fill)}{\max(fill)} * (\max(P) - \min(P)) + \min(P)$$

Anschließend werden p_a und q_c , sowie p_b und q_d jeweils aufeinander geschoben und diese Verschiebung über die restlichen Daten propagiert. Für einen beliebigen verschobenen Datenpunkt q_i zum Punkt q_i , für $i \in [j, h]$ gilt:

$$q'_i = (q_c - p_a) + ((q_d - p_b) - (q_c - p_a)) \frac{q_i - q_c}{q_d - q_c}$$

Diese Datenpunkte $q_i, i \in (j, h)$ werden in die Lücke in `core` eingefügt. Als entsprechende Tiefenwerte werden die Tiefen zwischen p_a und p_b linear interpoliert.

Core Merger wurde in Python geschrieben und nutzt die **Subsequence DTW**-Implementierung von Tavenard et al. (2017).

4.5 Evaluation

Um die Funktionalität des Algorithmus bewerten zu können, wurde **Core Merger** an einem Datensatz mit künstlichen Lücken getestet. Aufgrund seiner Funktionsweise kann **Core Merger** auf einzelne Stücke zwischen Markerlagen reduziert werden: Ein Datensatz wird anhand der Markerlagen in Stücke geschnitten. Zwischen diesen Stücken werden die Korrelationen berechnet, anhand derer die Lücken gefüllt werden. Daher beschränkt sich ein Testlauf jeweils auf ein Stück zwischen "Markerlagen". Als Basis für den Testdatensatz wurde der $\delta^{18}\text{O}$ Datensatz des NGRIP2 (Rasmussen et al., 2014) gewählt, da es sich um einen lückenlosen Datensatz realer Messdaten handelt, der das gleiche Phänomen, die Temperaturentwicklung, in einem vergleichbaren Zeitraum misst, wie die Auel *C_{org}* Datensätze. Für einen Testlauf wurde jeweils ein zufälliges Stück von 2000 Datenpunkten aus dem $\delta^{18}\text{O}$ Datensatz ausgeschnitten. Dieses Stück bildete die originale, lückenlose Zeitreihe $ts_{original}$. Aus dieser wurden eine lückenhafte Zeitreihe $ts_{Lücke}$ erzeugt, indem an drei zufälligen Positionen Stücke einer zufälligen Länge zwischen 64 und 256 Punkten ausgeschnitten wurden. Zwischen zwei Lücken wurde ein Abstand von 256 Punkten erzwungen, um Überschneidungen von Lücken zu verhindern. Des Weiteren wurde aus $ts_{original}$ eine verzerrte Zeitreihe ts_{ver} generiert: Hierzu wurde die Zeitachse in Stücken zufälliger Länge zwischen 128 und 512 Punkten mit einem zufälligen Faktor zwischen 0,75 und 1,25 multipliziert und nachfolgende Punkte so verschoben, dass keine Lücken oder Überschneidungen entstanden. Abschließend wurde die so erzeugte Zeitreihe noch auf die gleiche Schrittweite wie $ts_{original}$ interpoliert. Die beiden so entstandenen Zeitreihen $ts_{Lücke}$ und ts_{ver} entsprechen in ihrer Struktur und ihrem Verhältnis zueinander denen der AU-Kerne (s. 4.6).

$ts_{Lücke}$ wurde als **core** und ts_{ver} als **filler** in **Core Merger** gegeben und so eine Zeitreihe mit gestopften Lücken ts_{stopf} berechnet.

Durch die Konstruktion der Zeitreihen ist bekannt welcher Punkt aus ts_{ver} welchem Punkt in $ts_{original}$ und folglich auch in $ts_{Lücke}$ entspricht. Dies wurde für das Fehlermaß ausgenutzt: Am Beginn und am Ende einer Lücke wurde geprüft, welcher Index i_{ber} von ts_{stopf} durch den Algorithmus hier zugewiesen wurde und welcher Index i_{real} aus ts_{stopf} tatsächlich diesem Punkt in $ts_{original}$ entspricht. Der Fehler für den Beginn einer Lücke e_{Beginn} wurde berechnet als:

$$e_{Beginn} := \sum_{L \in \{Lücken\}} abs(i_{L,ber} - i_{L,real})$$

Analog für den Fehler der Enden e_{Ende} . Der Gesamtfehler ergibt sich als Durchschnitt der Fehler des Beginns und des Endes.

Als Vergleich zu existierenden Methoden wurde ein anderer Algorithmus genutzt, bei welchem zur Kernkorrelation die Kreuzkorrelation eingesetzt wurde. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde der Rest der Algorithmus von **Core Merger** übernommen. Nach 150000 Durchläufen liegt der durchschnittliche Index Fehler des **Core Merger** bei 2,7 und der der Kreuzkorrelation bei 361,5. Abbildung 4.6 zeigt das Ergebnis eines Testdurchlaufs. Die Variante

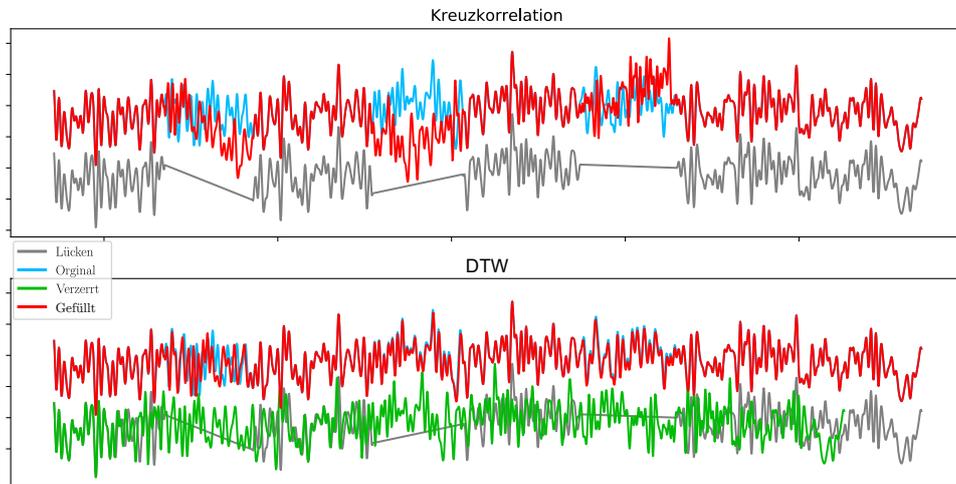


Abbildung 4.6: Vergleich der beiden Merger Varianten mit Kreuzkorrelation (oben) und DTW (unten). Zufälliger Ausschnitt aus NGRIP2 $\delta^{18}O$ (Rasmussen et al., 2014). Die DTW-Kurve zeigt eine schlechtere und zwei gute Füllungen.

mit Kreuzkorrelation hatte hierbei einen Fehler von 313,5 und **Core Merger** einen Fehler von 3. Die durch Kreuzkorrelation berechneten Füllungen passen in keiner Lücke zur originalen Kurve. In der mittels **Core Merger** gestopften

Kurve stimmen die hinteren beiden Füllungen sehr gut mit der originalen Kurve überein, die erste Lücke weicht leicht davon ab. Im Gegensatz zur Kreuzkorrelation sind die Werte hier nur leicht gegen die originalen verschoben und verzerrt. Letzteres liegt hauptsächlich an der Verzerrung der als **filler** genutzten Kurve. Dies zeigt eine Grenze des **Core Merger**: Verzerrungen in **filler** durch abweichende Sedimentationsraten innerhalb einer Füllung können nicht erkannt werden. Eine weitere Problemsituation sind Signale, die periodisch und gleichmäßig in beiden Dimensionen sind. Hier kann es passieren, dass die Zuordnung phasenversetzt erfolgt. Dieser Effekt tritt besonders bei stark geglätteten Kurven auf. Unterscheidet sich das Rauschen zwischen beiden Datensätzen stark, kann der Effekt allerdings auch bei ungeglätteten Kurven auftreten.

4.6 AU Composit

Mit dem oben beschriebenen Algorithmus wurden die Lücken des Kerns AU4 mit den korrespondierenden Daten des AU3 gefüllt. Abbildung 4.7 zeigt den daraus resultierenden Datensatz AU Composit im Vergleich zu den beiden original Datensätzen. An manchen Stellen traten sowohl in AU3, als auch in AU4 Lücken zur gleichen Zeit auf, in diesem Fall war es nicht möglich jene zu füllen. Der Kern AU4 ist 2 m länger als der AU3 und geht weiter in die Vergangenheit. Lücken in diesem Bereich des AU4 konnten durch fehlende Daten im AU3 nicht gefüllt werden. Eine Schwierigkeit war die teilweise sehr große Differenz der Sedimentdicke zwischen zugeordneten Markerlagen im Vergleich der Kerne AU3 und AU4 (siehe Abbildung 4.8). Zum Teil ist eine solche Schicht in einem Kern doppelt so mächtig wie im anderen mit Unterschieden von bis zu einem Meter. Außerdem gibt es Bereiche mit sehr wenigen Markerlagen, wie zwischen 20 und 25 m, und andere mit vielen Markerlagen, wie zwischen 90 und 95 m. Dies führt dazu, dass Lücken mit Daten anderer Auflösung gefüllt werden müssen: Mit geringerer Auflösung, wenn die Schicht in AU3 dünner ist als in AU4 und mit höherer, wenn dicker. Dies lässt sich nicht vermeiden. Eine Zuordnung der eingefügten Bereiche des AU3 zu den Lücken im AU4 ist in Tabelle 9.1 aufgeführt. Es konnten 125 der 260 Lücken gefüllt werden. Von den restlichen Lücken liegt ca. ein Drittel in Events und bei den verbleibenden fehlen in beiden Kernen Daten. Alle gefüllten Lücken wurden abschließend von den Kollegen des Arbeitskreises, die diese Aufgabe normalerweise manuell durchführen, optisch durch Vergleich der Rohdaten und durch Abgleich mit der Stratigraphie beider Kerne überprüft.

Abschließend wurde der AUComp mit **ELSAinteractive++** mit einem 3 Punkt Median Filter gefiltert, um Ausreißer zu unterdrücken, mit einem $0,5 \frac{1}{a}$ Butterworth Tiefpassfilter der Ordnung 10 geglättet, um hochfrequente Schwankungen zu unterdrücken und zeitlich auf ein Jahr resampled.

Diese Art des Lückenfüllens ist nur gerechtfertigt, wenn beide Kerne tat-

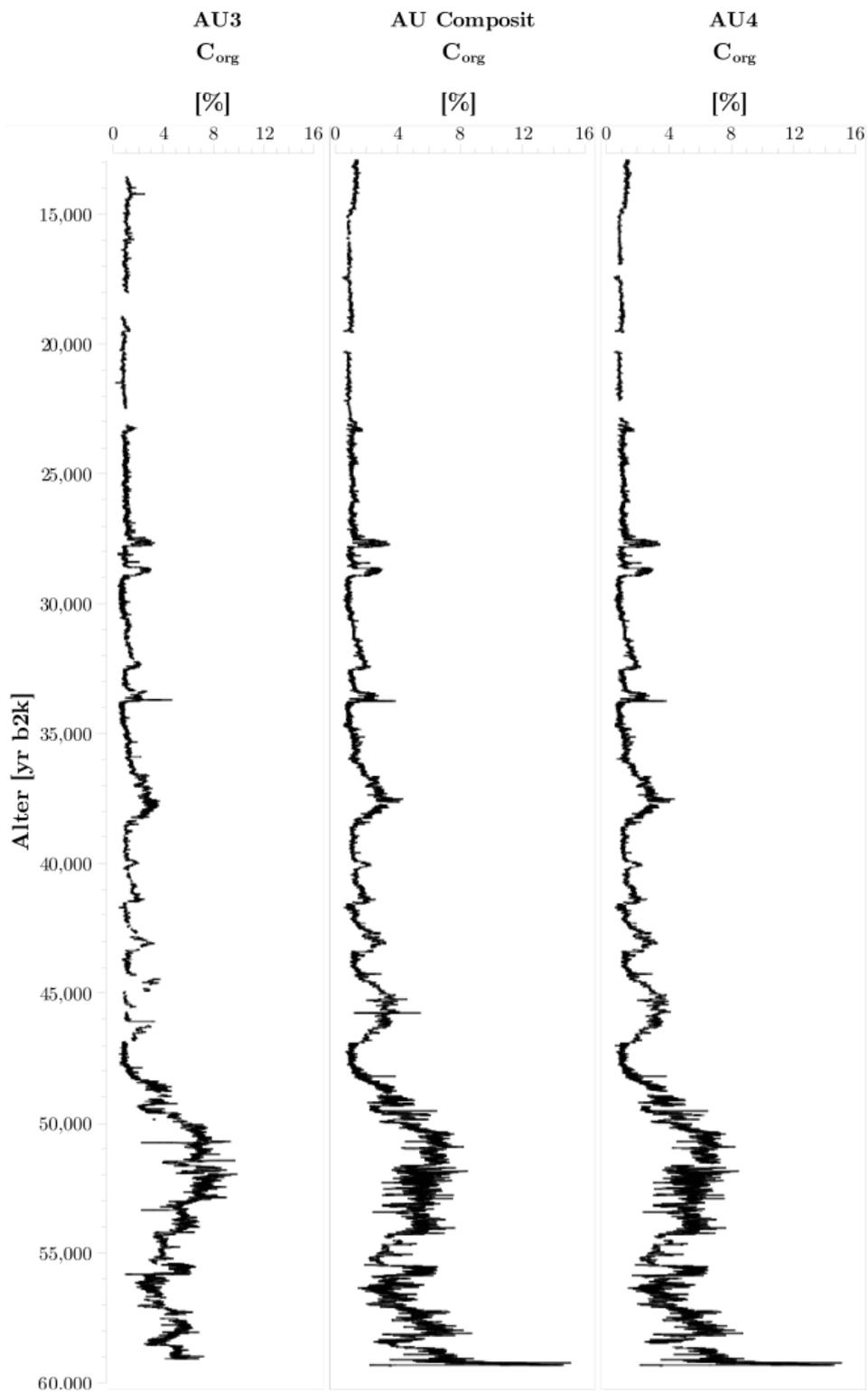


Abbildung 4.7: Lückenhafte C_{org} Datensätze von AU3 und AU4 von 14000 bis 60000 yr b2k und daraus berechneter Datensatz AU Composit (Daten aus Sirocko et al. (2020))

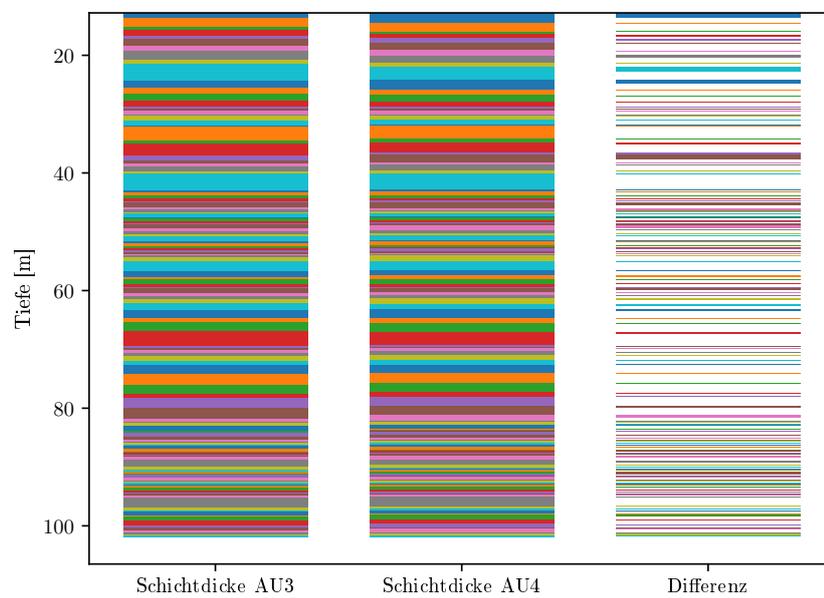


Abbildung 4.8: Schichtdicken zwischen Markerlagen in AU3 und AU4, sowie die Dickendifferenz zwischen korrelierten Lagen.

sächlich in unmittelbarer Nähe zueinander genommen wurden und die gleichen Daten zeigen. Andernfalls entsprechen die eingefügten Daten mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht den realen Ereignissen.

Kapitel 5

Fehlerabschätzung zum Aridity-Index für PalMod

5.1 Einführung

In Fuhrmann et al. (2019) wurde ein Aridity-Index für 10 Schlüsselregionen weltweit aus verschiedenen Datenquellen zusammengestellt. Im Rahmen dieser Dissertation wurde dazu die Fehlerabschätzung entwickelt.

Der Aridity-Index beschreibt weltweit die Verläufe von Trockenheitsphasen der letzten 60000 Jahre. Hierzu wurden publizierte Daten mariner und terrestrischer Sedimentkerne zu äolischem Staubgehalt, Pollen und Speläothem-Wachstumsphasen aus 10 Schlüsselregionen zusammengetragen. Jene waren Zentraleuropa, das Arabische Meer, China, Nord-West-Afrika, Südeuropa, die portugiesische Küste, das Mittelmeer, das Cariaco Basin, das St. Barbara Basin und Australien-Oceanien. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die originalen Daten quantisiert. Der Aridity-Index AI wurde hierbei für jede Region berechnet als die Summe von Speläothemen- sI , Baumpollen- pI und äolischem Staub-Index dI , wobei $sI \in \{0, 1\}$, $pI \in \{0, 1, 2\}$ und $dI \in \{0, 1, 2\}$. Somit ist $AI \in [0, 5] \subset \mathbb{N}$. Abbildung 5.1 zeigt den Aridity-Index für Zentraleuropa zusammen mit seinen Komponenten. Für diesen berechneten Aridity-Index sollte ein Fehler angegeben werden. Die Datensätze wurden alle mit unterschiedlichen Methoden erhoben und hatten sehr unterschiedliche Fehlerangaben, teilweise fehlten diese in Gänze. Zusätzlich flossen die verschiedenen Messungen durch die Art der Berechnung mit wechselndem Anteil in den Index ein. Eine direkte Fehlerabschätzung durch Fehlerfortpflanzung war aus diesem Grund schwierig. Um dennoch für den Aridity-Index eine sinnvolle Fehlerabschätzung geben zu können wurde folgenden Methode entwickelt:

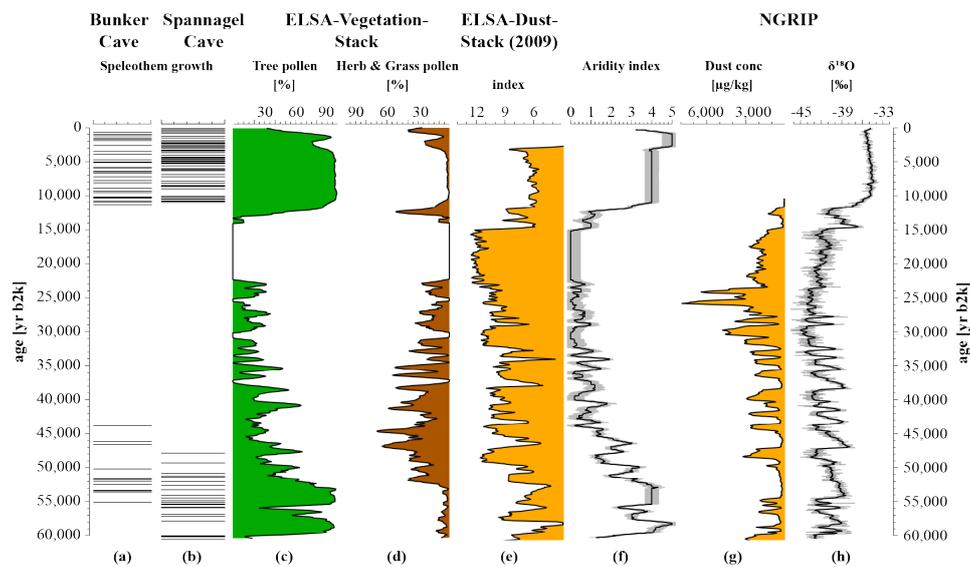


Abbildung 5.1: Klima Zentraleuropas der letzten 60000 Jahre aus Fuhrmann et al. (2019), erstellt mit *ELSAinteractive++*. Insbesondere Aridity-Index (f) aus den Daten (a)-(e) mit hier beschriebener Fehlerabschätzung. (a) Bunker Cave (Fohlmeister et al., 2012, 2013; Weber et al., 2018); (b) Spannagel Cave (Holzkämper et al., 2004; Spötl u. Mangini, 2002); (c, d) ELSA-Vegetation-Stack (Sirocko, 2016), (e) ELSA-Dust-Stack (Seelos et al., 2009); (g) Staubkonzentration aus NGRIP Eiskern (Ruth et al., 2007); (h) $\delta^{18}\text{O}$ Daten aus NGRIP Eiskern (North Greenland Ice Core Project Members et al., 2004)

5.2 Fehlerabschätzung

Regionen	Fehler Speläothem Alter [%]	Fehler Baumpollen [%]	Fehler Äolischer Staub [%]
Zentral Europa	2.66	3	5
Arabisches Meer	1.5	1	3
China	2	2	2
NW-Afrika	1	10	2
Südeuropa	1	4	2
Portugiesische Küste	1	3	2
Cariaco Basin	4	3	2
Mittelmeer	2.5	2	3
St. Barbara Basin	1	3	Keine Daten
Australien - Ozeanien	4	3	3

Tabelle 5.1: Fehlerabschätzungen für Speläotheme, Pollen und äolischen Staub aller 10 Schlüsselregionen des Aridity-Index (Fuhrmann et al., 2019)

Angelehnt an Kohler et al. (2009) wurde der Fehler durch mehrfache Berechnung des Aridity-Indexes mit künstlich gestörten Daten simuliert. Die Fehler der Eingangsdaten wurden angenommen, wie in Tabelle 5.1 angegeben. Falls die verwendeten Datensätze über keine Fehlerangaben verfügten, wurden diese großzügig abgeschätzt.

In einem Simulationslauf wurde jeder Eingangswert mit einem zufälligen Wert innerhalb seiner Fehlerabschätzung gestört. D.h. zu jedem Wert x wurde ein zufälliger Wert von $\pm e$ addiert, wobei e kleiner-gleich dem abgeschätzten Fehler von x ist. Auf diese Weise wurde ein künstlich gestörter Aridity-Index berechnet. Die Varianz der künstlich gestörten Aridity-Indizes für einen Zeitpunkt t aus 100000 unabhängigen Simulationsläufen wurde als Fehlerabschätzung für den ungestörten Aridity-Index zum Zeitpunkt t angenommen, $\forall t \in [0, 600000]$ Jahre. Die beiden anderen Möglichkeiten zur Fehlerabschätzung sind:

1. Die Annahme des Fehlers als additiv unter Vernachlässigung der Quantisierung, also als Summe der Fehler der Rohdaten.
2. Als Maximalfehler alle Rohdaten gemäß ihrer Fehler je in die gleiche Richtung maximal zu stören. Diese gestörten Daten zu quantisieren und je einen positiv und einen negativ gestörten Index zu berechnen.

Die erste Variante unterschätzt den tatsächlichen Fehler, da sie die Quantisierung vernachlässigt. Die zweite Variante überschätzt den tatsächlichen Fehler. Ein direkter Vergleich der drei verschiedenen Fehlerabschätzungen

zeigt, dass wie erwartet die simulieren Fehler zwischen Variante 1 und Variante 2 liegen (siehe Abbildung 5.2). Dies zeigt, dass die hier vorgestellte Methode eine sinnvolle Abschätzung des Fehlers liefert.

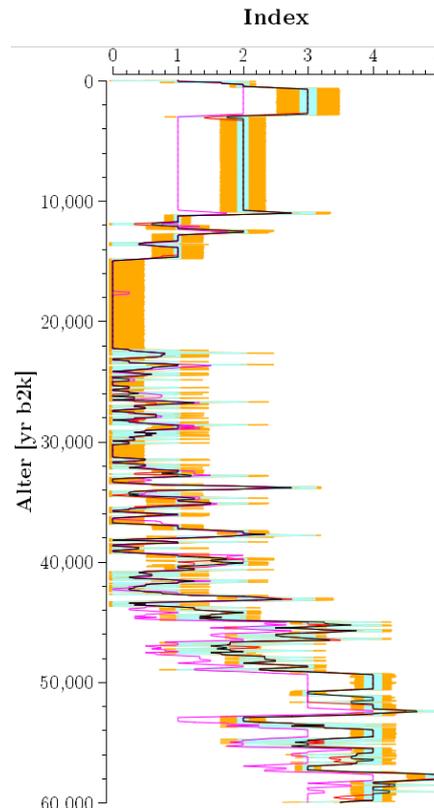


Abbildung 5.2: Aridity-Index für Zentraleuropa mit unterschiedlichen Fehlerabschätzungen: Schwarz - Aridity-Index, türkis - Summe der Fehler (1), orange - simulierter Fehler, rot - positiv gestörter Index nach Variante 2, magenta - negativ gestörter Index nach Variante 2 (Daten aus Fuhrmann et al. (2019))

Kapitel 6

Fazit

Mit *ELSAinteractive*++ wurde ein nützliches Werkzeug entwickelt, welches sich seit über zwei Jahren in der Arbeitsgruppe Klima und Sedimente im Praxiseinsatz bewährt hat. Insbesondere die Tiefen-Alters-Umrechnung ist ein wichtiges Instrument zum schnellen und unkomplizierten Vergleich von Daten verschiedener Bohrkern Datensätze. Dieser Nutzen wurde beispielhaft an drei Projekten demonstriert:

Es wurden Daten zum Sedimentationsprozess des Laacher Sees aufgearbeitet und zum ersten publizierten Sediment-Datensatz des Laacher Sees zusammengefasst. Hierbei zeigte sich, dass die Sedimente des Sees durch Bioturbation und Umlagerungsprozesse, insbesondere in Folge der beiden künstlichen Seespiegelabsenkungen, sehr stark gestört sind. Diese sind im Uferbereich besonders stark ausgeprägt. Im Zentrum sind die Sedimente zwar weniger gestört, jedoch ist die Sedimentationsrate hier sehr gering und zeigt die gesamten letzten 12800 Jahre in wenig mehr als 3 m. Aus diesen Gründen können keine sicheren Aussagen zur Paläoumwelt getroffen werden.

Im Rahmen des Projektes PalMod entstand eine Methode zur Fehlerabschätzung eines weltweiten Aridity-Index. Diese erlaubt eine schnelle, realistische Fehlerabschätzung für Daten aus vielen unterschiedlichen Datenquellen verschiedener Messmethoden. Diese Technik kann auch auf andere Daten übertragen werden und ermöglicht zukünftig eine sinnvolle Fehlerabschätzung beim Vergleich anderer weltweiter Datensätze.

Um schnell und zuverlässig Lücken eines Sedimentbohrkerns mit Hilfe eines parallelen ähnlichen Kern zu füllen, wurde der Algorithmus **Core Merger** entwickelt und implementiert. Dieser wurde angewandt, um aus den beiden Kernen AU3 und AU4 des Auel Maares den AUComp zu erstellen. Abschließend wurde AUComp mit 3 Punkt Median Filter, sowie einem $0,5^{1/a}$ Butterworth Filter geglättet und auf Einjahresauflösung reinterpoliert. Zusammen mit anderen Daten im ELSA-19-Stack (Sirocco et al., 2020) bildet dieser den bis jetzt höchst aufgelösten kontinuierlichen Sediementdatensatz der letzten 60000 Jahre.

Kapitel 7

Danksagung

Mein Dank geht an die Projekte PalMod und Angus unter deren Finanzierung ein großer Teil dieser Arbeit entstanden ist. Ein besonderer Dank an meine Betreuer für die gute Betreuung und die stets konstruktive und fördernde Zusammenarbeit. Ebenfalls danke ich meinen Kollegen der AG Klima u. Sedimente des Institutes für Geowissenschaften der Uni Mainz für die Aufnahme eines Nichtgeologen und die konstruktive und lehrreiche gemeinsame Arbeit. In gleicher Weise danke ich allen Kollegen des Institutes für Informatik der Uni Mainz für die gute Zusammenarbeit und eine tolle gemeinsame Zeit. Und natürlich danke ich all meinen Freunden und meiner Familie für die Unterstützung und den Rückhalt, besonders in den schwierigeren Zeiten der Promotion.

Kapitel 8

Literaturverzeichnis

- [Abdi u. Williams 2010] ABDI, Hervé ; WILLIAMS, Lynne J.: Principal component analysis. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics* 2 (2010), jun, Nr. 4, S. 433–459. <http://dx.doi.org/10.1002/wics.101>. – DOI 10.1002/wics.101
- [Akl u. Valaee 2010] AKL, Ahmad ; VALAEE, Shahrokh: Accelerometer-based gesture recognition via dynamic-time warping, affinity propagation, and compressive sensing. In: *2010 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, IEEE, 2010
- [Andrés López et al. 2017] ANDRÉS LÓPEZ, Daniel ; DIENSBERG, Benedikt ; SCHÖMER, Elmar ; SCHWANECKE, Ulrich: VCIT - Visually Corrected inertial Tracking. In: EIBL, Maximilian (Hrsg.) ; GAEDKE, Martin (Hrsg.): *INFORMATIK 2017*, Gesellschaft für Informatik, Bonn, 2017, 899–906
- [Angus II 2019] <http://www.angus2.de>
- [Baales 1997] BAALES, A. M. von B. M. von Berg: Tierfährten in der allerødzeitlichen Vulkanasche des Laacher See-Vulkans bei Mertloch. In: *Archäologisches Korrespondenzblatt* 27 (1997), S. 1–12
- [Baales 1999] BAALES, A. M. von B. M. von Berg: Verkohlte Bäume im Trass der Laacher See-Tephra bei Kruft (Neuwieder Becken). Ein Beitrag zur Datierung des Laacher See-Ereignisses und zur Vegetation der Allerød-Zeit am Mittelrhein. In: *Archäologisches Korrespondenzblatt* 28 (1999), S. 191–204
- [Baales 2002a] BAALES, M.: Vulkanismus und Archäologie des Eiszeitalters am Mittelrhein. Die Forschungsergebnisse der letzten dreissig Jahre. In: *Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz* 49 (2002), 43–80. <https://journals.ub.uni-heidelberg.de/index.php/jahrb-rgzm/issue/view/2331>

- [Baales 2002b] BAALES, Michael: Auf der Fährte spätglazialer Pferde bei Mertloch (Neuwieder Becken, Mittelrhein, Deutschland). In: *Bonn zoological Bulletin* 50 (2002), Dezember, Nr. 3, 109–133. https://www.zoologicalbulletin.de/BzB_Volumes/Volume_50_3/109_133_BZB50_3_Baales_Michael.PDF
- [Baales 2006] BAALES, Michael: Environnement et archéologie durant le Paléolithique final dans la région du Rhin moyen (Rhénanie, Allemagne) : conclusions des 15 dernières années de recherches. In: *L'Anthropologie* 110 (2006), jul, Nr. 3, S. 418–444. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anthro.2006.06.009>. – DOI 10.1016/j.anthro.2006.06.009
- [Baldini et al. 2018] BALDINI, James U. L. ; BROWN, Richard J. ; MAWDSLEY, Natasha: Evaluating the link between the sulfur-rich Laacher See volcanic eruption and the Younger Dryas climate anomaly. In: *CLIMATE OF THE PAST* 14 (2018), JUL 4, Nr. 7, S. 969–990. <http://dx.doi.org/10.5194/cp-14-969-2018>. – DOI 10.5194/cp-14-969-2018. – ISSN 1814–9324
- [van den Bogaard 1995] BOGAARD, Paul van d.: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of sanidine phenocrysts from Laacher See Tephra (12,900 yr BP): Chronostratigraphic and petrological significance. In: *Earth and Planetary Science Letters* 133 (1995), jun, Nr. 1-2, S. 163–174. [http://dx.doi.org/10.1016/0012-821x\(95\)00066-1](http://dx.doi.org/10.1016/0012-821x(95)00066-1). – DOI 10.1016/0012-821x(95)00066-1
- [Bourdon et al. 1994] BOURDON, Bernard ; ZINDLER, Alan ; WÖRNER, Gerhard: Evolution of the Laacher See magma chamber: Evidence from SIMS and TIMS measurements of U-Th disequilibria in minerals and glasses. In: *Earth and Planetary Science Letters* 126 (1994), aug, Nr. 1-3, S. 75–90. [http://dx.doi.org/10.1016/0012-821x\(94\)90243-7](http://dx.doi.org/10.1016/0012-821x(94)90243-7). – DOI 10.1016/0012-821x(94)90243-7
- [Brauer et al. 1999a] BRAUER, Achim ; ENDRES, Christoph ; GÜNTER, Christina ; LITT, Thomas ; STEBICH, Martina ; NEGENDANK, Jörg F. W.: High resolution sediment and vegetation responses to Younger Dryas climate change in varved lake sediments from Meerfelder Maar, Germany. In: *Quaternary Science Reviews* 18 (1999), mar, Nr. 3, S. 321–329. [http://dx.doi.org/10.1016/s0277-3791\(98\)00084-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0277-3791(98)00084-5). – DOI 10.1016/s0277-3791(98)00084-5
- [Brauer et al. 1999b] BRAUER, Achim ; ENDRES, Christoph ; NEGENDANK, Jörg F. W.: Lateglacial calendar year chronology based on annually laminated sediments from Lake Meerfelder Maar, Germany. In: *Quaternary International* 61 (1999), nov, Nr. 1, S. 17–25. [http://dx.doi.org/10.1016/s1040-6182\(99\)00014-2](http://dx.doi.org/10.1016/s1040-6182(99)00014-2). – DOI 10.1016/s1040-6182(99)00014-2

- [Butterworth 1930] BUTTERWORTH, Stephen: On the Theory of Filter Amplifiers. In: *Wireless Engineer* 7 (1930), 536–541. https://www.changpuak.ch/electronics/downloads/On_the_Theory_of_Filter_Amplifiers.pdf
- [Diensberg u. Sirocko 2020] DIENSBURG, benedikt ; SIROCKO, Frank: *Sedimentation process in the the Laacher See basin*. 2020. – In Prep.
- [Douglas u. Peucker 1973] DOUGLAS, David ; PEUCKER, Thomas: Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. In: *The Canadian Cartographer* 10 (1973), Nr. 2, S. 112–122. – ISSN 0008–3127
- [Engels et al. 2015] ENGELS, Stefan ; GEEL, Bas van ; BUDELMEIJER, Nico ; BRAUER, Achim: High-resolution palynological evidence for vegetation response to the Laacher See eruption from the varved record of Meerfelder Maar (Germany) and other central European records. In: *Review of Palaeobotany and Palynology* 221 (2015), oct, S. 160–170. <http://dx.doi.org/10.1016/j.revpalbo.2015.06.010>. – DOI 10.1016/j.revpalbo.2015.06.010
- [Fiedel et al. 2013] FIEDEL, Stuart J. ; SOUTHERN, John R. ; TAYLOR, R. E. ; KUZMIN, Yaroslav V. ; STREET, Martin ; HIGHAM, Thomas F. G. ; PLICHT, Johannes van d. ; NADEAU, Marie-Josée ; NALAWADE-CHAVAN, Shweta: Assessment of interlaboratory pretreatment protocols by radiocarbon dating an elk bone found below Laacher See tephra at Miesenheim IV (Rhineland, Germany). In: *Radiocarbon* 55 (2013), Nr. 2-3, S. 1443–1453. <http://dx.doi.org/10.1017/S0033822200048372>. – DOI 10.1017/S0033822200048372. – ISSN 0033–8222. – 21st International Radiocarbon Conference, Paris, FRANCE, 2012
- [Fisher u. Schmincke 1984] FISHER, Richard V. ; SCHMINCKE, Hans-Ulrich: *Pyroclastic Rocks*. Springer Berlin Heidelberg, 1984. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-74864-6>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-74864-6>
- [Fohlmeister et al. 2012] FOHLMEISTER, J. ; SCHRÖDER-RITZRAU, A. ; SCHOLZ, D. ; SPÖTL, C. ; RIECHELMANN, D. F. C. ; MUELSESE, M. ; WACKERBARTH, A. ; GERDES, A. ; RIECHELMANN, S. ; IMMENHAUSER, A. ; RICHTER, D. K. ; MANGINI, A.: Bunker Cave stalagmites: an archive for central European Holocene climate variability. In: *Climate of the Past* 8 (2012), oct, Nr. 5, S. 1751–1764. <http://dx.doi.org/10.5194/cp-8-1751-2012>. – DOI 10.5194/cp-8-1751-2012
- [Fohlmeister et al. 2013] FOHLMEISTER, Jens ; VOLLWEILER, Nicole ; SPÖTL, Christoph ; MANGINI, Augusto: COMNISPA II: Update of a mid-

- European isotope climate record, 11 ka to present. In: *The Holocene* 23 (2013), dec, Nr. 5, S. 749–754. <http://dx.doi.org/10.1177/0959683612465446>. – DOI 10.1177/0959683612465446
- [Fuhrmann et al. 2019] FUHRMANN, Florian ; DIENSBERG, Benedikt ; GONG, Xun ; LOHMANN, Gerrit ; SIROCKO, Frank: Aridity time series for 10 selected key regions of the global climate system during the last 60000 years. In: *In submission* (2019)
- [Holzkämper et al. 2004] HOLZKÄMPER, Steffen ; MANGINI, Augusto ; SPÖTL, Christoph ; MUDELSEE, Manfred: Timing and progression of the Last Interglacial derived from a high alpine stalagmite. In: *Geophysical Research Letters* 31 (2004), apr, Nr. 7, S. n/a–n/a. <http://dx.doi.org/10.1029/2003gl019112>. – DOI 10.1029/2003gl019112
- [Hotelling 1933] HOTELLING, Harold: Analysis of a complex of statistical variables into principal components. In: *Journal of educational psychology* 24 (1933), Nr. 6, 417. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1037/h0071325>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1037/h0071325>
- [Houben et al. 2013] HOUBEN, Peter ; KÜHL, Norbert ; DAMBECK, Rainer ; OVERATH, Jan: Lateglacial to Holocene rapid crater infilling of a MIS 2 maar volcano (West-Eifel Volcanic Field, Germany): environmental history and geomorphological feedback mechanisms. In: *Boreas* (2013), feb. <http://dx.doi.org/10.1111/bor.12012>. – DOI 10.1111/bor.12012
- [de Klerk et al. 2008] KLERK, Pim de ; JANKE, Wolfgang ; KUEHN, Peter ; THEUERKAUF, Martin: Environmental impact of the Laacher See eruption at a large distance from the volcano: Integrated palaeoecological studies from Vorpommern (NE Germany). In: *PALAEOGEOGRAPHY PALAEOCLIMATOLOGY PALAEOECOLOGY* 270 (2008), DEC 1, Nr. 1-2, S. 196–214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.09.013>. – DOI 10.1016/j.palaeo.2008.09.013. – ISSN 0031–0182
- [Kohler et al. 2009] KOHLER, A. ; BÖCKER, U. ; WARRINGER, J. ; BLOMBERG, A. ; OMHOLT, S. W. ; STARK, E. ; MARTENS, H.: Reducing Inter-Replicate Variation in Fourier Transform Infrared Spectroscopy by Extended Multiplicative Signal Correction. In: *Applied Spectroscopy* 63 (2009), mar, Nr. 3, S. 296–305. <http://dx.doi.org/10.1366/000370209787598906>. – DOI 10.1366/000370209787598906
- [Kotov u. Paelike 2017] KOTOV, S. ; PAELIKE, H.: MyDTW - Dynamic Time Warping program for stratigraphical time series. In: *EGU General Assembly Conference Abstracts* Bd. 19, 2017 (EGU General Assembly Conference Abstracts), 2157

- [Kubitz 2000] KUBITZ, Beate: *Die holozäne Vegetations- und Siedlungsgeschichte in der Westeifel am Beispiel eines hochauflösenden Pollendiagrammes aus dem Meerfelder Maar*. Borntraeger, 2000 (Dissertationes Botanicae 339). – ISBN 978–3–443–64251–8
- [Lallier et al. 2009] LALLIER, Florent ; CAUMON, Guillaume ; BORGOMANO, Jean ; VISEUR, Sophie: Dynamic Time Warping: a Flexible Efficient framework for Stochastic Stratigraphic Correlation. In: *Proc. 29th Gocad Meeting, Nancy, 2009*
- [Larsson u. Wastegard 2018] LARSSON, Simon A. ; WASTEGARD, Stefan: The Laacher See Tephra discovered in southernmost Sweden. In: *JOURNAL OF QUATERNARY SCIENCE* 33 (2018), JUL, Nr. 5, S. 477–481. <http://dx.doi.org/10.1002/jqs.3033>. – DOI 10.1002/jqs.3033. – ISSN 0267–8179
- [Leibnitz-Labor Kiel] LEIBNITZ-LABOR KIEL: *Leibniz-Labor für Altersbestimmung und Isotopenforschung der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel*. <http://www.leibniz.uni-kiel.de/de/stabile-isotope>
- [Lever et al. 2017] LEVER, Jake ; KRZYWINSKI, Martin ; ALTMAN, Naomi: Principal component analysis. In: *Nature Methods* 14 (2017), Juni, 641. <https://doi.org/10.1038/nmeth.4346>
- [LfU] LfU: *Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz*. <https://lfu.rlp.de>
- [LfU 2013] LfU: *Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Seenatlas*. http://213.139.159.46/prj-wwvauskunft/projects/seenatlas/daten/register3.jsp?seeId=61&see_bez=Laacher+See&showHydrologie=true&showChemismus=true. Version: Juli 2013
- [LfVermGeo] LFVERMGE0: *Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz*. <https://lvermgeo.rlp.de>
- [Litt et al. 2003] LITT, Thomas ; SCHMINCKE, Hans-Ulrich ; KROMER, Bernd: Environmental response to climatic and volcanic events in central Europe during the Weichselian Lateglacial. In: *Quaternary Science Reviews* 22 (2003), jan, Nr. 1, S. 7–32. [http://dx.doi.org/10.1016/S0277-3791\(02\)00180-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00180-4). – DOI 10.1016/S0277–3791(02)00180–4
- [Litt et al. 2009] LITT, Thomas ; SCHÖLZEL, Christian ; KÜHL, Norbert ; BRAUER, Achim: Vegetation and climate history in the Westeifel Volcanic Field (Germany) during the past 11 000 years based on annually laminated lacustrine maar sediments. In: *Boreas* 38 (2009), nov, Nr. 4, S. 679–690. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1502-3885.2009.00096.x>. – DOI 10.1111/j.1502–3885.2009.00096.x

- [Mudelsee et al. 2020] MUDELSEE, Manfred ; ALBERT, Johannes ; SIROCKO, Frank: *Statistical analyses of soil Rn fluxes and the meteorological drivers on basis of high-resolution time series from Schleswig-Holstein, Germany*. 2020. – In Prep.
- [Neugebauer et al. 2012] NEUGEBAUER, Ina ; BRAUER, Achim ; DRÄGER, Nadine ; DULSKI, Peter ; WULF, Sabine ; PLESSEN, Birgit ; MINGRAM, Jens ; HERZSCHUH, Ulrike ; BRANDE, Arthur: A Younger Dryas varve chronology from the Rehweise palaeolake record in NE-Germany. In: *Quaternary Science Reviews* 36 (2012), mar, S. 91–102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.12.010>. – DOI 10.1016/j.quascirev.2011.12.010
- [North Greenland Ice Core Project Members et al. 2004] NORTH GREENLAND ICE CORE PROJECT MEMBERS ; ANDERSEN, Katrine ; AZUMA, Nobuhiko ; BARNOLA, J-M ; BIGLER, M ; BISCAYE, P ; CAILLON, Nicolas ; CHAPPELLAZ, Jérôme ; B CLAUSEN, H ; DAHL-JENSEN, Dorthe ; FISCHER, H ; FLÜCKIGER, J ; FRITZSCHE, Diedrich ; FUJII, Yoshiyuki ; GOTO-AZUMA, Kumiko ; GRØNVOLD, K ; S GUNDESTRUP, N ; HANSSON, Margareta ; HUBER, Christof ; HVIDBERG, Christine ; WHITE, James: High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. In: *Nature* 431 (2004), 10, S. 147–51. <http://dx.doi.org/10.1038/nature02805>. – DOI 10.1038/nature02805
- [Olea 1994] OLEA, Ricardo A.: Expert systems for automated correlation and interpretation of wireline logs. In: *Mathematical Geology* 26 (1994), nov, Nr. 8, S. 879–897. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02083420>. – DOI 10.1007/bf02083420
- [Oppenheim et al. 1999] OPPENHEIM, Alan V. ; SCHAFER, Ronald W. ; BUCK, John R.: *Discrete-Time Signal Processing (2nd Edition) (Prentice-hall Signal Processing Series)*. Prentice Hall, 1999 http://research.iaun.ac.ir/pd/naghsh/pdfs/UploadFile_2230.pdf. – ISBN 0–13754920–2
- [Pälike 2002] PÄLIKE, Heiko: *Extending the geological calibration of the geological time scale*, University of Cambridge, Diss., 2002. <http://dx.doi.org/10.17863/cam.20474>. – DOI 10.17863/cam.20474
- [Parker et al. 2002] PARKER, A. G. ; GOUDIE, A. S. ; ANDERSON, D. E. ; ROBINSON, M. A. ; BONSALE, C.: A review of the mid-Holocene elm decline in the British Isles. In: *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 26 (2002), mar, Nr. 1, S. 1–45. <http://dx.doi.org/10.1191/0309133302pp323ra>. – DOI 10.1191/0309133302pp323ra

- [Press et al. 2007] PRESS, W.H. ; TEUKOLSKY, S.A. ; VETTERLING, W.T. ; FLANNERY, B.P.: *Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing*. 3. New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2007 <https://books.google.de/books?id=1aA0dzK3FegC>. – ISBN 9780521880688
- [Prochazka et al. 2019] PROCHAZKA, Vaclav ; MIZERA, Jiri ; KLETETSCHKA, Gunther ; VONDRAK, Daniel: Late Glacial sediments of the Stara Jimka paleolake and the first finding of Laacher See Tephra in the Czech Republic. In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF EARTH SCIENCES* 108 (2019), FEB, Nr. 1, S. 357–378. <http://dx.doi.org/10.1007/s00531-018-1658-y>. – DOI 10.1007/s00531-018-1658-y. – ISSN 1437-3254
- [Rabiner et al. 1978] RABINER, L. ; ROSENBERG, A. ; LEVINSON, S.: Considerations in dynamic time warping algorithms for discrete word recognition. In: *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 26 (1978), dec, Nr. 6, S. 575–582. <http://dx.doi.org/10.1109/tassp.1978.1163164>. – DOI 10.1109/tassp.1978.1163164
- [Ralska-Jasiewiczowa et al. 2003] RALSKA-JASIEWICZOWA, Magdalena ; NALEPKA, Dorota ; GOSLAR, Tomasz: Some problems of forest transformation at the transition to the oligocratic/ Homo sapiens phase of the Holocene interglacial in northern lowlands of central Europe. In: *Vegetation History and Archaeobotany* 12 (2003), dec, Nr. 4, S. 233–247. <http://dx.doi.org/10.1007/s00334-003-0021-8>. – DOI 10.1007/s00334-003-0021-8
- [Ramer 1972] RAMER, Urs: An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves. In: *Computer Graphics and Image Processing* 1 (1972), nov, Nr. 3, S. 244–256. [http://dx.doi.org/10.1016/s0146-664x\(72\)80017-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0146-664x(72)80017-0). – DOI 10.1016/s0146-664x(72)80017-0
- [Rasmussen et al. 2014] RASMUSSEN, Sune O. ; BIGLER, Matthias ; BLOCKLEY, Simon P. ; BLUNIER, Thomas ; BUCHARDT, Susanne L. ; CLAUSEN, Henrik B. ; CVIJANOVIC, Ivana ; DAHL-JENSEN, Dorthe ; JOHNSEN, Sifus J. ; FISCHER, Hubertus ; GKINIS, Vasileios ; GUILLEVIC, Myriam ; HOEK, Wim Z. ; LOWE, J. J. ; PEDRO, Joel B. ; POPP, Trevor ; SELERSTAD, Inger K. ; STEFFENSEN, Jørgen P. ; SVENSSON, Anders M. ; VALLELONGA, Paul ; VINTHER, Bo M. ; WALKER, Mike J. C. ; WHEATLEY, Joe J. ; WINSTRUP, Mai: A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy. In: *Quaternary Science Reviews* 106 (2014), dec, S. 14–28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.09.007>. – DOI 10.1016/j.quascirev.2014.09.007

- [Rein u. Sirocko 2002] REIN, Bert ; SIROCKO, Frank: In-situ reflectance spectroscopy - analysing techniques for high-resolution pigment logging in sediment cores. In: *International Journal of Earth Sciences* 91 (2002), oct, Nr. 5, S. 950–954. <http://dx.doi.org/10.1007/s00531-002-0264-0>. – DOI 10.1007/s00531-002-0264-0
- [Riede 2016] RIEDE, Felix: Changes in mid- and far-field human landscape use following the Laacher See eruption (c. 13,000 BP). In: *QUATERNARY INTERNATIONAL* 394 (2016), FEB 11, S. 37–50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2014.07.008>. – DOI 10.1016/j.quaint.2014.07.008. – ISSN 1040-6182
- [Riede u. Bazely 2009] RIEDE, Felix ; BAZELY, Oliver: Testing the ‘Laacher See hypothesis’: a health hazard perspective. In: *JOURNAL OF ARCHAEOLOGICAL SCIENCE* 36 (2009), MAR, Nr. 3, S. 675–683. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2008.10.013>. – DOI 10.1016/j.jas.2008.10.013. – ISSN 0305-4403
- [Riede et al. 2011] RIEDE, Felix ; BAZELY, Oliver ; NEWTON, Anthony J. ; LANE, Christine S.: A Laacher See-eruption supplement to Tephabase: Investigating distal tephra fallout dynamics. In: *Quaternary International* 246 (2011), dec, Nr. 1-2, S. 134–144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2011.06.029>. – DOI 10.1016/j.quaint.2011.06.029
- [Riede et al. 2018] RIEDE, Felix ; SAUER, Florian ; HOGGARD, Christian: Rockshelters and the impact of the Laacher See eruption on Late Pleistocene foragers. In: *ANTIQUITY* 92 (2018), OCT, Nr. 365. <http://dx.doi.org/10.15184/aqy.2018.217>. – DOI 10.15184/aqy.2018.217. – ISSN 0003-598X
- [Ruth et al. 2007] RUTH, Urs ; BIGLER, Matthias ; RÖTHLISBERGER, Regine ; SIGGAARD-ANDERSEN, Marie-Louise ; KIPFSTUHL, Sepp ; GOTO-AZUMA, Kumiko ; HANSSON, Margareta E. ; JOHNSEN, Sigfus J. ; LU, Huayu ; STEFFENSEN, Jørgen P.: Ice core evidence for a very tight link between North Atlantic and east Asian glacial climate. In: *Geophysical Research Letters* 34 (2007), feb, Nr. 3. <http://dx.doi.org/10.1029/2006gl027876>. – DOI 10.1029/2006gl027876
- [Sakoe u. Chiba 1978] SAKOE, H. ; CHIBA, S.: Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition. In: *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 26 (1978), feb, Nr. 1, S. 43–49. <http://dx.doi.org/10.1109/tassp.1978.1163055>. – DOI 10.1109/tassp.1978.1163055
- [Savitzky u. Golay 1964] SAVITZKY, Abraham. ; GOLAY, M. J. E.: Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. In:

- Analytical Chemistry* 36 (1964), jul, Nr. 8, S. 1627–1639. <http://dx.doi.org/10.1021/ac60214a047>. – DOI 10.1021/ac60214a047
- [Schmincke 2006] SCHMINCKE, Hans-Ulrich: Environmental impacts of the Lateglacial eruption of the Laacher see volcano, 12.900 cal BP. In: *150 years of Neanderthal Discoveries* (2006), 01, S. 149–153
- [Schmincke 2014] SCHMINCKE, Hans-Ulrich: *Vulkane der Eifel: Aufbau, Entstehung und heutige Bedeutung*. 2. Springer Spektrum, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8274-2985-8>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8274-2985-8>. – ISBN 978-3-8274-2984-1, 978-3-8274-2985-8
- [Schmincke et al. 1999] SCHMINCKE, Hans-Ulrich ; PARK, Cornelia ; HARMS, Eduard: Evolution and environmental impacts of the eruption of Laacher See Volcano (Germany) 12,900 a BP. In: *Quaternary International* 61 (1999), nov, Nr. 1, S. 61–72. [http://dx.doi.org/10.1016/S1040-6182\(99\)00017-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1040-6182(99)00017-8). – DOI 10.1016/S1040-6182(99)00017-8
- [Seelos et al. 2009] SEELOS, Klemens ; SIROCKO, Frank ; DIETRICH, Stephan: A continuous high-resolution dust record for the reconstruction of wind systems in central Europe (Eifel, Western Germany) over the past 133 ka. In: *Geophysical Research Letters* 36 (2009), oct, Nr. 20. <http://dx.doi.org/10.1029/2009gl039716>. – DOI 10.1029/2009gl039716
- [Shlens 2014] SHLENS, Jonathon: A Tutorial on Principal Component Analysis. In: *Google Research* (2014), April. <https://arxiv.org/abs/1404.1100>
- [Sirocko 2016] SIROCKO, Frank: The ELSA - Stacks (Eifel-Laminated-Sediment-Archive): An introduction. In: *Global and Planetary Change* 142 (2016), jul, S. 96–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.03.011>. – DOI 10.1016/j.gloplacha.2016.03.011
- [Sirocko et al. 2020] SIROCKO, Frank ; ALBERT, Johannes ; BÖHL, Daniel ; BURGER, Joachim ; BRITZIUS, Sarah ; DEUTSCH, Robert ; DIEHL, Daniel ; DIENSBURG, Benedikt ; DOSSETO, Anthony ; DREHER, Frank ; FÖRSTER, Michael ; FRIEDRICH, Ronny ; FUHRMANN, Florian ; HAMANN, Yvonne ; HAMBACH, Ulrich ; LÖHR, Hartwig ; MACK, Alexander ; MARTINEZ-GARCIA, Alfredo ; MUDELSEE, Manfred ; MÜNSTER, Tatjana ; ROTHACKER, Leo ; SCHNEIDER, Ralph ; SCHWIBUS, Klaus ; TERBERGER, Thomas ; ZEMLITSKAYA, Anastasia ; HAUG, Gerald: *Climate-driven mammal and early human evolution in central Europe over the past 60000 years*. 2020. – In Prep.
- [Smith 2002] SMITH, Lindsay I.: A tutorial on principal components analysis / University of Otago. Version: 2002. <https://ourarchive.otago>.

- ac.nz/bitstream/handle/10523/7534/OUCS-2002-12.pdf. 2002 (0). – Forschungsbericht. – -
- [Spötl u. Mangini 2002] SPÖTL, Christoph ; MANGINI, Augusto: Stalagmite from the Austrian Alps reveals Dansgaard–Oeschger events during isotope stage 3. In: *Earth and Planetary Science Letters* 203 (2002), oct, Nr. 1, S. 507–518. [http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00837-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00837-3). – DOI 10.1016/S0012-821X(02)00837-3
- [Tavenard et al. 2017] TAVENARD, Romain ; FAOUZI, Johann ; VANDEWIELE, Gilles: *tslearn: A machine learning toolkit dedicated to time-series data*. 2017. – <https://github.com/rtavenar/tslearn>
- [Theuerkauf et al. 2014] THEUERKAUF, Martin ; BOS, Johanna A. A. ; JAHNS, Susanne ; JANKE, Wolfgang ; KUPARINEN, Anna ; STEBICH, Martina ; JOOSTEN, Hans: Corylus expansion and persistent openness in the early Holocene vegetation of northern central Europe. In: *Quaternary Science Reviews* 90 (2014), apr, S. 183–198. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.03.002>. – DOI 10.1016/j.quascirev.2014.03.002
- [Thomson 1949] THOMSON, W.E.: Delay networks having maximally flat frequency characteristics. In: *Proceedings of the IEE - Part III: Radio and Communication Engineering* 96 (1949), nov, Nr. 44, S. 487–490. <http://dx.doi.org/10.1049/pi-3.1949.0101>. – DOI 10.1049/pi-3.1949.0101
- [Weber et al. 2018] WEBER, Michael ; SCHOLZ, Denis ; SCHRÖDER-RITZRAU, Andrea ; DEININGER, Michael ; SPÖTL, Christoph ; LUGLI, Federico ; MERTZ-KRAUS, Regina ; JOCHUM, Klaus P. ; FOHLMEISTER, Jens ; STUMPF, Cintia F. ; RIECHELMANN, Dana F.: Evidence of warm and humid interstadials in central Europe during early MIS 3 revealed by a multi-proxy speleothem record. In: *Quaternary Science Reviews* 200 (2018), nov, S. 276–286. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.09.045>. – DOI 10.1016/j.quascirev.2018.09.045
- [Wulf et al. 2013] WULF, Sabine ; OTT, Florian ; SŁOWIŃSKI, Michał ; NORYSKIEWICZ, Agnieszka M. ; DRÄGER, Nadine ; MARTIN-PUERTAS, Celia ; CZYMZYK, Markus ; NEUGEBAUER, Ina ; DULSKI, Peter ; BOURNE, Anna J. ; BŁASZKIEWICZ, Mirosław ; BRAUER, Achim: Tracing the Laacher See Tephra in the varved sediment record of the Trzechowskie palaeolake in central Northern Poland. In: *Quaternary Science Reviews* 76 (2013), sep, S. 129–139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.07.010>. – DOI 10.1016/j.quascirev.2013.07.010. – ISSN 0277-3791
- [Zumbahlen 2007] ZUMBAHLEN, Hank: *Basic Linear Design (Analog Devices)*. Analog Devices, Inc., 2007 <https://www.analog.com/en/education/education-library/linear-circuit-design-handbook.html>. – ISBN 0-916550-28-1

Kapitel 9

Appendix

9.1 Tabellen

AU4 Lücke		AU3 Füllung	
14,676	14,683	14,127	16,643
14,766	14,772	14,169	14,869
14,878	14,886	14,167	14,217
14,891	14,899	14,218	14,316
15,063	15,069	14,165	15,024
15,209	15,216	14,364	15,031
15,453	15,459	15,064	16,631
15,646	15,652	14,081	15,825
15,715	15,737	14,705	16,506
15,741	15,749	16,509	16,748
15,810	15,816	15,533	16,494
15,829	15,835	16,501	17,081
15,902	15,916	15,474	15,865
15,927	15,933	15,870	16,491
15,999	16,005	15,362	16,788
16,030	16,037	16,795	17,014
16,111	16,117	15,533	17,032
16,154	16,160	15,271	16,493
16,223	16,236	14,711	15,370
16,275	16,281	15,385	16,546
16,470	16,652	16,560	16,941
17,375	17,381	14,780	15,610
17,386	17,394	15,615	17,118
18,005	18,011	17,459	17,571
18,486	18,757	17,531	17,962
18,833	18,847	18,303	18,394
20,474	20,702	21,526	21,571

AU4 Lücke		AU3 Füllung	
21,930	21,937	19,580	19,839
22,374	22,380	20,356	22,760
23,498	23,552	20,765	21,484
25,498	25,512	24,897	25,113
29,486	29,521	28,666	28,732
30,493	30,522	29,101	30,363
31,483	31,523	30,793	30,913
32,481	32,522	31,265	32,725
33,482	33,511	33,672	33,902
34,479	34,511	34,568	34,707
36,481	36,634	35,896	37,806
37,365	37,390	37,965	38,136
37,448	37,461	37,834	37,936
38,488	38,511	38,601	38,619
39,495	39,511	39,645	39,679
40,490	40,579	40,312	41,515
41,491	41,746	41,330	43,909
41,806	41,821	42,539	43,092
42,016	42,125	41,566	41,742
42,426	42,445	41,865	44,100
42,574	42,583	41,253	43,098
44,487	44,561	44,570	44,614
45,484	45,849	45,200	46,482
46,412	46,681	45,022	50,942
47,196	47,207	49,490	49,857
50,078	50,087	49,630	53,663
50,489	50,512	53,776	53,781
52,494	52,512	52,740	53,221
54,477	54,512	54,751	54,827
55,365	55,372	55,736	56,202
55,476	55,515	56,278	56,401
57,468	57,522	57,755	57,812
57,577	57,583	57,874	60,359
59,362	59,391	59,232	59,511
59,450	59,459	59,548	61,024
61,388	61,400	60,568	61,234
61,493	61,541	59,656	60,889
61,949	61,978	58,254	60,882
63,440	63,449	63,773	63,797
63,513	63,621	63,825	64,378
64,186	64,239	63,437	64,081
64,245	64,256	64,087	64,289
64,480	64,542	64,382	64,819

AU4 Lücke		AU3 Füllung	
65,479	65,522	65,223	65,405
66,430	66,439	66,356	66,394
66,593	66,606	66,043	66,625
67,490	67,512	67,350	68,176
68,471	68,512	68,378	68,733
69,455	69,472	69,580	69,610
69,494	69,532	69,675	69,753
70,412	70,422	70,550	70,571
70,488	70,545	70,590	70,796
70,888	70,895	70,861	71,086
72,557	72,567	72,400	72,403
72,837	72,845	72,965	73,800
73,348	73,357	73,643	74,836
73,483	73,507	74,695	74,748
74,494	74,512	75,147	75,473
75,959	75,982	76,266	76,775
76,132	76,147	76,854	77,524
76,352	76,362	76,835	77,612
76,748	76,754	76,881	76,932
77,482	77,512	76,382	76,692
78,195	78,227	79,165	80,932
78,469	78,512	81,152	81,396
78,875	78,894	80,489	81,077
80,479	80,512	79,504	81,274
81,751	81,772	82,078	82,143
81,956	81,987	82,183	82,256
82,446	82,515	82,624	83,751
82,520	82,527	83,755	83,883
83,544	83,557	82,451	82,505
83,842	83,859	82,606	82,747
83,975	83,984	82,802	84,466
84,434	84,447	84,687	85,206
85,061	85,084	85,240	85,421
85,476	85,512	85,827	85,844
85,601	85,609	86,068	86,136
86,306	86,317	86,403	86,470
86,489	86,512	86,660	87,174
87,494	87,519	87,628	87,856
87,558	87,576	87,375	87,709
87,776	87,783	88,019	88,284
88,192	88,212	88,388	89,884
88,363	88,386	88,473	88,486
88,444	88,472	88,509	89,865

AU4 Lücke		AU3 Füllung	
89,339	89,446	88,476	88,842
89,483	89,612	88,859	90,277
90,488	90,512	90,791	91,746
90,587	90,596	90,900	91,747
91,184	91,196	91,407	91,413
91,488	91,587	91,582	91,761
92,659	92,677	92,108	92,853
93,540	93,553	93,595	93,690
93,625	93,638	93,734	93,800
93,757	93,766	93,874	93,881
94,025	94,034	94,059	94,152
94,438	94,445	94,509	94,564
94,478	94,512	94,585	94,601
95,088	95,101	95,225	95,437
95,482	95,772	95,897	96,302
95,915	95,999	96,353	96,412
96,014	96,026	96,421	96,682
96,170	96,198	95,914	96,913
96,278	96,512	95,348	96,733
97,448	97,652	97,661	97,857
99,576	99,594	99,200	99,779
100,474	100,502	100,69	100,717
101,239	101,282	101,343	101,407

Tabelle 9.1: Tabelle der gefüllten Lücken aus AU4 mit den zugeordneten Abschnitten aus AU3

9.2 **ELSAinteractive++** Bedienungsanleitung

*ELSA*interactive++ Bedienungsanleitung

Version 20191001

Stand 01.10.2019

Benedikt Diensberg

Inhalt

1	Installation	3
2	Dateiformate	3
2.1	.xls & .xlsx:.....	3
2.1.1	AgerType.....	4
2.1.2	DefaultType.....	5
2.1.3	DateTimeType.....	6
2.2	CSV:.....	6
3	Laden von Daten.....	6
3.1	Laden von Daten aus .xls und .xlsx Dateien.....	6
3.2	Laden von .elsa-Projekten	8
3.3	Import & Konvertierung von Daten aus CSV-Dateien.....	8
3.4	Entfernen von Datensätzen	12
4	Erstellen und verändern von Plots	12
4.1	Plotten von Daten	12
4.2	Entfernen von Plots.....	12
4.3	Funktionen im Fenster Tools	13
4.3.1	Titles.....	13
4.3.2	Axes	14
4.3.3	Format.....	14
4.3.4	Curves.....	16
4.3.5	Math	17
4.3.6	Marker	22
4.4	Darstellung gegen Alter statt Tiefe	23
4.5	Dezimaltrennzeichen	24
4.6	Hilfslinien	24
5	Speichern & Exportieren.....	24
5.1	Projekt speichern	25

5.2	Automatisches speichern	25
5.3	Exportieren als Bild	25
5.4	Exportieren von Plotdaten	26
5.5	Drucken.....	26
6	View	26
7	Konfigurationsdateien	27
7.1	default.config	27
7.2	fileTypes.config	27
7.3	csv-presets.xml.....	27
8	Erweiterungsscripte.....	28
8.1	Aufbau der „script_info.xml“:.....	29
9	Script Output-File.....	30
10	FAQ.....	31

1 Installation

Zur Nutzung von R- und Python-Skripten müssen zuvor R und Python, sowie die benötigten Zusatzbibliotheken installiert werden.

Durch Doppelklick auf „R-3.6.1-win.exe“ und „python-3.8.0-amd64.exe“ startet die jeweilige Installation. Darauf achten an der entsprechenden Stelle die Optionen „für alle Nutzer installieren“ und „Add ... to Path“ zu wählen.

Nach erfolgreicher Installation können über die „pythonLibInstall.bat“ automatisch die benötigten Python-Bibliotheken heruntergeladen und installiert werden.

Abschließend den Ordner „*ELSAinteractive++*“ an die gewünschte Stelle kopieren und das Programm über einen Doppelklick auf die darin enthaltene „*ELSAinteractive++.exe*“ starten.

2 Dateiformate

ELSAinteractive++ kann Daten aus .xls, .xlsx und aus CSV-Dateien laden.

Hierzu benötigen die Dateien jeweils eine bestimmte Formatierung:

2.1 .xls & .xlsx:

ELSAinteractive++ ist darauf ausgelegt Daten aus .xls oder .xlsx Dateien zu laden. Dabei unterscheidet sich das Verhalten zwischen drei Typen: *AgerType*, *DateTimeType* und *DefaultType*.

Daten werden in *ELSAinteractive++* nach Bohrkernen (*Cores*) gruppiert.

Alle Dateien benötigen zur Identifikation des Typs und zur Zuordnung zu einem Bohrkern die folgende Kopfzeile als erste Zeile:

Core Name	Type	Data Startindex
-----------	------	-----------------

- **Core Name:** Hier sollte der Bezeichner des Bohrkerns stehen. Nach diesem Namen werden die

unterschiedlichen Dateien gruppiert angezeigt. Es muss sich hierbei nicht notwendigerweise um einen realen Bohrkern handeln, sondern kann auch eine beliebige Gruppenbezeichnung sein.

- **Type:** Hier muss der Identifikator für den Typ stehen. Die Identifikatoren können in der Datei `fileTypes.config` eingesehen und geändert werden (siehe 7.2). Nicht erkannte Identifikatoren werden als `DefaultType` interpretiert.
- **Data Startindex:** Hier muss der numerische Index der Zelle eingetragen werden, in der die Überschrift der ersten Datenspalte beginnt, um Daten von Header unterscheiden zu können. Der Index muss „;“-Separiert sein. (Beginnen die Daten beispielsweise in Zelle **A10** mit „Depth“, so muss hier **10;1** stehen.)

Unter dieser Zeile können optionale Zusatzinformationen eingetragen werden. Es wird von `ELSAinteractive++` nur die erste Spalte ausgelesen.

Die ersten drei Zeilen werden intern als Location, Author und Publication bezeichnet. Dies hat jedoch keine weiteren Auswirkungen.

Hierunter folgen die Spalten mit den eigentlichen Daten. Diese unterscheiden sich je nach Typ:

2.1.1 AgerType

Als Ager werden Dateien bezeichnet, die zur Zuordnung von Alterswerten zu entsprechenden Tiefenwerten dienen. Sie sind essenziell, um Bohrkerndaten aus einer Tiefendarstellung in eine Altersdarstellung umzurechnen (siehe 4.4).

Zusätzlich können hier Events definiert werden, welche bei der Altersumrechnung als gleichzeitig interpretiert werden sollen. (z.B. Bohrartefakte, Rutschungen,...)

Hierzu benötigt ein Ager die folgenden sieben Spalten:

CoreName	Ager	4;1			
			events		
depthUnit	ageUnit		depthUnit	depthUnit	
Depth	Age	Comment	Begin	End	EventComment
1	10		2	4	Rutschung

- **Depth:** In dieser Spalte müssen die entsprechenden Tiefenwerte stehen.
- **Age:** In dieser Spalte müssen die korrespondierenden Alterswerte stehen.

Die Bezeichnungen **Depth** und **Age** sind beliebig, die Einheiten müssen in der Zeile darüber stehen.

- **Comment:** In dieser Spalte können optionale Kommentare eingetragen werden. Diese können im Plot des Ager mit angezeigt werden.
- **Leerspalte:** Die Leerspalte muss eingehalten werden!
- **Events:** In diesen drei Spalten können Events nach ihrer Tiefe eingetragen werden. Mit Beginn, Ende und optionalem Kommentar (nicht angezeigt).

Achtung: Es kann pro **Core** nur ein **Ager** geladen werden!

2.1.2 DefaultType

Dies ist der Standardtyp für die Speicherung von Daten gegen eine gemeinsame Tiefe.

Die erste Datenspalte muss die gemeinsame Tiefeninformation sein, darauf können beliebig viele Spalten mit Daten folgen. Jede Spalte sollte eine Bezeichnung haben. Auch hier müssen die Einheiten, falls vorhanden, in der Zeile darüber stehen.

CoreName	Data	4;1
depthUnit	Unit1	

Depth	Data1	Data2
1	0.75	2.4

Hinweis:

Bei den Daten in der ersten Spalte muss es sich nicht notwendigerweise um eine Tiefeninformation handeln. Es muss lediglich eine gemeinsame Information sein gegen die die anderen Datenspalten gemessen wurden (z.B. Probennummer, Indizes,...)

Gleiches gilt für den **AgerType**, der lediglich zur Umrechnung der Informationen seiner ersten Spalte in die seiner zweiten dient. (z.B. Probennummer zu Alter)

2.1.3 DateTimeType

Mit **DateTimeType** werden Daten bezeichnet, die gegen einen Datumszeitwert aufgetragen werden, statt gegen einen Tiefenwert. Die Formatierung der Dateien ist fast analog zum **DefaultType**. Nur wird in der ersten Spalte statt Tiefenwerten hier eine Spalte mit Datumszeitwerten erwartet. Diese Spalte muss als Datum formatiert sein.

2.2 CSV:

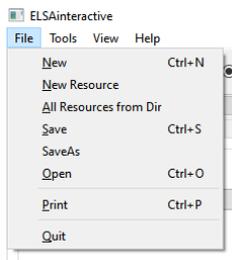
Damit **CSV**-Dateien in *ELSAinteractive++* importiert werden können, müssen die Daten in Spalten Vorliegen und es muss eine gemeinsame Bezugsspalte (Tiefe oder Alter) für alle Daten geben. Eine Ausnahme bilden Daten im **DateTimeType**, hier kann die Bezugsspalte in eine Datums- und eine Uhrzeitspalte aufgeteilt sein (siehe 3.3).

3 Laden von Daten

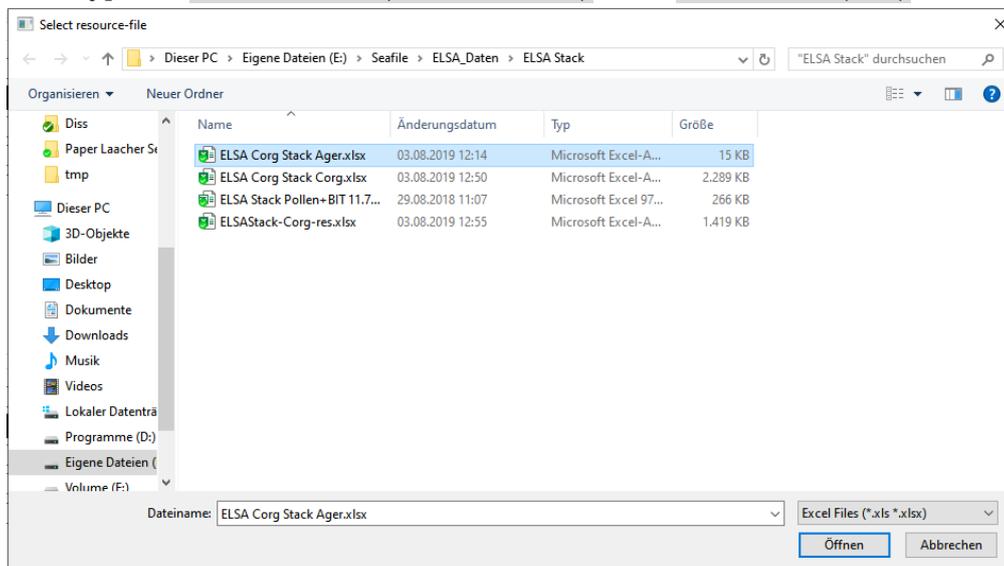
3.1 Laden von Daten aus .xls und .xlsx Dateien

Die Dateien müssen formatiert sein wie in 2.1 beschrieben.

Durch einen Klick auf das  Symbol in der Taskbar oder über das Menü **File** → **New Resource** öffnet sich ein Dateiauswahldialog. Hiermit wählt man die Gewünschte Datei an und klickt auf **Öffnen**.



Sollte man die gewünschte Datei nicht finden, muss überprüft werden, ob der Dateityp auf **Excel Files (*.xls *.xlsx)** oder **All Files (*.*)** steht.



Wenn die Datei zu einem **Core** gehört, zu dem es noch keinen weiteren Datensatz gibt, erscheint ein Hinweis, der mit **OK** bestätigt werden kann.

Sollte der Hinweis erscheinen, obwohl der geladene Datensatz zu einem bereits existenten Core gehört, liegt dies daran, dass der Eintrag in Zelle 1;1 nicht mit dem der bereits geladenen Datensätze übereinstimmt. (Auch auf Leerzeichen achten!)

Über **File** → **All Resources from Dir** können auch alle Excel-Dateien auf einem Ordner und seinen Unterordnern auf einmal geladen werden.

Nun sollten die Daten im Fenster **cores** unter ihrem jeweiligen **core** erscheinen. Durch Klick auf den Pfeil vor einem **Core** lässt sich die Liste seiner Datensätze ausklappen. Ebenso können die einzelnen Datenreihen eines Datensatzes aufgelistet werden.

Über den Button **Toggle Sort** im Fenster **cores** kann die alphabetische Sortierung der Cores und der Datensätze an- und ausgeschaltet werden.

3.2 Laden von **.elsa**-Projekten

Über einen Klick auf das  Symbol, über **File** → **Open** oder das Tastenkürzel **Strg + O** öffnet sich ein Dateiauswahldialog. Hierin navigiert man zur gewünschten Datei und klickt auf Öffnen.

ELSAinteractive++ versucht nun sicherzustellen, dass zum Speicherzeitpunkt geladenen Datensätze wieder vorhanden sind. **ELSAinteractive++** identifiziert die Datensätze anhand eines Schlüssels aus Dateinamen und Kernnamen.

Zuerst werden die aktuell geladenen Datensätze mit den angeforderten verglichen. Sollte ein Datensatz noch nicht geladen sein, wird versucht ihn von seinen alten Speicherort zu laden. Wird der Datensatz auch dort nicht gefunden, so erscheint eine Warnmeldung. Durch Klick auf **yes** öffnet sich ein Dateiauswahldialog, mit dem man den Pfad zur fehlenden Datei manuell angeben kann.

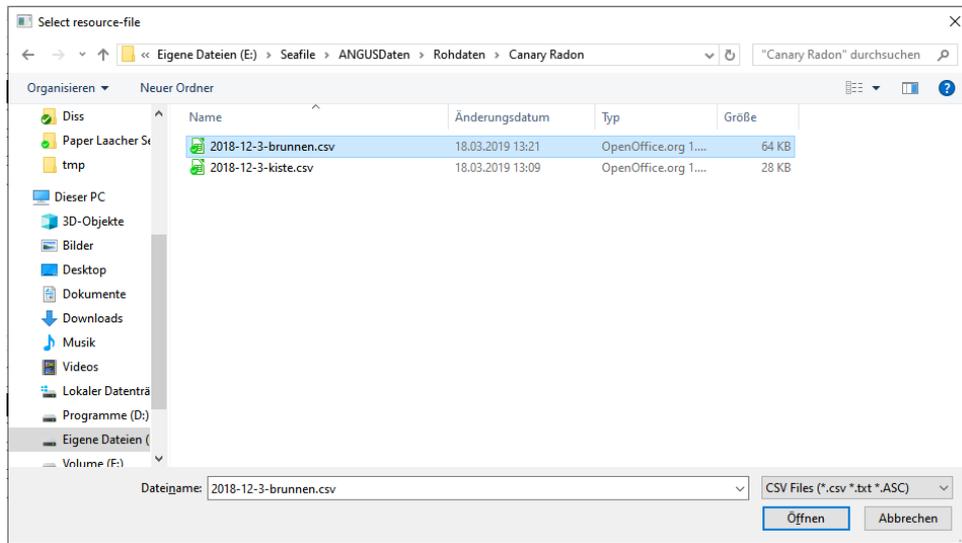
Wird stattdessen **no** gewählt wird die fehlende Datei ignoriert und versucht das Projekt trotzdem zu laden. Dies kann zu unvorhergesehenem Verhalten der Plots führen, wenn jene Teile dieses Datensatzes enthalten.

Nachdem alle Datensätze geladen wurden, werden die Plots wiederhergestellt. Sollten zum Zeitpunkt des Ladens bereits Plots vorhanden sein, werden die neu geladenen rechts daneben angefügt.

3.3 Import & Konvertierung von Daten aus CSV-Dateien

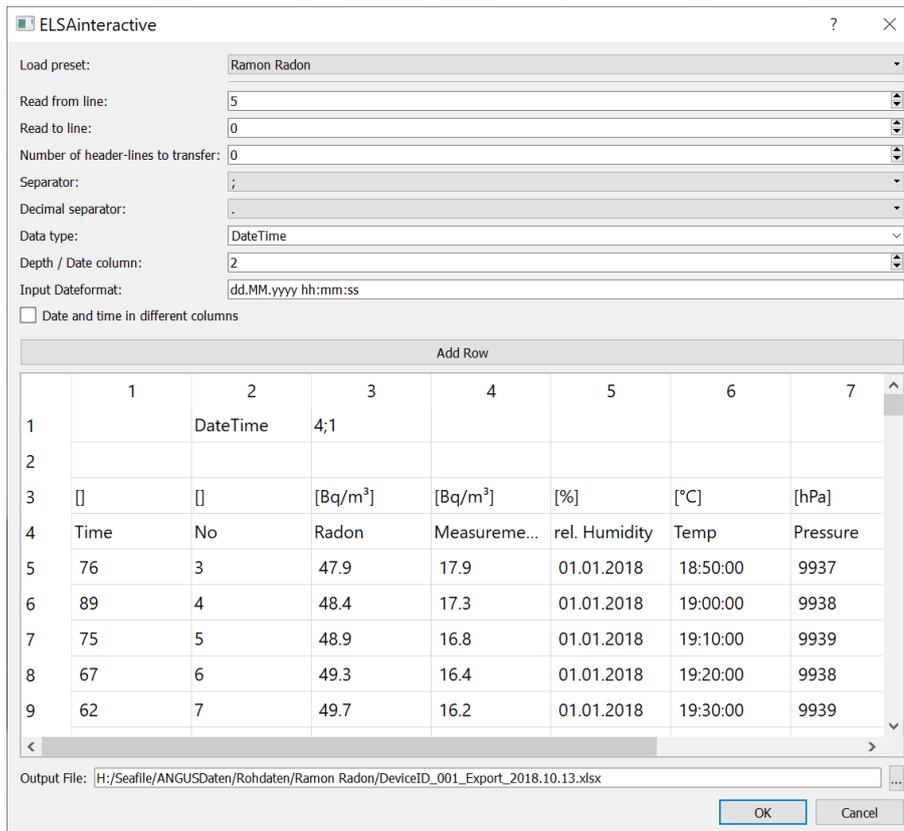
ELSAinteractive++ öffnet CSV – Dateien nicht direkt, sondern konvertiert sie automatisch in eine **.xls** oder **.xlsx**-Datei.

Analog zum Öffnen von **.xls** / **.xlsx** Dateien startet man durch einen Klick auf das  Symbol in der Taskbar oder über das Menü **File** → **New Resource** den Dateiauswahldialog. Nach Auswahl der gewünschten Datei muss **Öffnen** geklickt werden..



Der Dateityp muss hierbei auf **CSV Files (*.csv *.txt *.ASC)** oder **All Files (*.*)** stehen.

Nun öffnet sich ein weiterer Dialog mit Konvertierungsoptionen.



Im unteren Teil des Dialogs wird eine Vorschau der Ausgabedatei in Form einer Tabelle angezeigt. Durch die Angaben in den Feldern darüber muss die Tabelle so angepasst werden, dass sie der benötigten Formatierung von `.xls` und `.xlsx` – Dateien entspricht (siehe 2.1).

Über einen Klick auf eine Zelle können die Einträge der Tabelle auch direkt verändert werden.

Die einzelnen Optionen sind:

- **Load preset:** Hier können Voreinstellungen ausgewählt werden, durch die die folgenden Einträge automatisch ausgefüllt werden. Die Voreinstellungen müssen zuvor in der Datei `csv-presets.xml` definiert werden (siehe 7.3).
- **Read from line:** Anzahl der Zeilen, die am Anfang der Datei übersprungen werden
- **Read to line:** Anzahl der Zeilen, die am Ende der Datei übersprungen werden
- **Num. of Headers...:** Anzahl der zu übernehmenden Kopfzeilen aus der Datei
- **Separator:** Spaltentrennzeichen
- **DecimalSeparator:** Dezimaltrennzeichen
- **Datatype:** Datentyp, siehe 2.1. Vorauswahl aus Vordefinierten Typen in der Datei `fileTypes.config` (siehe 7.2) oder eigener Eintrag.
- **Depth / Date Column:** Spalte mit Tiefen- oder Datumsinformation (bei `DateTimeType`)
- **Input Dateformat:** Nur bei `DateTimeType`, Datumsformat
 - o `yy` Jahr als zweistellige Zahl – ACHTUNG alle als 19yy !
 - o `yyyy` Jahr als vierstellige Zahl.
 - o `M` Monat als Ziffern ohne führende Null

- **MM** Monat als Zweistellige Ziffern mit führender Null
 - **MMM** Monat als abgekürzter Name (Jan.)
 - **MMMM** Monat als ausgeschriebener Name
 - **d** Tag als Zahl ohne führende Null
 - **dd** Tag als zweistellige Zahl mit führender Null
 - **h** Stunde als Zahl ohne führende Null
 - **hh** Stunde als zweistellige Zahl mit führender 0
 - **m** Minuten als Zahl ohne führende Null
 - **mm** Minuten als zweistellige Zahl mit führender Null
 - **s** Sekunden als Zahl ohne führende Null
 - **ss** Sekunden als zweistellige Zahl mit führender Null
 - **z** Sekundenbruchteil bis Millisekunden
 - **zzz** Sekundenbruchteil dreistellig, ggf. mit Nullen
 - **AP** oder **A** Platzhalter für AM / PM
 - **t** Zeitzone
- **Column with time:** Nur bei `DateTimeType`, Separate Zeitspalte, sollte die Uhrzeitangabe in einer eigenen Spalte stehen. **-1** bedeutet keine. Erscheint nur nach Aktivierung der Checkbox **Date and time in different columns**.
 - **Add Row** Fügt eine weitere Zeile zwischen Header und Spaltentitel ein.
 - **Output File:** Speicherpfad der Ausgabedatei nach der Konvertierung. Standard ist der gleiche Pfad und Dateiname wie die Eingabedatei nur als **.xlsx**. Über den Button **...** kann ein Dateiauswahldialog geöffnet werden.

Mit Klick auf **OK** wird die Konvertierung gestartet und die neu erzeugte Datei in **ELSAinteractive++** geladen.

3.4 Entfernen von Datensätzen

Zum Entfernen eines geladenen Datensatzes aus *ELSAinteractive++*, muss dieser im Fenster **cores** angeklickt werden. Nach einem Klick auf den Button **delete Resource** und Bestätigung des aufkommenden Dialogs mit **yes** wird der Datensatz aus *ELSAinteractive++* entfernt.

Sollte ein Plot Daten aus diesem Datensatz enthalten, so erscheint eine Fehlermeldung. In dem Fall muss der Plot zuvor manuell gelöscht werden (siehe 4.2).

Wird ein **core** angewählt, so werden alle zugehörigen Datensätze auf einmal entfernt.

4 Erstellen und verändern von Plots

4.1 Plotten von Daten

Durch einen Doppelklick auf einen Datensatz im Fenster **cores** wird der entsprechende Datensatz im Fenster **scene** geplottet. Zusätzlich wird ein Eintrag mit dem Titel des Plots im Fenster **plots** angelegt.

Durch Auswahl dieses Eintrags kann der Plot mit den Funktionen im Fenster **Tools** weiterbearbeitet werden.

Über den Button **add as new plot** / **add to selected plot** im Fenster **cores** kann umgeschaltet werden, ob der Datensatz als neuer, eigenständiger Plot erzeugt werden soll, oder als weitere Kurve zum aktuell ausgewählten Plot hinzugefügt.

4.2 Entfernen von Plots

Durch Klick auf den Button **delete Plot** im Fenster **plots** wird der aktuell ausgewählte Plot entfernt.

Alternativ können mit dem Button  oder über das Menü **Tools -> Clear Plots** alle Plots entfernt werden.

4.3 Funktionen im Fenster Tools

Durch Auswahl eines Plots im Fenster **plots** werden dessen Informationen in die Entsprechenden Einträge der Tabs im Fenster **Tools** geladen und können dort bearbeitet werden.

4.3.1 Titles

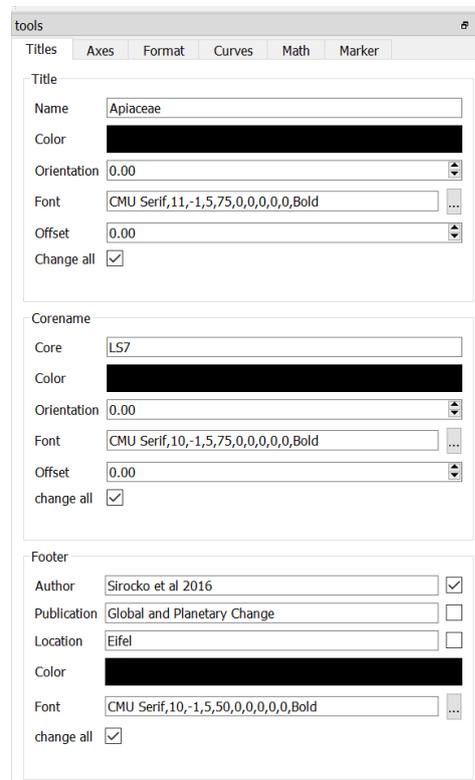
Hier können Titel, Kernname und angezeigte Footer eines Plots verändert werden. In die Textfelder (**Name**, **Core**, **Author**, ...) können HTML formatierte Texte eingetragen werden.

Es können zusätzlich Textfarbe, Textorientierung und der Font verändert werden.

Nach setzen des Hakens bei **Change all** werden die Änderungen von Farbe, Orientierung und Font für alle Plots übernommen, andernfalls nur für den ausgewählten.

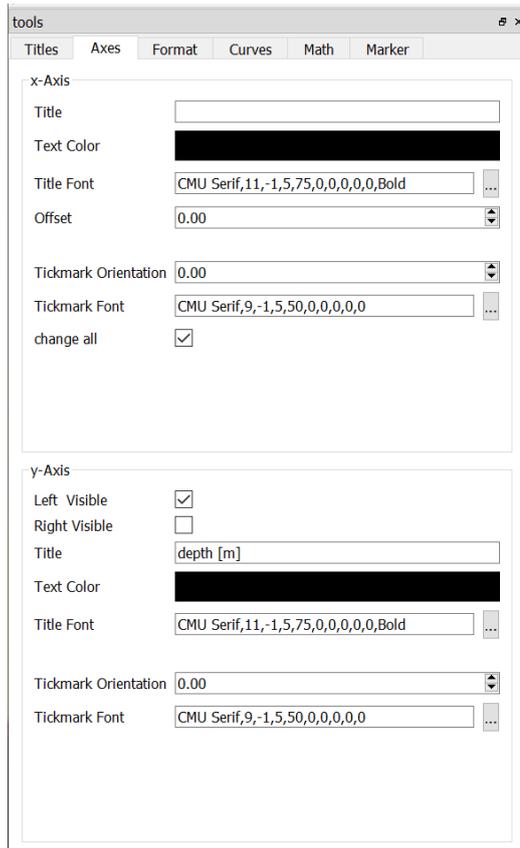
Über die Option **Offset** kann der Text in seiner Platzierung verschoben werden. Einträge kleiner θ verschieben den Text nach oben, größer θ nach unten.

Im Kasten **Footer** erscheinen als Textfelder die optionalen Einträge aus der ersten Spalte des Dateiheders, falls eingetragen (siehe 2.1). Die ersten drei Einträge werden automatisch mit **Author**, **Publication** und **Location** bezeichnet, jeder weitere mit Text. Dies hat jedoch keine weitere Auswirkung. Durch setzen der Checkbox hinter den Einträgen können diese der Fußzeile hinzugefügt oder entfernt werden.



4.3.2 Axes

Hier können die Achsbeschriftungen und Tickmarks verändert werden. Über die beiden Checkboxes im Kasten **y-Axis** können individuell für jeden Plot die linke und rechte y-Achse ein- und ausgeblendet werden.



4.3.3 Format

In diesem Tab können die Höhe und Breite des ausgewählten Plots verändert werden. Bei eingblendeter y-Achse wird die Breite der Achse auf die angezeigte Breite aufgeschlagen.

Setzen der Checkbox **Change all** übernimmt die Änderungen für alle Plots.

The image shows a software dialog box titled 'tools' with a close button. It has several tabs: 'Titles', 'Axes', 'Format', 'Curves', 'Math', and 'Marker'. The 'Axes' tab is selected. The dialog is divided into three sections:

- Dimensions:** Contains three input fields: 'Width' with the value '200', 'Height' with the value '700', and a checked checkbox labeled 'Change all'.
- x-Axis Ticks:** Contains four input fields: 'Min' with '0', 'Max' with '3.5', and 'Step' with '0'. Below these are two unchecked checkboxes: 'Log' and 'Change all'.
- y-Axis Ticks:** Contains four input fields: 'Min' with '0.02', 'Max' with '3.8', and 'Step' with '0'. Below these are two checkboxes: 'Log' (unchecked) and 'ChangeAll' (checked).

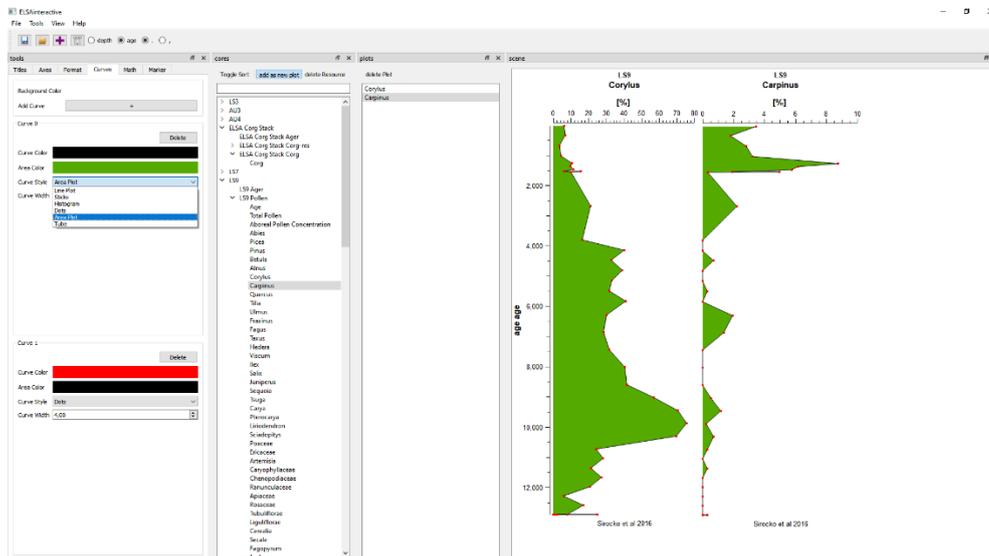
Außerdem können Minimum, Maximum und Schrittweite (**Step**) der Achsen verändert werden. Eine Schrittweite von 0 bedeutet, sie wird automatisch in Abhängigkeit von Minimum und Maximum gesetzt.

Standardmäßig wird für alle Plots eine gemeinsame y-Achse verwendet. Durch entfernen der Checkbox **Change all** im Kasten **y-Axis Ticks** kann jedoch für den ausgewählten Plot eine unabhängige y-Achse eingestellt werden.

Setzen der Checkbox **Log** skaliert die jeweilige Achse logarithmisch. Diese Einstellung wird nicht über **Change all** für andere übernommen.

4.3.4 Curves

Dieser Tab dient zur Verwaltung der einzelnen Kurven eines Plots.



Über den Button hinter **Background Color** kann die Hintergrundfarbe des Plots verändert werden. (Dieser Button ist ggf. schlecht sichtbar).

Der Button hinter **Add Curve** fügt eine weitere Kurve in den gewählten Plot ein. Diese Kurve basiert auf dem Datensatz aus dem der Plot ursprünglich erstellt wurde.

Jede Kurve kann über den Button **Delete** in ihrem Kasten gelöscht werden. Über **Curve Color** kann die Farbe der Kurve angepasst werden, über **Area Color** die Farbe unter der Kurve, falls eine ausgefüllte Kurvendarstellung gewählt wurde. Die Breite der Kurve kann mit **Curve Width** verändert werden.

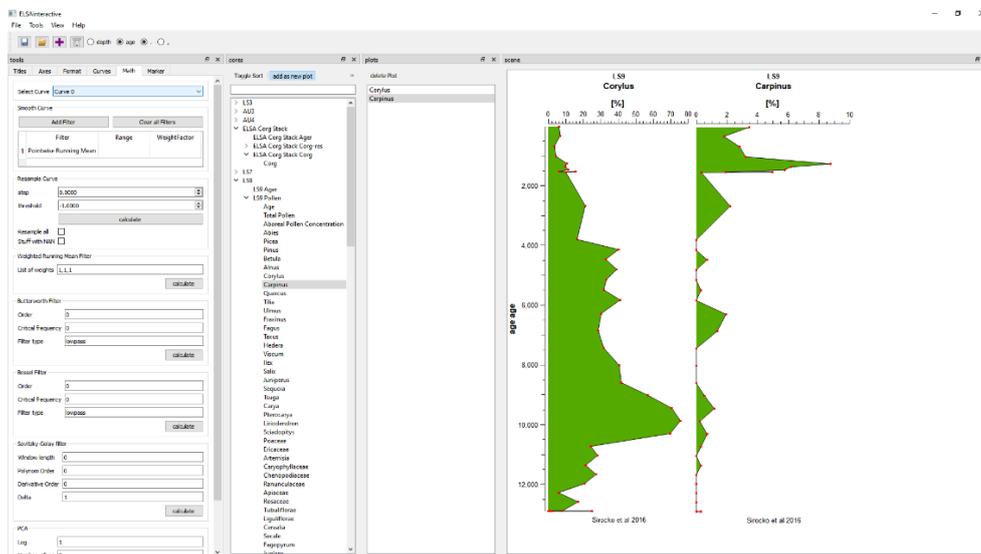
Über das Drop-Down Menü **Curve-Style** können verschiedene Kurvendarstellungen ausgewählt werden:

- **Line Plot**: Ein einfacher Linienplot.
- **Area Plot**: Linienplot mit ausgefüllter Fläche unterhalb der Kurve.
- **Dots**: Einzelne Datenpunkte ohne Verbindungslinie.
- **Histogram**: Daten als Histogramm.

- **Sticks:** An jedem Datenpunkt ein Strich mit der Länge des Datenwertes.
- **Tube:** Erzeugt einen Schlauch um Curve 0, dessen Breite in \pm x- Richtung dem Datenwert an der jeweiligen Stelle entspricht. Zur Darstellung von Fehlerbereichen.

4.3.5 Math

Dieser Tab stellt verschiedene mathematische Funktionen zur Bearbeitung der Kurven eines Plots bereit. Die zu bearbeitende Kurve wird im Drop-Down Menü **Select Curve** ausgewählt.



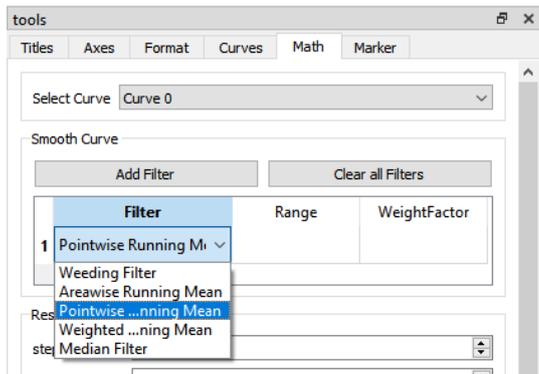
Im unteren Bereich wird für jedes selbstdefinierte Skript ein zusätzlicher Kasten angefügt (siehe 8).

Außerdem stehen Funktionen zum Glätten und Reinterpolieren der Kurven zur Verfügung:

4.3.5.1 Glättung & Filter

Im Kasten **Smooth Curve** können in der Tabelle mehrere verschiedene Filter für die aktuelle Kurve aktiviert werden. Die Filter werden dabei nacheinander von oben nach unten angewendet.

In der Spalte **Filter** können aus einem Drop-Down-Menü verschiedene Filter ausgewählt werden (s.u.), in der Spalte **Range** wird der Bereich b der Filter eingetragen.



Wurde ein gewichtetes Filter gewählt, so kann in der Spalte **WeightFactor** ein Faktor wf für die Berechnung der Gewichte eingetragen werden. Die einzelnen Gewichte w_i werden mittensymmetrisch berechnet als $w_i = 1 * wf^i$ und anschließend auf Summe 1 normiert.

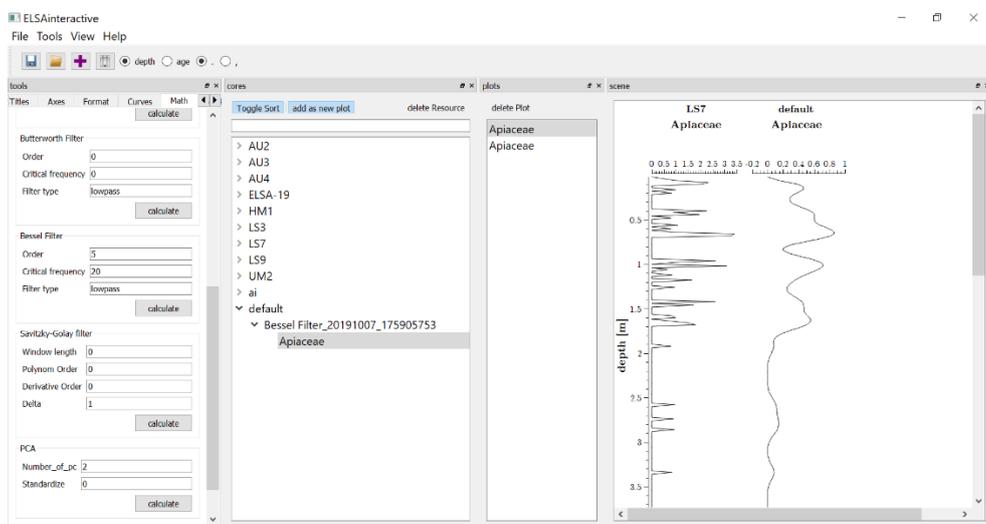
Es stehen die folgenden Filter zur Verfügung:

- **Weeding Filter:** Douglas & Peucker Algorithmus. Entfernt Punkte aus einer Kurve, sodass die neue Kurve nicht stärker abweicht als b . Entfernt kleine Peaks zuerst.
- **Pointwise Running Mean:** Punktweise gleitender Mittelwert, für jeden Punkt p wird der Mittelwert von b Punkten mit Zentrum p eingetragen. b wird immer auf die nächste ungerade Zahl aufgerundet. Reduziert die Varianz der Daten.
- **Weighted Running Mean:** Gewichteter gleitender Mittelwert. Wie **Pointwise Running Mean**, jedoch wird jeder Wert mit einem Gewichtungsfaktor multipliziert (s.o.).
- **Areawise Running Mean:** Intervallweiser gleitender Mittelwert. Für jeden Punkt p wird der Mittelwert über

alle Punkte eines Intervalls um p mit Breite b eingetragen. Anstatt einer festen Anzahl von Punkten beim Pointwise Running Mean. Besonders für Datenreihen mit variabler Datendichte.

- **Median Filter:** Gleitender Median. Für jeden Punkt p wird der Median von b Punkten mit Zentrum p eingetragen. b wird immer auf die nächste ungerade Zahl aufgerundet. Verringert einzelne Ausreißer.

Des Weiteren wurden mehrere Filter über Erweiterungsskripte (s. Kapitel 8) realisiert. Diese Filter sind als separate Kästen im **Math** – Tab aufgeführt und bieten andere Einstellmöglichkeiten. Im Gegensatz zu den Filtern aus **Smooth Curve** wirken sie sich nicht auf die dargestellte Kurve aus, sondern erzeugen einen neuen Datensatz unter dem Kern **default**. Diese Filter sind:



- **Savitzky-Golay Filter:** Für jeden Punkt p_i wird die Kurve innerhalb eines Fensters der Breite **Window length** mit einem Polynom vom Grad **Polynom Order** mittels eines Least-Squares-Fit angenähert und dadurch Koeffizienten für eine Glättung

bestimmt. Bei zunehmender Fensterbreite wird die Glättung stärker. Elemente, die deutlich schmaler sind, als die Fensterbreite bleiben jedoch schlechter erhalten und Elemente, die breiter sind, als die Fensterbreite werden weniger stark geglättet. Mit zunehmender Ordnung der Polynome wird die (gestörte) Eingangskurve besser angenähert und kleine Elemente besser erhalten, aber die Kurve wird weniger stark geglättet. Das Filter hat die Eigenschaft bei der Glättung die Höhe und Form von Signalpeaks gut zu erhalten.

- **Butterworth Filter:** Das Butterworth Filter ist ein Frequenzfilter und wurde so konstruiert, dass sein Frequenzgang im Durchlassbereich so flach wie maximal möglich ist. Dafür besitzt es eine geringere Flankensteilheit im Übergangsbereich als ein ideales Filter. Es gibt drei Parameter: **Order**, die Ordnung des Filters, bestimmt die Näherung an die Eingangskurve. Je höher desto stärker wird die Kurve angenähert, aber weniger stark geglättet. Über **Critical frequency** wird die Frequenz angegeben, oberhalb (unterhalb, bei ‚highpass‘) der Signale unterdrückt werden. Angegeben wird sie in $1/(y\text{-Achsen-Einheit})$. Unter Filtertype kann angegeben werden, ob ein Tiefpassfilter ‚lowpass‘ oder ein

Hochpassfilter ‚**highpass**‘ angewandt werden soll.

- **Bessel Filter:** Ähnlich zum Butterworth Filter mit den gleichen Parametern und Auswirkungen. Allerdings mit einem etwas flacheren Frequenzgang, d.h. die ausgefilterten Frequenzen werden an der kritischen Frequenz nicht so hart abgeschnitten.

4.3.5.2 Resample

Über den Kasten **Resample Curve** gibt es die Möglichkeit, die aktuelle Kurve linear zu reinterpolieren. Der erste Wert nach Interpolation ist der Wert zum obersten angezeigten y-Wert. Über **step** kann die Schrittweite der neuen Kurve vorgegeben werden.

Der Wert in **threshold** gibt einen maximalen Abstand zweier Punkte an, unter dem zwischen zwei Punkten linear interpoliert wird. Bei größerem Abstand werden bestehende Lücken nicht mit Werten aufgefüllt. Wenn die Checkbox **Stuff with NAN** aktiviert ist, werden stattdessen **NAN**-Werte eingetragen. Ein **threshold** von -1 deaktiviert die Option.

Ist die Checkbox **Resample all** gesetzt, werden alle Kurven eines Plots gleichermaßen resampelt.

Der Button **calculate** startet das resampling.

4.3.5.3 Wavelet Analyse

Im Kasten **Continuous Wavelet Transform** kann eine kontinuierliche Wavelet Analyse für den aktuell gewählten Plot berechnet werden.

Über **Min Scale**, **Max Scale** und **Steps**, können die minimale und maximale Periode, sowie die Auflösung angegeben werden, für die die Analyse berechnet werden soll.

Mit **Wavelet Name** kann das Wavelet angegeben werden, mit dem die Faltung durchgeführt wird. Möglich sind beispielsweise:

- Mexican hat Wavelet: '**mexh**'

- Morlet wavelet: 'mor1'
- Gauss Wavelets: 'gaus1'...'gaus7'
- komplexe Morlet Wavelets: 'cmorX-Y', wobei X die Frequenz-Bandbreite und Y die Zentral Frequenz sind (z.B. cmor3.5-1.5)

Für weitere Wavelets siehe:

<https://pywavelets.readthedocs.io/en/latest/ref/wavelets.html>

Der Button **calculate** startet die Berechnung und es öffnet sich ein separates Fenster mit der Visualisierung der Wavelet Analyse.

Über den Menüpunkt **Speichern** kann diese als Bild exportiert werden, andernfalls verfällt die Information mit schließen des Fensters.

4.3.5.4 Hauptkomponentenanalyse (PCA)

Die PCA ist eine Methode, um einen anderen Blick auf eine große Menge an korrelierten Variablen zu erhalten. In einem zweiten Schritt ermöglicht die PCA diese Menge an Variablen auf eine kleinere Menge unkorrelierter Variablen zu reduzieren, dabei jedoch so viel Information zu erhalten wie möglich. Die PCA benötigt mindestens zwei Datensätze.

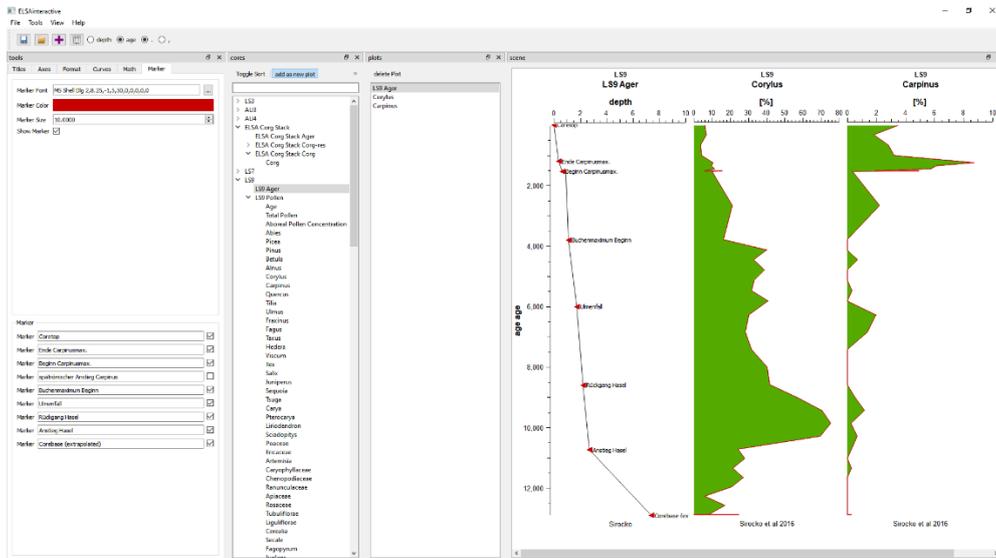
Über **Number_of_pc** kann eingestellt werden, wie viele Hauptkomponenten zurückgegeben werden sollen. Beim ersten Durchlauf empfiehlt es sich so viele PCs zu wählen wie Plots.

Ist „**standardize**“ 1, so werden die Daten vor der PCA standardisiert, bei 0 nicht. Die PCA ist sehr empfindlich gegenüber Skalierung, daher empfiehlt es sich die Daten immer vorher zu standardisieren.

Der Button **calculate** startet die Berechnung. Die Neuberechneten PCs werden im Kern **default** abgelegt und können von dort normal bearbeitet und visualisiert werden.

4.3.6 Marker

In diesem Tab werden die Plotmarker verwaltet. Jene gibt es nur bei Datensätzen des **AgerType**.



Jeder Marker entspricht einem Eintrag der Spalte **comment** (siehe 2.1.1).

Im oberen Teil des Tabs können Font, Farbe und Größe der Marker angepasst werden. Über die Checkbox **Show Marker** können alle Marker gleichzeitig ein- oder ausgeblendet werden.

Im unteren Bereich werden alle Marker des aktuellen Plots aufgelistet und ihr Text kann individuell angepasst werden. Über die Checkboxes hinter den Markern können diese einzeln ein- und ausgeblendet werden.

4.4 Darstellung gegen Alter statt Tiefe

Über die Radiobuttons depth age kann die Anzeige der dargestellten Plots von einer Darstellung gegen „Tiefe“ auf eine gegen „Alter“ umgeschaltet werden. Für eine Umrechnung ist ein Datensatz des **AgerType** im zugehörigen **Core** eines Plots notwendig. Wird keiner gefunden, so erscheint eine Warnmeldung und die Darstellung des Plots bleibt unverändert.

Bei der Umrechnung einer „Tiefe“ in ein „Alter“ wird der entsprechende Alterswert durch lineare Interpolation aus der Tiefen- und Altersspalte des **AgerType** bestimmt. (siehe 2.1.1)

Auch hier gilt: Bei „Tiefe“ und „Alter“ muss es sich nicht notwendigerweise um tatsächliche Tiefen- und Altersangaben handeln, sondern es können zwei beliebige, durch den **AgerType**-Datensatz korrelierte Angaben sein.

4.5 Dezimaltrennzeichen

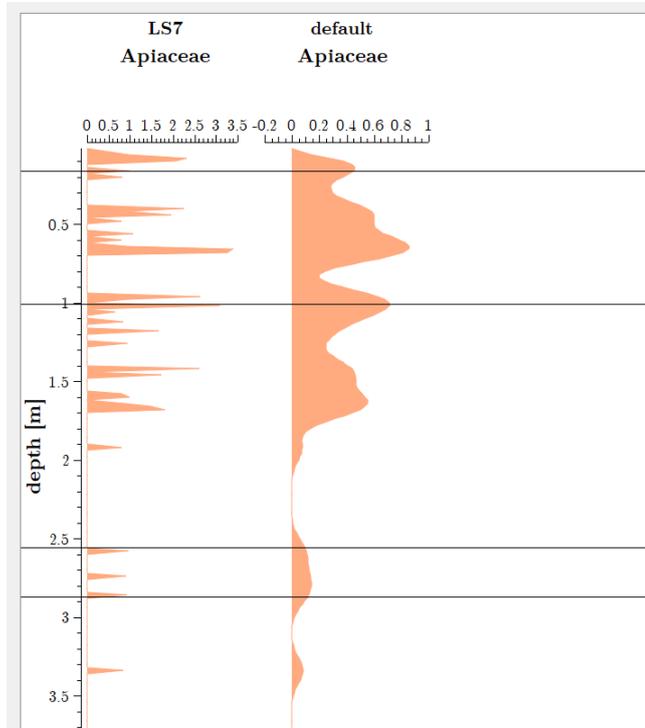
Über die Radiobuttons kann die Anzeige der Dezimaltrennzeichen in den Plotbeschriftungen zwischen Punkt und Komma umgeschaltet werden.

4.6 Hilfslinien

Durch einen Doppelklick in das Fenster **Scene** erscheint an der Stelle eine horizontale Hilfslinie.

Ein doppelter Rechtsklick in die Nähe einer Hilfslinie entfernt diese wieder.

Hilfslinien werden nicht gespeichert, exportiert oder gedruckt.



5 Speichern & Exportieren

In *ELSAinteractive++* gibt es neben der Möglichkeit, das aktuelle Projekt für die Weiterverwendung in *ELSAinteractive++* zu speichern, auch die, das Projekt als Bild oder Datensatz für die externe weiterbearbeitung zu exportieren.

5.1 Projekt speichern

Über einen Klick auf das Diskettensymbol  in der Menüleiste oder über das Menü **File** → **Save** kann das aktuelle Projekt als **.elsa** Datei gespeichert und später wieder geladen werden (siehe 3.2).

Hierbei werden alle dargestellten Plots zusammen mit ihren Formattierungen usw. gespeichert, sowie die Verknüpfungen zu allen geladenen Ressourcen.

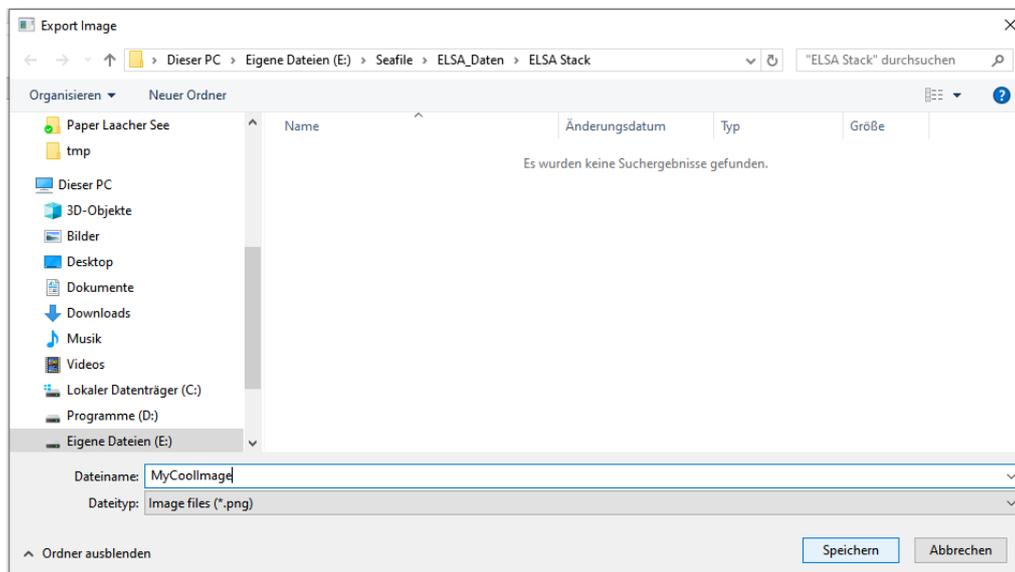
Die Daten der **Ressourcen** werden *nicht* gespeichert. Zur Weitergabe eines Projektes müssen also immer auch die entsprechenden **.xls / .xlsx** -Dateien mitgegeben werden!

5.2 Automatisches speichern

ELSAinteractive++ speichert alle fünf Minuten das aktuelle Projekt automatisch in die Datei **autosafe.elsa** im Programmverzeichnis. Nach einem unerwarteten beenden des Programms kann durch laden dieser Datei der letzte Stand wiederhergestellt werden. (siehe 3.2)

5.3 Exportieren als Bild

Über das Menü **Tools** → **Export image** können die aktuellen Plots als Bild exportiert werden.



Es öffnet sich ein Dateiauswahldialog, mit welchem Speicherort und Dateiname gewählt werden können. Über die Schaltfläche hinter „Dateityp“ kann zwischen dem Export im `.png` Format oder als verlustfreie Vektorgrafik im `.svg` Format gewählt werden. Für die Weiterbearbeitung in Bildverarbeitungsprogrammen wird `.svg` empfohlen.

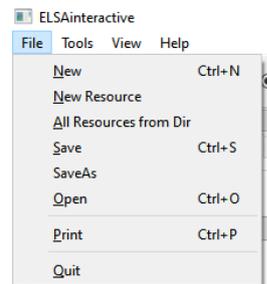
5.4 Exportieren von Plotdaten

Über das Menü **Tools** → **Export plot data** können die Daten der aktuellen Plots als `.xls` oder `.xlsx` exportiert werden. Hierbei werden für jeden Plot je eine Spalte mit seinen x- und eine mit seinen y-Werten gespeichert. Es werden nur die Daten aus dem Bereich exportiert, der im aktuellen Plot dargestellt ist. Wurden die Daten des Plot durch statistische Methoden verändert, so werden die veränderten Daten exportiert.

Marker werden nicht mit exportiert.

5.5 Drucken

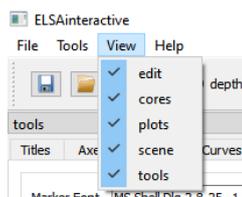
Über das Menü **File** → **Print** oder die Tastenkombination **Strg+P** öffnet sich die Druckvorschau. Über einen Klick auf das Druckersymbol können dann



die angezeigten Plots gedruckt werden.

6 View

Im Menü **View** werden alle Unter-Fenster von *ELSAinteractive++* angezeigt. Über die Auswahl der Fenster in **View** können diese ein- und ausgeblendet werden.



7 Konfigurationsdateien

Das Standardverhalten von *ELSAinteractive++* kann in einigen Punkten mit Konfigurationsdateien angepasst werden:

7.1 default.config

In dieser Datei werden die Standard Schriftarten für die einzelnen Elemente eines Plots definiert.

7.2 fileType.config

In dieser Datei wird festgelegt welche *.xls* und *.xlsx* Dateien nicht als Standardzeitreihe interpretiert werden sollen. Dabei werden die Bezeichner aus Zelle 1,2 (B1) der Tabellen (siehe 2.1) hinter dem jeweiligen Typ kommasepariert eingetragen:

- **AgerTypes:** Alle hier aufgelisteten Bezeichner werden als Ager interpretiert
- **DateTimeTypes:** Alle hier aufgelisteten Bezeichner werden als Datumszeitreihen, statt als Tiefenzeitreihen interpretiert.
- **ImageTypes:** For future use.

7.3 csv-presets.xml

In dieser Datei können Voreinstellungen für den Import von CSV-Dateien (siehe 2.2) definiert werden.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<CSV-list>
  <Preset Name="DemoEinstellung" SkipFront="1" SkipEnd="0"
Headers = "1" Separator="0" DecimalSeperator = "," Type =
"DateTime" DepthColumn="1" Dateformat="yyyy-MM-dd hh:mm"
TimeColumnn = "-1" AddRows = "0">
  <Units Entries = "[m];[%]" />
  <Names Entries = "Depth;Si" />
</Preset>
</CSV-list>
```

Die Voreinstellungen werden als `<Preset>` im Body von `<CSV-list>` definiert. Jedes Preset muss die folgenden Attribute vorweisen, welche den Einstellungen im CSV-Import-Dialog entsprechen.

- **Name** Angezeigter Name im Import-Dialog
- **SkipFront** Anzahl der Zeilen, die am Anfang der Datei übersprungen werden.
- **SkipEnd** Anzahl der Zeilen, die am Ende der Datei übersprungen werden.
- **Headers** Anzahl der zu übernehmenden Headerzeilen aus der Datei.
- **Separator** Spaltentrennzeichen 0 := „;“ ; 1 := „,“ ; 2 := „Space“ ; 3 := „Tab“.
- **DecimalSeparator** Dezimaltrennzeichen „.“ oder „,“.
- **Type** Datentyp, siehe 2.1 und 7.2.
- **DepthColumn** Spalte mit Tiefen- oder Datumsinformation (bei `DateTimeType`).
- **Dateformat** Nur bei `DateTimeType`, Datumsformat (s. 3.3).
- **TimeColumn** Nur bei `DateTimeType`, Separate Zeitspalte. -1 bedeutet keine.
- **AddRows** Anzahl zusätzlich einzufügender Leerzeilen in der Ausgabedatei.

Außerdem kann jedes `<Preset>` die Unterelemente `<Units>` für Einheiten und `<Names>` für Spaltennamen enthalten. Diese müssen das Attribut „`Entries`“ definieren, welches eine „;“ separierte Aufzählung der Spalteneinträge enthält.

8 Erweiterungsscripte

Es ist möglich die mathematischen Funktionen von `ELSAinteractive++` durch selbstgeschriebene R- und Python-Scripte zu erweitern.

Dazu müssen diese lediglich in der Datei „`script_info.xml`“ eingetragen werden und bestimmte Informationen über Kommandozeilenparameter verarbeitet werden. Bei Programmstart generiert `ELSAinteractive++` aus

den Daten der „script_info.xml“ eine neue Funktionsgruppe unter dem „Math“-Tab.

Bei Start eines Scripts werden die dargestellten Daten als `.xlsx` automatisch exportiert (wie in 5.4) und das entsprechende Scripte mit mindestens zwei Kommandozeilenparametern aufgerufen:

1. Speicherort der exportierten Daten (Standard `„./tmp/export.xlsx“`)
2. Erwarteter Speicherort der vom Script generierten Daten
3. Ggf. weitere Parameter, in der Reihenfolge wie sie in `„script_info.xml“` definiert wurden.

Im Ordner Scripts liegen je ein Beispielscript in R und in Python, sowie die `„script_info.xml“`.

8.1 Aufbau der `„script_info.xml“`:

```
<?xml version=„1.0“ encoding=„UTF-8“?>
<Scripts>
  <Script Name=„File R-W Test“ Path=„./Scripts/fileRWtest.R“
Language=„R“
      SingleInput=„False“ HasOutput=„True“>
  </Script>
  <Script Name=„Python HelloWorld“ Path=„./Scripts/HelloWorld.py“
      Language=„Python“ SingleInput=„False“ HasOutput=„False“>
    <Parameter Name=„InputA“ Type=„int“/>
    <Parameter Name=„InputB“ Type=„int“/>
  </Script>
</Scripts>
```

Für jedes Script muss im Body von `<Scripts>` ein Element `<Script>` definiert werden.

Jedes `<Script>` Element kann die folgenden Attribute definieren:

- **Name:** (Pflicht) Angezeigter Name des Scripts im „Math“-Tab
- **Path:** (Pflicht) Pfad zum Script

- **Language:** (optional) „R“ oder „Python“, default „R“. Definiert, ob es sich um ein R oder ein Python Script handelt.
- **SingleInput:** (optional) „True“ oder „False“, default „False“. Wenn „True“ werden nur die Daten des markierten Plots exportiert, ansonsten die aller Plots.
- **HasOutput:** (optional) „True“ oder „False“, default „False“. Gibt an, ob das Script einen *ELSAinteractive++* lesbaren Output generiert oder nicht.

Die Attribute „Name“ und „Path“ müssen definiert sein!

Zusätzlich können in jedem `<Script>` Element weitere Eingabeparameter in `<Parameter>` Unterelementen definiert werden. Für `<Parameter>` gibt es die folgenden Attribute:

- **Name:** (Pflicht) Angezeigter Name in der Funktionsgruppe
- **Typ:** (Pflicht) Erwarteter Datentyp des Parameters. „int“, „double“ oder „string“
- **Default:** (optional) Defaultwert, der bei Programmstart angezeigt wird.

9 Script Output-File

Die Ausgaben der Scripte können in *ELSAinteractive++* automatisch eingelesen werden, um sie anschließend ebenfalls darzustellen. Die Ausgabe muss hierzu in die im zweiten Kommandozeilenparameter mitgeteilte CSV-Datei erfolgen. Die Datei muss aufgebaut sein wie folgt:

```
Kern1, ,Kern2,
depth1,data1,depth2,data2
x11,y11,x21,y21
x12,y12,x22,y22
...
```

10 FAQ

- F: Die Datei `xyz.xls` kann nicht korrekt geladen werden
- A: Entspricht die Datei der benötigten Formatierung? (siehe 2)
- Enthält der Dateipfad / Dateiname Umlaute oder Sonderzeichen?
Diese können Probleme bereiten und müssen vermieden werden.
- In manchen Fällen liegt auch ein unsichtbarer Formatfehler in der Datei vor. Hier hilft es, alle Einträge zu kopieren und in einer neuen Datei als Werte einzufügen.
- F: Beim Öffnen einer Datei erscheint die Warnung **Core** sei noch nicht vorhanden, obwohl bereits Datensätze zu diesem **Core** geladen wurden.
- A: Die Kernnamen in den unterschiedlichen Dateien sind nicht identisch. Besonders auf Groß- und Kleinschreibung, sowie auf Leerzeichen achten.
- F: Das Fenster `XYZ` ist verschwunden.
- A: Deaktiviere und aktiviere das Fenster im Menü **View** (siehe 6).
- F: Bei logarithmischer Darstellung werden meine Daten nur als Linie angezeigt und meine Achsenskalierung beginnt bei $1e-100$.
- A: Ändere das Minimum der Achsskalierung auf einen Wert größer Null (z.B. 0.1).

9.3 ***ELSA*interactive++ Code Dokumentation**

Eine ausführliche Code Dokumentation ist neben dem Source-Code im Ordner [Dokumentation](#) hinterlegt.