

Bachelorarbeit

Mikrostruktur im Eis

– Hochaufgelöste Korngrößen- und c -Achsenanalyse im NEEM-Kern
(Grönland) –

vorgelegt von
Anneke Tammen

Institut für Geowissenschaften an der
Johannes Gutenberg-Universität Mainz

*Alfred Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung
Bremerhaven

18. November 2012

Betreuer:
Dr. Mark Peternell
Dr. Ilka Weikusat*

Danksagung

Ich möchte Ilka Weikusat und Mark Peternell danken, für die Möglichkeit am Alfred Wegener Institut in Bremerhaven meine Arbeit über ein so interessantes Thema schreiben zu können und ich danke Ilka Weikusat für Einblicke in die Glaziologie, besonders die Sommerschule in Obergurgl und die Tage im Eislabor haben mir sehr viel Spaß gemacht. Ich danke Mark Peternell und Ilka Weikusat für sämtliche Hilfestellungen während der Arbeit. Ich danke Juniorprofessor Dr. Denis Scholz für seine Hilfe im Programm R und in der Statistik. Ich danke Dr. Sepp Kipfstuhl für anregende Kritik. Ich danke der gesamten Glaziologie für gemeinsame Kaffee- und Kuchenpausen, interessante Vorträge und das schöne Geschenk. Ich danke meinem Freund Matthias Nickel, dass er mich immer und von überall unterstützt. Jenny Regehr danke ich für motivierende Ratschläge und gemeinsame Unternehmungen vor Ort. Nadine Köller danke ich fürs Probelesen. Ich danke der gesamten Havenhostel Cooking Group für gemeinsame Koch- und Spielabende und witzige Geschichten. Ich danke Wee Cheah für eine ganz besondere malaysianische Weisheit. Ich danke Matthias Hüther dafür, dass er mir im Büro immer zugehört hat und mir oft geholfen hat, meine Probleme zu lösen. Jan Eichler und Eric Gleiß danke ich für ihre Hilfsbereitschaft und Betreuung. Ich danke meiner Familie für die finanzielle und ernährungstechnische Unterstützung und ein offenes Ohr.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die Mittlere Korngröße und c -Achsenverteilung im NEEM-Eiskern auf Grundlage zweier Programme untersucht, die von Jan Eichler (AWI) in C++ programmiert wurden: (1) Dem *cAxes*-Programm, welches anhand der vom *Fabric Analyser* produzierten „data.cis“ eine automatische Kornsegmentierung durchführt und eine Körnerstatistik erstellt und (2) dem *Running Mean*-Programm, welches eine hochaufgelöste Analyse der vom *cAxes*-Programm erfassten Mikrostruktur zur Aufgabe hat.

Zur Visualisierung der Ergebnisse aus der *Running Mean*-Analyse dient der *Bag Plot* (in R programmiert), der alle wichtigen statistischen Parameter (Mittlere Korngröße, Eigenwert E3, Regelungsgrad, Sphärische Apertur und Woodcockparameter) eines *Bags* darstellt und mit hinterlegten Bildern zur Überprüfung der Funktion des *Running Mean*-Programms herangezogen wird, aber auch schon erste Aussagen zur Mikrostrukturentwicklung im NEEM-Eiskern erlaubt. Zur Untersuchung der Mikrostrukturentwicklung werden vier *Bag*-Proben aus möglichst unterschiedlichen Tiefen beschrieben und verglichen. Danach können die Ergebnisse von Jakub Surma, 2011 zu den c -Achsenverteilungen nach der Tiefe bestätigt werden. Auch was die Entwicklung der Mittleren Korngröße angeht, wird auf ein Phänomen gestoßen, was nicht zum ersten Mal beobachtet wurde. Zum Schluss soll mittels Korrelation geklärt werden, ob es einen Zusammenhang zwischen der Mittleren Korngröße und der c -Achsenorientierung gibt und wie sich dieser über die Tiefe verhält. Dabei wird sich zeigen, dass kein deutlicher linearer Zusammenhang besteht, aber dieser sich mit der Tiefe verändert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen zu Polarem Eis	2
2.1	Entstehung von Polarem Eis	2
2.2	Struktur von Eis	2
2.3	Optische Eigenschaften von Eis	4
2.4	Mechanische Eigenschaften von Eis	5
2.4.1	Einkristall	5
2.4.2	Polykristallin	6
2.5	c-Achsenorientierungen	8
2.5.1	in einer Eisscheide	8
2.5.2	im NEEM-Eiskern	8
2.6	Statistische Parameter zur Beschreibung der c-Achsenorientierung	9
2.6.1	Eigenwerte	9
2.6.2	Regelungsgrad	9
2.6.3	Sphärische Apertur	10
2.6.4	Woodcockparameter	10
2.7	Körner und Korngrenzen	10
3	Material und Labormethoden	11
3.1	Herkunft des Materials	11
3.2	Probenentnahme	11
3.3	Probenvorbereitung	12
3.4	c-Achsen-Messung mit dem <i>Fabric Analyser G50</i>	15
4	Analysemethoden	16
4.1	<i>cAxes</i> und <i>Running Mean</i> -Programm	16
4.1.1	Ziel	16
4.1.2	Funktionsweise	17
4.1.3	<i>cAxes</i> versus <i>Fabric Analyser G50</i>	19
4.2	<i>Plot</i> -Programm	21
4.2.1	Ziel	21
4.2.2	Funktionsweise	21
4.2.3	Aufbau eines <i>BagPlots</i>	22
5	Ergebnisse	23
5.1	Vorläufiges Ergebnis	23
5.2	Korrigierte Ergebnisse	25
5.2.1	Probe nmfa 1227	25
5.2.2	Probe nmfa 1866	26
5.2.3	Probe nmfa 3356	28
5.2.4	Probe nmfa 4006	29
5.3	Korrelation von c-Achsen-Orientierung und Korngröße	31

6 Fehlerbetrachtung	33
6.1 Kornsegmentierung	33
6.2 Running Mean	33
7 Diskussion	34
7.1 <i>cAxes</i> und <i>Running Mean</i> -Programm	34
7.2 Mittlere Korngröße	34
7.3 <i>c</i> -Achsenverteilungen	36
7.4 Korrelation von Korngröße und Kristallorientierung	36
Literaturverzeichnis	37
8 Anhang	I
8.1 Programme	I
8.1.1 Bag Plot	I
8.1.2 Korrelationsplot (4 Tiefen Vergleich)	IV
8.1.3 Korrelationsschleife	VII
8.2 Tabellen	IX
8.2.1 Korrelation von E3 und Mittlerer Korngröße	IX
8.3 Alle 16 <i>Bag Plots</i> ohne hinterlegte Bilder	X

Abbildungsverzeichnis

1	Eisentstehung	2
2	Kristalline Struktur von Eis	3
3	Schweres und leichtes Gleiten	5
4	Dislokationen	6
5	Kriechkurve	7
6	c-Achsenorientierungen in einer Eisscheide	8
7	Bohrlokation	11
8	Mikrotom	12
9	Eisdünnschnitt sägen	14
10	Eisdünnschnitt unter gekreuzten Polarisatoren	14
11	Fabric Analyser	15
12	Kristall Scan	16
13	Qualitätsangaben	17
14	<i>Running Mean</i> Anwendung	18
15	Auflösungsunterschiede bei Framehöhe und Schrittweite	19
16	Vergleich „grains.png“ mit „trend.bmp“	20
17	Trendlegende	20
18	Boxstruktur	23
19	Randkörner löschen	24
20	BagPlot nmfa 1227	25
21	BagPlot nmfa 1866	27
22	BagPlot nmfa 3356	28
23	BagPlot nmfa 4006	30
24	4 Tiefen Vergleich	31
25	Korrelationswerte mit der Tiefe	32
26	Vergleich von $\delta 18 O$ - und Staubdaten mit der Korngröße	35

1 Einleitung

Eis ist ein sehr interessantes und vielseitiges Material. Zum einen dient es als Analog für quarzreiche Gesteine, da diese sich bei plastischer Deformation sehr ähnlich verhalten ([Wilson, 2012]), zum anderen ist es ein Speicher für Klimainformationen (Isotopenzusammensetzung, Gasinhalt und Spurenelemente) vergangener Atmosphären. Das Thema Mikrostruktur im Eis verbindet auf einzigartige Weise tektonisch-physikalische Arbeitstechniken mit Klimaforschung.

Das NEEM-Projekt Der NEEM-Eiskern wurde gebohrt, um komplette und unzerstörte Lagen vom letzten Interglazial, dem Eem, zu erhalten. Dieses Bohrprojekt war nötig, weil alle bisherigen Eiskerne aus Grönland keine vollständigen Lagen des Eem enthielten, da die Lagen dort entweder geschmolzen waren oder durch Eisfließen nahe des Gesteinsbettes zerstört wurden (neem.dk/about_neem/). Zwar gibt es das Eem aufgelöst schon aus Eisbohrkernen der Antarktis, jedoch sind die Lagen dort zum einen sehr dünn und zum anderen ist eine spannende Frage, wie sich Nord- und Südhalbkugel bei einer Warmzeit voneinander unterscheiden. Das Eem soll als Analog für das zukünftige Klima dienen. Herrschten in Grönland während des Eem Temperaturen, die 3 bis 5°C höher waren als heute, wird die Temperaturerhöhung für die Zukunft auf 2 bis 4°C pro Jahrhundert geschätzt (neem.dk/about_neem/). So wird angenommen, dass die Bedingungen des Klimas im Eem und die des Klimas in der Zukunft sehr ähnlich sind. Durch ein besseres Verständnis für die Entwicklung des Eem-Klimas könnten genauere Vorhersagen gemacht werden, wie sich unser laufendes Klima entwickeln wird.

Das Mikrostruktur-Projekt Um die Paläoklimadaten aus tiefen Eiskernen richtig zu interpretieren und zeitlich korrekt einzuordnen, verlässt man sich auf Eisfließmodelle, die auf Glen's Fließgesetz beruhen. Dieses Fließgesetz berücksichtigt allerdings hinsichtlich der Deformation von Eisschilden nur durchschnittliche Kristalleigenschaften des Eises und nicht die Interaktion individueller Eiskristalle. So versagt das Modell, wenn das Material eine mechanische Anisotropie entwickelt ([Paterson, 1994]). Da aufgrund der hohen Anisotropie des hexagonalen Eises (s. Kap. 2.2) die c -Achsenverteilungsmuster eine große Rolle für die Viskosität spielen, werden diese zusammen mit charakteristischen Korngrößenverteilungen gesucht, um Möglichkeiten zur Verbesserung des Eisfließgesetzes zu evaluieren. Ein erster Schritt ist, mittels eines Programms die Korngrößen- und c -Achsenorientierungserkennung zu automatisieren und anhand eines Running Means statistisch hochaufgelöst auszuwerten.

Mein Projekt In dieser Arbeit soll das *Running Mean*-Programm getestet werden, indem die Ergebnisse der *Running Mean*-Analyse mit hinterlegten Bildern verglichen werden, aber auch schon erste Untersuchungen zum Strukturvergleich angestellt werden. Dazu werden vier Proben aus möglichst unterschiedlichen Tiefen herangezogen. Zusätzlich soll eine erste Evaluierung gemacht werden, ob und wie Korngrößen und c -Achsendaten korrelieren beziehungsweise ob und wie sich diese Korrelation in unterschiedlichen Tiefen verändert.

2 Grundlagen zu Polarem Eis

2.1 Entstehung von Polarem Eis

Polares Eis wird aus Schnee gebildet. Dies geschieht unter dem Druck akkumulierter Lagen über zwei komplexe Prozesse: Die Konsolidation und das Sintern ([Petrenko & Withworth, 1999]). Dabei ist Konsolidation der Prozess bei dem das Material verdichtet wird und somit Porenräume verkleinert und oder verringert werden. Sintern führt zu Kornwachstum und verdichtet nicht unbedingt. Sintern ist der Prozess, der zwei Körner verbindet, indem durch Oberflächentransport von Material ein Hals zwischen den beiden Körnern entsteht ([Blackford, 2007]).

Wenn Schnee teilweise konsolidiert, entsteht zunächst Firn. In Firn gibt es noch kontinuierliche Luftgänge zwischen den Körnern, die zum Teil abgeschlossen sein können. Bei einer Dichte von über 830 kg m^{-3} geht Firn in Eis über. Zur Veranschaulichung der Übergänge dient Abbildung 1. Es finden sich nur noch isolierte Luftblasen. Die Tiefe des Firn-Eis-Übergangs variiert je nach Akkumulationsrate und mittlerer Jahrestemperatur und ist bei 50 bis 100 m Tiefe zu erwarten. Bei sehr trockenem Schnee wie in der Antarktis und in Grönland, wo es auch im Sommer kein Schmelzen des Schnees gibt, stecken

Zeiträume von mehreren hundert Jahren dahinter. Mit zunehmender Tiefe und Druck werden die eingeschlossenen Luftblasen immer kleiner bis sie schließlich bei einer Tiefe von 900 bis 1600 m (Werte für Grönland) ([Cuffey & Paterson, 2010]) als Lufthydrate in die Eiskristalle aufgenommen werden.

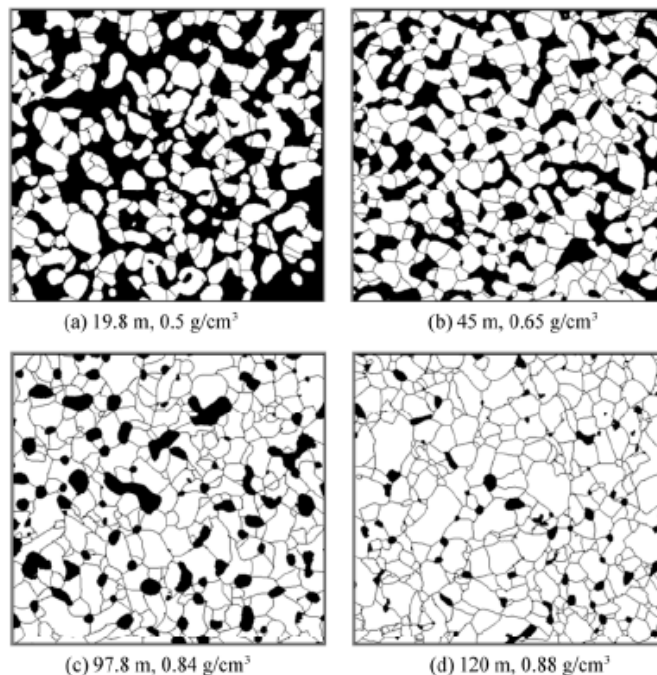


Abbildung 1: Übergang von Schnee über Firn zu Eis. Genommen aus [Blackford, 2007], ursprünglich von [Arnaud et al., 2000]

2.2 Struktur von Eis

Insgesamt sind aus Laborexperimenten 12 kristalline Formen von Eis bekannt. Unter natürlichen Bedingungen ist allerdings nur das hexagonale Eis Ih stabil. Zwei Bindungen sind für den Aufbau eines Eiskristallgitters nötig: „In dem H₂O Molekül selbst verbinden starke kovalente Bindungen das Sauerstoffatom mit zwei Wasserstoffatomen, während schwache Wasserstoffbindungen die H₂O Moleküle untereinander verknüpfen“ ([Schulson & Duval, 2009], Seite 7). Dabei wird jedes Sauerstoffatom von vier weiteren Sauerstoffatomen in einer tetraedrischen Anordnung umgeben. Das führt zu einer hexagonalen Kristallstruktur, in der Sauerstoffatomlagen mit einer Distanz von 0,276 nm

voneinander entfernt sind ([Schulson & Duval, 2009], Seite 9). Die basalen Ebenen werden durch nur 0,0923 nm ([Thorsteinson, 1996], Seite 17) voneinander entfernten Doppellagen gebildet, wobei die eine Lage aus den Grundflächen der Tetraeder besteht und die andere aus denen vom Tetraeder eingeschlossenen, mittigen Sauerstoffatomen. Die Orthogonale zur basalen Ebene ist die c -Achse des Kristalls. Abbildung 2 zeigt eine Übersicht der Strukturbeschreibung.

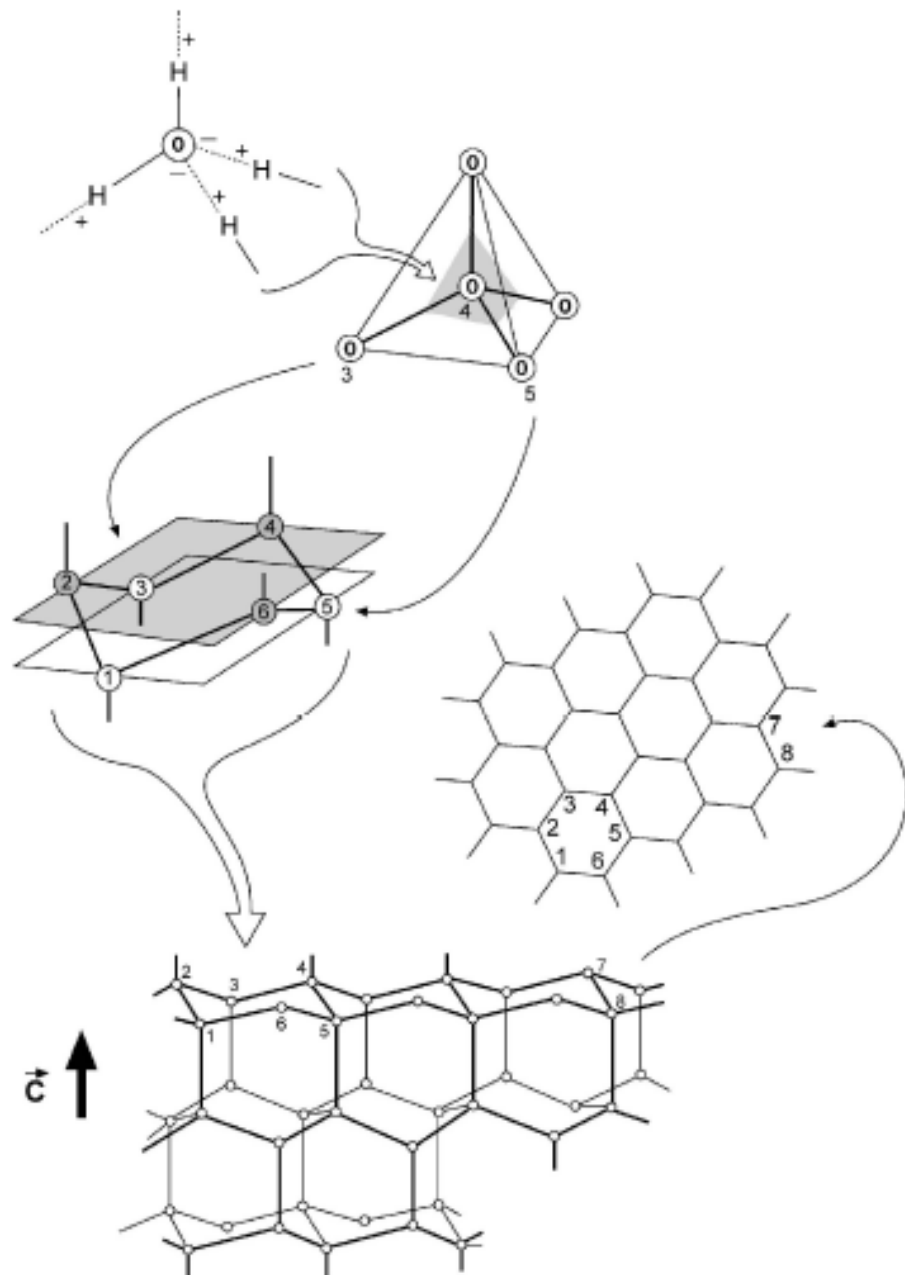


Abbildung 2: Kristalline Struktur von Eis ([Cuffey & Paterson, 2010])

2.3 Optische Eigenschaften von Eis

Da in Eis mit seiner hexagonalen Struktur die Bindungskräfte in verschiedenen Richtungen unterschiedlich sind, benötigt man zwei kristallografische Achsen, um das Mineral Eis zu beschreiben.

$$a_1 = a_2 = a_3 \neq c$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$$

Eine Folge davon ist, dass Lichtgeschwindigkeit und damit Lichtbrechung in verschiedenen Richtungen unterschiedlich sind. Das Mineral ist optisch anisotrop. Ein typisches Merkmal optisch anisotroper Minerale ist die Doppelbrechung. Tritt eine Lichtwelle in ein anisotropes Mineral ein, wird sie in zwei Transversalwellen aufgespalten, die senkrecht zueinander schwingen und sich mit unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit v_o und v_e fortpflanzen. Die zwei Lichtwellen heißen ordentlicher Strahl o und außerordentlicher Strahl e . Nach dem Snellius'schem Gesetz

$$\frac{\sin(\zeta)}{\sin(\chi)} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

ergeben sich somit zwei entsprechende Brechungsindizes für die beiden unterschiedlich schnellen Wellen, die unterschiedlich stark gebrochen werden. „[...] [In] Richtung der c -Achse [...] [pflanzte sich] nur eine Welle mit der Lichtbrechung n_o fort [...] [,] in allen übrigen Richtungen des Kristalls pflanzen sich zwei Wellen mit verschiedener Lichtbrechung n_o und n'_e fort.“ ([Müller & Raith, 1993]) Die Doppelbrechung ist der Betrag der Differenz von n_o und n_e :

$$\Delta n = n_e - n_o$$

$$\Delta n = 1,3105 - 1,3091$$

$$\Delta n = 0,0014$$

Bei Schnitten senkrecht zur c -Achse tritt folglich keine Doppelbrechung auf, parallel zur c -Achse findet die größte Doppelbrechung statt. Die Laufzeitdifferenz der beiden unterschiedlich schnellen Wellen wird als Gangunterschied ausgedrückt. Er ist abhängig von der Doppelbrechung Δn und der Schlifffdicke d :

$$\Gamma = d * \Delta n$$

([Müller & Raith, 1993]) Je dicker also das Mineral ist und oder je größer die Doppelbrechung Δn , desto größer wird der Gangunterschied Γ . Würde man durch Einhaltung einer konstanten Schlifffdicke die für das Mineral durch die Doppelbrechung hervorgerufenen charakteristischen Interferenzfarben erkennen. Was passiert, wenn sich bei einer monomineralischen Probe die Schlifffdicke ändert, zeigt Abbildung 10 auf Seite 14. Da die Eisproben monomineralisch sind, ist die Doppelbrechung nicht zur Identifizierung von Mineralen, sondern nur zur Bestimmung der Lage der c -Achse wichtig. Unter dem Polarisationsmikroskop lässt sich die c -Achsenorientierung nur in Schnitten senkrecht zur c -Achse bestimmen, andernfalls kann man die Lage der c -Achse nur qualitativ abschätzen. Die c -Achsenorientierungsbestimmung wird in Kapitel 3.4 erläutert.

2.4 Mechanische Eigenschaften von Eis

2.4.1 Einkristall

Ein Eiseinkristall ist anisotrop. In Richtung der c -Achse wechseln sich hochkonzentrierte Sauerstoffatomdoppellagen, die sogenannten basalen Ebenen, mit großen Freiräumen zwischen den Sauerstoffatomlagen ab. Daraus ergibt sich eine Härteanisotropie für den Eiskristall, sodass der Kristall in Richtung der c -Achse nur schwer deformiert werden kann, in Richtungen senkrecht zur c -Achse aber schon eine geringe Scherspannung genügt, um ein Gleiten hervorzurufen (Abbildung 3). Durch Deformation rotiert die c -Achse. Bei uniaxialer Kompression rotiert sie in Kompressionsrichtung und weg von der Zugrichtung ([Azuma & Higashi, 1985]).

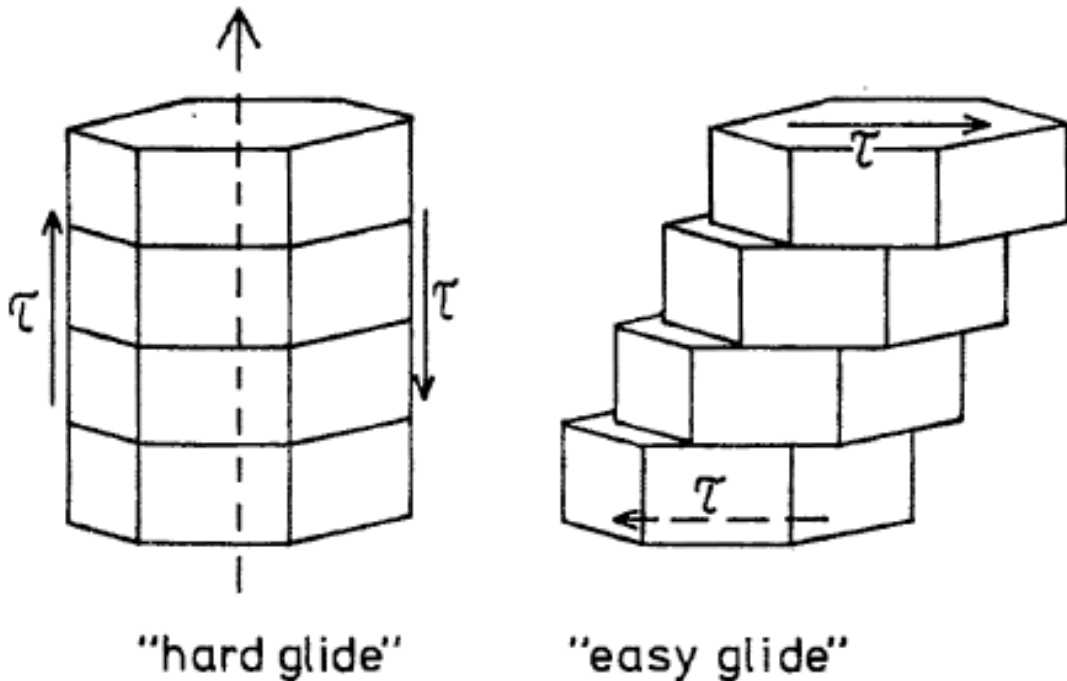


Abbildung 3: Schweres (*hard*) und leichtes Gleiten (*easy glide*) im Eiseinkristall von [Thorsteinson, 1996]

Der Grund für das Gleiten sind mobile Dislokationen auf den basalen Ebenen. Dislokationen sind Liniendefekte innerhalb des Kristallgitters ([Weertman & Weertman, 1964]). „Sie entstehen während der thermal-mechanischen Geschichte des Materials und sind fundamental für die Plastizität und Härte.“ ([Schulson & Duval, 2009], Seite 12 und 13). Sie spielen also auch eine essentielle Rolle bei der Entwicklung der Mikrostruktur durch plastische Deformation. Es gibt drei wichtige Dislokationstypen: Kantenversetzung (*edge dislocation*), Schraubenversetzung (*screw dislocation*) und gemischte Versetzung (*mixed dislocation*) ([Weertman & Weertman, 1964], Abbildung 4).

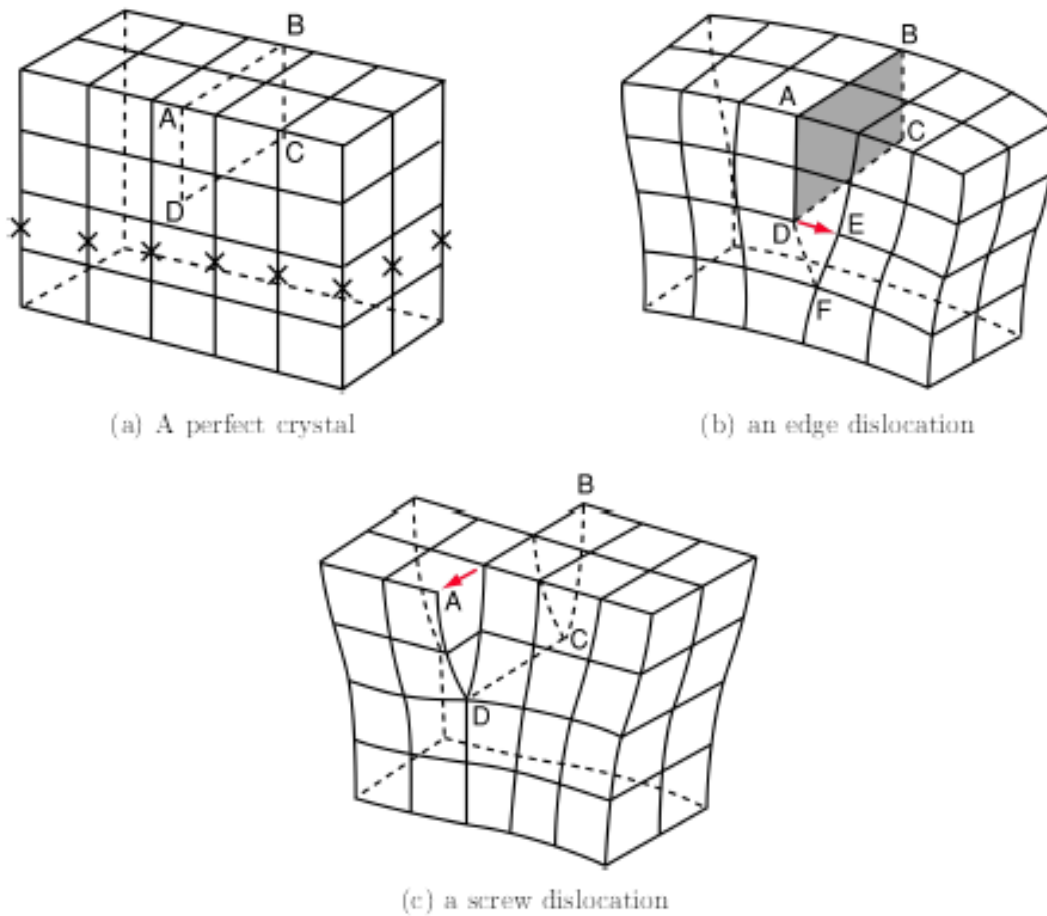


Abbildung 4: (a) ein perfekter Kristall (b) eine Kantenversetzung (*edge dislocation*) und (c) eine Schraubenversetzung (*screw dislocation*). Der rote Pfeil stellt den *Burgers vector* dar (übernommen aus [Binder, 2011], ursprünglich von [Hooke, 2005])

Die edge dislocation (Abbildung 4, (b)) ist eine Kante einer zusätzlichen Gitterhalbene im Kristallgitter. Sie ist senkrecht zu ihrer Gleitrichtung orientiert und bewegt sich auf der horizontalen Ebene, welche die Gleitfläche ist, durch das Kristallgitter. Die Dislokationslinie der Schraubenversetzung (Abbildung 4, (c)) ist parallel zur Gleitrichtung, die Gleitfläche vertikal zur Gleitrichtung orientiert ([Fossen, 2011], Seite 210). Die häufigste Dislokationsvariante in Eis ist eine Mischung der Kanten- und Schraubenversetzung, die gemischte Versetzung ([Schulson & Duval, 2009], Seite 14). Ausbreitungsrichtung und minimaler Betrag der von der Dislokation verursachten Gitterfehlstellung werden durch den *Burgers vector* beschrieben ([Passchier & Trouw, 2005], Seite 31).

2.4.2 Polykristallin

Polykristallines Eis ist Eis, das aus mehreren Eiseinkristallen besteht und wird in erster Linie durch intrakristallines Dislokationsgleiten verformt. Aber die Kristalle bewegen sich auch relativ zueinander. „Kristallwachstum, das Wandern von Kristallgrenzen und dynamische Rekristallisation (die Nukleation und das Wachstum von neuen Kristallen mit einer

bevorzugten Orientierung für die Deformation) sind genauso wichtig.“([Paterson, 1994], Seite 82)

Nahe der Oberfläche eines Eisschildes ist polykristallines Eis durch willkürlich orientierte Eiskristalle zunächst isotrop. Bei Deformation reagiert polykristallines Eis erst elastisch, das heißt, Moleküle rücken ohne Beschädigung zusammen, bevor drei Phasen plastischer Deformation einsetzen, die als primäres, sekundäres und tertiäres Kriechen bezeichnet werden. Kriechen ist eine temperatur- und zeitabhängige Verformung unter einer bestimmten Spannung. Eine typische Kriechkurve ist in Abbildung 5 zu sehen.

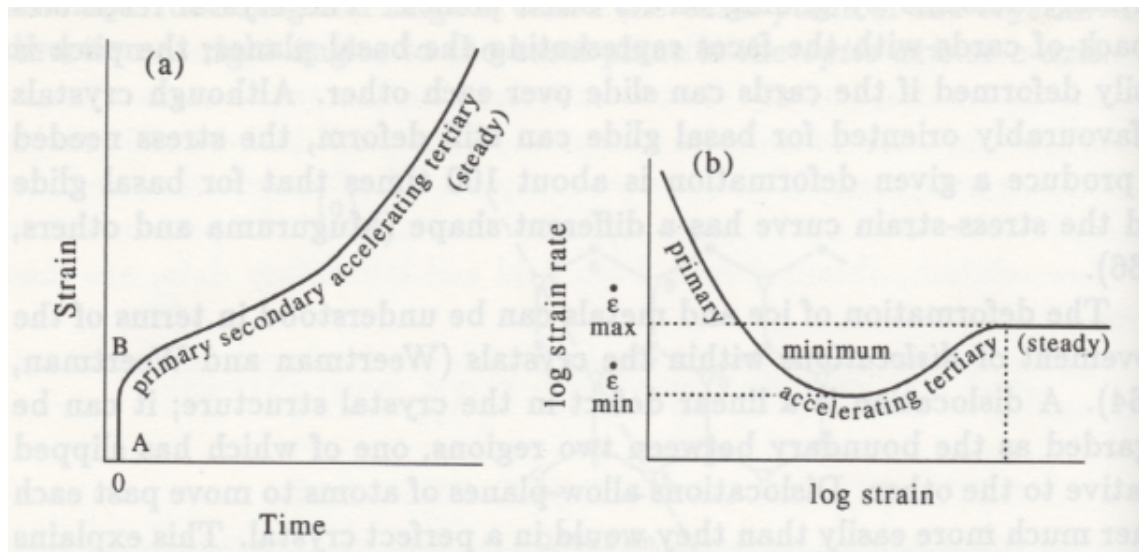
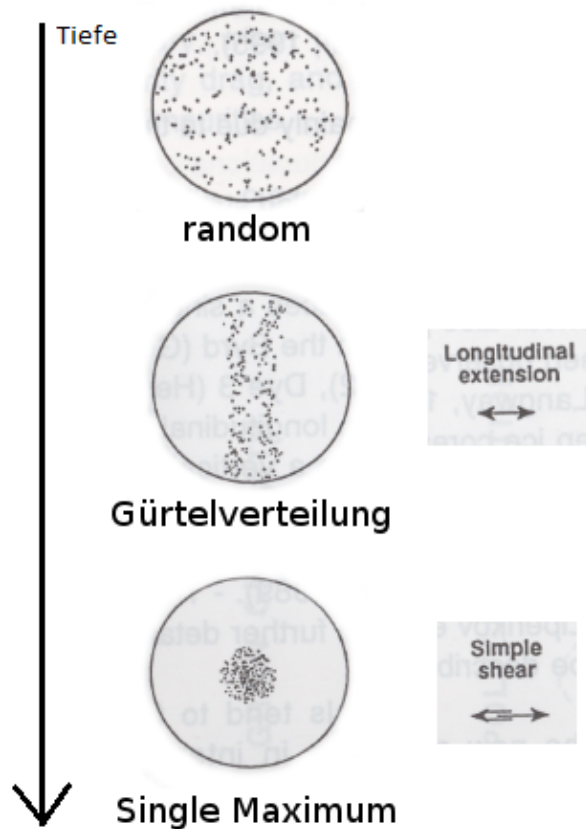


Abbildung 5: Schematische Kriechkurve für polykristallines Eis mit ursprünglich isotroper Verteilung der c -Achsen. Abbildung aus [Paterson, 1994]

Im primären Kriechen werden durch die plastische Deformation Moleküle beschädigt und es bilden sich erste Dislokationen. Durch die Behinderung des Dislokationsgleiten durch unterschiedlich orientierte Kristalle nimmt die Kriechrate kontinuierlich ab bis zu einem Punkt, an dem die Kriechrate konstant ist. Das ist das sekundäre Kriechen. „Die zu beobachtende minimale Verformungsrate resultiert wahrscheinlich aus einem zeitweisen Gleichgewicht zwischen dem Erweichen an diesen Stellen in der Probe und Erhärten woanders.“([Paterson, 1994], Seite 83) Dieses Kriechstadium ist der Übergang zwischen dem entschleunigenden primären Kriechen und dem beschleunigenden tertiären Kriechen. Der beschleunigende Effekt im tertiären Kriechen ist auf die Entwicklung von bevorzugten Kristallorientierungen durch dynamische Rekristallisation zurückzuführen ([Schulson & Duval, 2009], Seite 102). Gleichgewicht während des tertiären Kriechens bedeutet stabile Strukturen und ein Gleichgewicht zwischen Erhärten assoziiert mit der Entwicklung von internen Spannungen und Erweichen in Verbindung mit *Recovery* und Rekristallisationsprozessen. Die Kristalle sind nun optimal zu den Deformationsrichtungen ausgerichtet und in ihrer Verteilung anisotrop.

2.5 c-Achsenorientierungen

2.5.1 in einer Eisscheide



In einer Eisscheide fließt das Eis wie das Wasser in einer Wasserscheide in zwei Richtungen ab. Dadurch entsteht Extension, was die c -Achsen dazu veranlasst, von der Extensionsrichtung weg zu rotieren ([Azuma & Higashi, 1985]) und sich in einer Ebene senkrecht dazu gleichmäßig zu verteilen. Diese Verteilung nennt sich Gürtelverteilung und damit unterscheidet sich eine Eisscheide von einem Eisdome, in dem das Eis in alle Richtungen abfließt und uniaxiale Kompression direkt zu einer *Single Maximum* Verteilung der c -Achsen führt. In der Nähe des Gesteinsbettes herrscht einfache Scherung, die im Dome wie in der Eisscheide durch die Rotation der basalen Flächen zu der Scherfläche zu einem *Single Maximum* in der Vertikalen führt ([Paterson, 1994], Seiten 196 und 197). Wie die c -Achsenverteilungen mit der Tiefe in einer Eisscheide aussehen, zeigt Abbildung 6 schematisch.

Abbildung 6: In einer Eisscheide entwickeln sich folgende c -Achsenverteilungen mit der Tiefe: (a) random, (b) Gürtelverteilung und (c) Single Maximum; Abbildung verändert nach [Alley, 1992] und einer Präsentation von Ilka Weikusat „Polar Ice“, Sommerschule Obergurgl 2012

2.5.2 im NEEM-Eiskern

J. Surma hat in seiner Bachelorarbeit ([Surma, 2011]) die c -Achsenverteilungen im NEEM Eiskern untersucht und hat die typischen Verteilungsmuster einer Eisscheide folgenden Tiefen im Eiskern zugeordnet:

Tiefe in m	Verteilungsmuster
0 bis 89	Keine Einregelung (random)
89 bis 800	Schwache Einregelung
800 bis 1400	Gürtelverteilung
1600 bis 2200	Single Maximum
2200 bis 2533	Starke Variationen

2.6 Statistische Parameter zur Beschreibung der c-Achsenorientierung

2.6.1 Eigenwerte

Um ein Modell einer beliebigen Anordnung von c -Achsen im Raum zu erstellen, wird sich eines dreiachsigen Orientierungsellipsoides ([Wallbrecher, 1986]) bedient, das von den Eigenvektoren e_1, e_2 und e_3 aufgespannt wird. Jedem Eigenvektor wird ein entsprechender Eigenwert zugeordnet, wobei

$$E_1 < E_2 < E_3$$

und

$$E_1 + E_2 + E_3 = 1$$

Die Eigenwerte werden nach folgender Vorgehensweise ermittelt: Jeder Durchstoßpunkt, den eine c -Achse auf einer Lagenkugel bildet, wird mit einer Masse $m = 1$ belastet. Möchte man diese Lagenkugel um eine beliebige Drehachse in Rotation versetzen, benötigt man eine bestimmte kinetische Engergie: Das Trägheitsmoment $M = m * r^2$. m ist die Masse des Partikels, r der Abstand zur Drehachse. „Wenn man aus allen möglichen Drehachsen diejenigen herausfindet, denen das maximale und minimale Trägheitsmoment der Lagenkugel zugeordnet sind, erhält man zwei Richtungen, die die Raumlage der [c -Achsenverteilung] sehr gut beschreiben.“ ([Wallbrecher, 1986], Seite 159) Logischerweise müssen maximales und minimales Trägheitsmoment senkrecht aufeinander stehen, eine dritte Achse ergibt sich durch eine Senkrechte zu den anderen beiden. So erhält man ein rechtwinkliges dreiachsiges Koordinatensystem, welches als dreiachsiges Ellipsoid aufgefasst werden kann, dessen Form von den Trägheitsmomenten bestimmt wird. Der Achse mit dem maximalen Trägheitsmoment wird der kleinste Eigenwert E_1 zugeordnet, der Achse mit dem minimalen Trägheitsmoment der größte Eigenwert E_3 .

Die Verteilung der c -Achsen wirkt sich somit auf die Eigenwertverhältnisse aus und jeder Verteilungsform kann ein entsprechend geformtes Ellipsoid zugeordnet werden.

Verteilungsform	Ellipsoid	Eigenwerte
isotrop, Zufallsverteilung	Kugel	$E_1 = E_2 = E_3 = \frac{1}{3}$
Gürtel	Diskus	E_1 ungefähr gleich 0; $E_2 = E_3 = \frac{1}{2}$
Single Maximum	Zigarre	$E_1 = E_2 \ll E_3$

2.6.2 Regelungsgrad

Werden die orientierten c -Achsen als Vektoren in einer Lagenkugel betrachtet, so lassen sich die Vektoren, die zusammen ein Cluster bilden, addieren, wodurch sich ein Summenvektor R ergibt. Je orientierter die Vektoren sind (d.h. je kleiner der Winkel zwischen den

Vektoren ist), desto größer wird der Betrag des Summenvektors. Sind die Achsen breiter gestreut, wird der Betrag geringer. Die Formel für die Berechnung des Regelungsgrades lautet:

$$R_{\%} = \frac{(2R - N) * 100}{N}$$

Wobei N die Anzahl der Achsen und R der Summenvektor ist. Je größer $R_{\%}$ ist, desto stärker sind die c-Achsen eingeregelt. $R_{\%} = 100$ würden bedeuten, dass alle c-Achsen parallel orientiert sind ([Wallbrecher, 1986], [Surma, 2011]).

2.6.3 Sphärische Apertur

Die Sphärische Apertur wird zur Beschreibung der Streuweite eines Clusters herangezogen. Betrachtet man die Punktwolke, die durch die Durchstoßpunkte der c-Achsen auf der Lagenkugel gebildet wird und beschreibt deren mittlere Streuweite mit einer Kreisfläche, so lässt sich, wenn man diese als Basis nimmt, ein Kegel zum Zentrum der Einheitskugel vorstellen ([Wallbrecher, 1986], [Surma, 2011]). Der halbe Öffnungswinkel ist α_S . Je geringer der Winkel der Sphärischen Apertur ist, desto geringer ist auch die Streuweite. Die Berechnung von α_S erfolgt allgemein nach folgender Formel:

$$\alpha_S = \arcsin\left(\sqrt{2 * \frac{1 - (\frac{1}{N})}{N-R}}\right)$$

Je größer der Regelungsgrad ist, desto kleiner ist somit die Sphärische Apertur. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$R_{\%} = \cos^2\alpha * 100$$

2.6.4 Woodcockparameter

Der Woodcockparameter unterteilt die c-Achsenorientierungen grob in zwei Verteilungsmuster: Dem Single Maximum und der Gürtelverteilung. Er wird anhand des Verhältnisses der natürlichen Logarithmen der jeweiligen Eigenwertverhältnisse berechnet:

$$k = \frac{\ln(\frac{E3}{E2})}{\ln(\frac{E2}{E1})}$$

Wenn $0 \leq k < 1$, handelt es sich um eine Gürtelverteilung.

Wenn $1 < k \leq \infty$, ist es ein Single Maximum.([Woodcock, 1977])

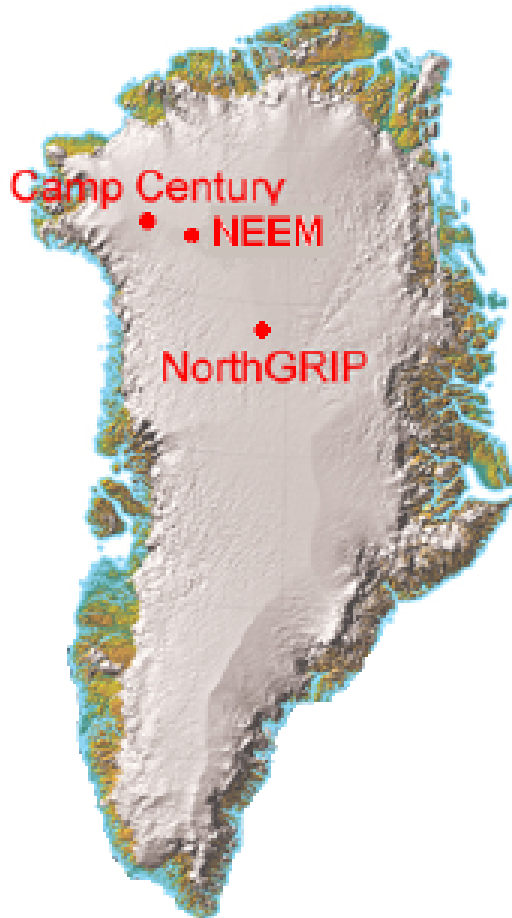
2.7 Körner und Korngrenzen

Eiskristalle werden gemeinhin als Körner und Kristallgrenzen als Korngrenzen bezeichnet. Ein Korn wird von einem anderen Korn durch eine Korngrenze getrennt. Korngrenzen bilden sich zum Beispiel durch Ansammlungen von Dislokationen und entwickeln sich von Subkorngrenzen zu Korngrenzen. Ein Korn unterscheidet sich von einem anderen Korn durch die unterschiedliche Orientierung. So wird eine Korngrenze im Eis bei einer Missorientierung von 1 bis 3° als solche bezeichnet. Korngrößen in natürlichem Eis reichen von 2 bis 20 mm ([Thorsteinson, 1996]). In dieser Arbeit werden Korngrößen als Kornflächen von zusammengezählten, zusammenhängenden Pixeln bestimmt.

3 Material und Labormethoden

3.1 Herkunft des Materials

Die NEEM Bohrlokation (Abbildung 7) ist basierend auf Radarmessungen eisinterner Lagen und der Gesteinsbetttopographie im Nordwesten Grönlands ($77,45^\circ\text{N}$, $50,06^\circ\text{W}$) gewählt worden, wo der Eisschild eine Dicke von 2542m aufweisen soll (http://neem.dk/about_neem/). Das Eem wird bei einer Tiefe von 2265m bis 2345m erwartet mit einer Jahresschichtung von ungefähr 7mm Mächtigkeit.



Bedingungen für die Erhaltung Eem'schen Eises sind:

- eine große Eisschilddicke, weil sie mehr jährliche Lagen verspricht
- ein flaches Gesteinsbett, weil ein unebenes Gesteinsbett unregelmäßiges Eisfließen hervorruft, das die stratigraphischen Eislagen zerstören kann
- eine mäßig hohe Auflösung durch mäßigen jährlichen Schneefall, denn zu viel Schneefall führt zu schnellem Eisfließen und dadurch zu schnellem Ausdünnen von älteren Lagen und zu wenig Schneefall erschwert das Auffinden und die Analyse jährlicher Lagen
- eine Eisscheide, weil dort das Eisfließen auf ein Minimum reduziert ist

Abbildung 7: Bohrlokationen in Nordwestgrönland

3.2 Probenentnahme

Für die Bohrung des NEEM-Eiskern wird ein $13,5\text{m}$ langer Bohrer verwendet, der nur über ein $7,3\text{mm}$ dickes Kabel mit der Oberfläche verbunden ist. Über dieses Kabel werden Energie und Kontrollanweisungen von den Operatoren übertragen. Beim Eindringen in das Eis schneidet der Bohrkopf einen Eisring von 2cm Breite weg und nimmt einen Eiskern mit 98mm Diagonale auf. Ein bis zu 4m langer Eiskern gleitet in das innere Rohr, während sich der Bohrabfall zwischen dem inneren und äußeren Rohr in einer Spirale aufwärtsbewegt. Eine Pumpe pumpt Bohrflüssigkeit mit den Abfällen

in eine Abfallkammer, wo der Abfall aufbewahrt wird. Nach Aufnahme des Eiskerns wird die Rotation gestoppt und das Kabel hochgezogen. Kernfänger (schmale Messer) schneiden in das Eis, damit es nicht aus dem Bohrer gleitet. An der Oberfläche wird der Bohrer demontiert und der Kern rückwärts aus dem inneren Rohr gedrückt. Der Abfall wird entfernt, der Bohrer wird wieder zusammengebaut, dann wird weitergebohrt. Für einen $2,5\text{ km}$ dicken Eisschild werden 800 bis 900 Durchläufe benötigt, die 40 Minuten bis zu einigen Stunden brauchen. Das Bohren begann im Jahr 2008 und endete 2010. (http://neem.dk/about_neem/drillingcores/).

Die letztlich aufgezeichnete Länge des NEEM-Eiskerns sind $2537,36\text{ m}$ (http://neem.dk/field_diaries_folder/uk_diaries_2010/2010-07-27/).

3.3 Probenvorbereitung

Noch in Grönland wird der Eiskern in 55 cm lange *Bags* unterteilt. Diese ungewöhnliche Länge von 55 cm rührt vom Packmaß für damals verfügbare Isolationskisten her. Zudem ist diese Länge waagrecht auf den Armen leicht zu tragen. Die Bezeichnung *Bag* kommt daher, dass man sich vorstellt, dass der Eiskern, so wie er aus dem Untergrund herauskommt, gleich eingetütet wird. Die geschlossene Seite der Tüte ist oben, die offene unten. Diese *Bags* werden wiederum in 6 Sektionen geteilt, die dementsprechend $55/6\text{ cm}$ lang sind und ungefähr 7 cm breit. Aus diesen Sektionen werden die geographisch vertikal orientierten Dünnschnitte angefertigt. Für diese Arbeit verwende ich Daten, die während der NEEM-Feldkampagne direkt nach dem Bohren in Grönland gemessen wurden. Die folgende Laborarbeit habe ich beispielhaft an Proben eines alpinen Gletschers im Eislabor Bremerhaven durchgeführt.



Abbildung 8: Mit dem Mikrotom werden $250\ \mu\text{m}$ dünne Eisschnitte angefertigt.

Zunächst werden die Eisschnitte mit einem etwa gleich großen Stück schwarzem Stoff auf eine Glasplatte geklebt, die maximal so breit ist wie die Arbeitsfläche des Mikrotoms

(Abbildung 8). Der Klebstoff ist Wasser, welches, damit es nicht gefriert, in einem geheizten Computerschrank aufbewahrt wird. Um aber aufgrund der warmen Temperatur nicht die Eisstruktur zu verändern, ist es von Vorteil, das Wasser zunächst ein wenig abkühlen zu lassen. Dann wird auch der Probenträger mit drei bis vier Wassertropfen am Mikrotomtisch befestigt.

Anschließend werden die Eisschnitte durch das Vor- und Zurückbewegen des Mikrotomtisches unterhalb einer rasiermesserscharfen Klinge so lange heruntergeschnitten, bis die Oberfläche eben ist. Bei der Rückwärtsbewegung ist darauf zu achten, die Mikrometerstellschraube immer ein wenig zurückzudrehen, weil das Eis nur bei der Vorwärtsbewegung rasiert werden darf. Mit kleineren Mikrometerschritten (5 bis 2) erfährt das Eis seine erste Polierung. Gleich danach wird ein erstes *Large Area Scan Macroscopy*-Bild aufgenommen ([Binder, 2011]). Auf diesem LASM-Grauwert-Bild kann man schon ganz schwach Korngrenzen, aber auch deutlich vom Mikrotom erzeugte Artefakte wie Schleifspuren von der Klinge und beim Mikrotomieren durch das Herausreißen kleinster Bereiche entstandene Löcher erkennen. Um diese Artefakte zu minimieren, bedarf es eines zweiten Polierschrittes, der Sublimation. Durch die Sublimation wird die oberste Schicht der Eisoberfläche und somit unerwünschte Artefakte entfernt und Schwachstellen wie Korngrenzen verstärkt. Nachdem mit dem LASM-Gerät erneut ein Rückstreubild aufgenommen worden ist, sind nun die Korngrenzen sehr deutlich sichtbar und durch das Mikrotomieren entstandene Artefakte verschwunden. Der Eisblock wird von seinem Glas und dem schwarzen Stück Stoff gelöst. Die polierte Fläche wird auf ein neues Glas gelegt, möglichst ohne es viel hin- und herzubewegen und so, dass die vertikalen Probenkanten parallel zur Glaskante liegen.

Eisprobe und Probenträger werden mit einem dünnen Wasserfilm gut miteinander verbunden, damit sich der Eisschnitt beim Sägen nicht lösen kann. Die Probe wird auf die Glaskante gestellt und langsam mit Hilfe von zwei Pinseln durch das Sägeblatt einer schnell rotierenden Bandsäge (Abbildung 9) bewegt. Dazu wird die Probe mit dem einen Pinsel von der linken Glaskante aus geschoben und mit dem anderen Pinsel das Eis leicht an der Stelle gedrückt, wo sich gerade das Sägeblatt befindet. Wenn das Sägeblatt die Probe durchlaufen hat, ist darauf zu achten, die Probe nicht umfallen zu lassen. Die Säge wird ausgeschaltet und das von der Probe getrennte Stück mit Hilfe eines Pinsels langsam umgelegt, während die Probe mit dem Glas hinter dem Sägeblatt stehen bleibt. Das Reststück wird wieder eingetütet und in die Probenaufbewahrungskiste aus Styropor zurückgelegt. Die nun ca. $700\ \mu\text{m}$ dicke Probe muss nun auf 300 bis $250\ \mu\text{m}$ heruntergeschnitten werden. Bis ca. $350\ \mu\text{m}$ wird in $10\ \mu\text{m}$ Schritten mikrotomiert, dann werden zehn $5\ \mu\text{m}$ Schritte und schließlich zehn $2\ \mu\text{m}$ Schritte durchgeführt. Bevor die *c*-Achsen-Messungen mit dem *Fabric Analyser G50* starten, wird die Probe erneut der Sublimation ausgesetzt. Wie ein fertiger Eisdünnschnitt unter gekreuzten Polarisatoren aussieht, zeigt Abbildung 10.



Abbildung 9: Bandsäge zum Schneiden von Eiskernproben

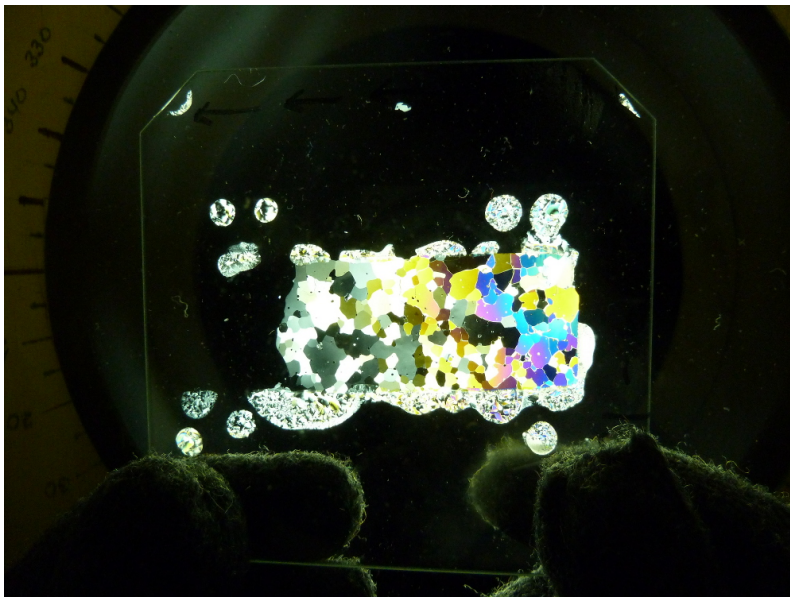


Abbildung 10: Eisdünnschnitt unter gekreuzten Polarisatoren, Schliffdicke nimmt von links nach rechts zu

3.4 c -Achsen-Messung mit dem *Fabric Analyser G50*

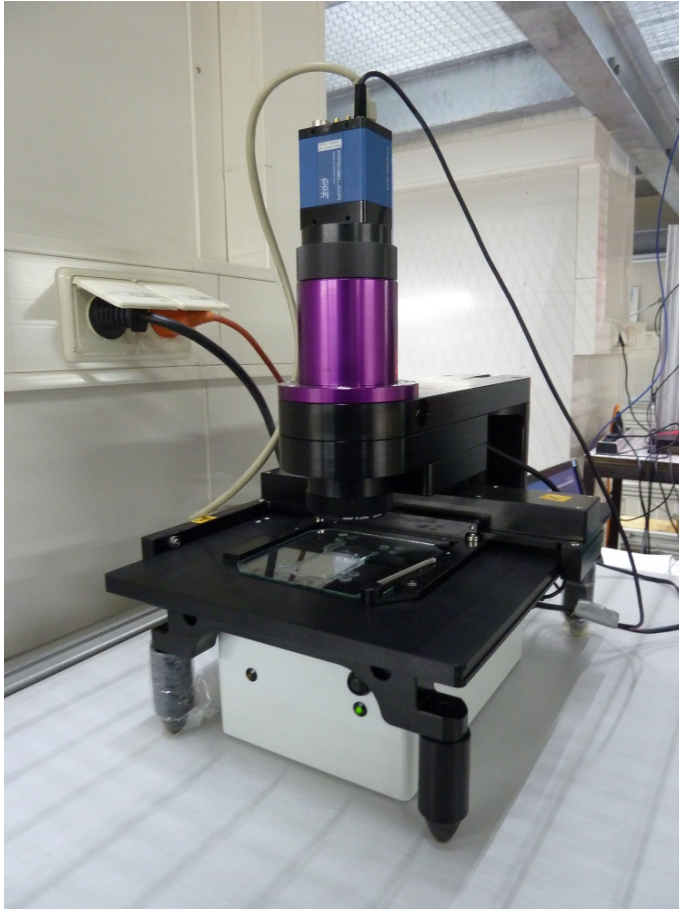


Abbildung 11: Fabric Analyser G50

Der *Fabric Analyser* (Abbildung 11) ist ein Gerät zur Bestimmung von c -Achsen optisch einachsiger Minerale wie Quarz, Calcit, Apatit und Eis. Es wird keine spezielle Probenvorbereitung benötigt und er kann bis zu $10 \times 10 \text{ cm}$ große Dünnschnitte in relativ kurzer Zeit (ca. 30 min bis 60 min) analysieren. Allerdings kann er nicht die vollständige kristallografische Orientierung erfassen und er ist auf hexagonale und trigonale Minerale beschränkt. Seine Messungenauigkeit im Vergleich zur EBSD (= *Electron Back Scatter Diffraction*) beträgt 6° , die Präzision innerhalb eines Kristalls ist $< 2^\circ$ ([Peternell et al., 2010]). Die Hauptbestandteile eines *Fabric Analysers* (von unten nach oben) sind eine Lichtquelle, ein Objektisch, zwei Polarisatoren, ein λ -Plättchen, eine Objektivlinse und eine CCD-Kamera

([Wilson et al., 2003],[Wilson et al., 2007]). Die Lichtquelle besteht aus einer LED senkrecht zur Probe und 8 schiefen LEDs mit einem Winkel von 12° zur Senkrechten und 45° zueinander, um einen konischen Lichtstrahl auf den Dünnschnitt zu fokussieren. Der Objektisch mit dem Dünnschnitt ist stationär, während die gekreuzten Polarisatoren synchron zwischen 0 und 90° in $11,25^\circ$ Schritten rotiert werden. Für jede der 9 LEDs nimmt die CCD-Kamera einen Stapel Bilder auf: Bilder für die gekreuzten Polarisatoren plus Bilder für das zugeschaltete λ -Plättchen plus Bilder für eben polarisiertes Licht bei 0 und 90° ([Wilson et al., 2007], [Peternell et al., 2009]). Für jede Leuchtrichtung beziehungsweise jeden Stapel Bilder wird die Ebene bestimmt, in der die c -Achse liegt. Der Auslöschungswinkel für jede c -Achse wird ausgerechnet, indem Lichtamplitudenwerte bei jedem Schritt der Polarisatoren durch Fourier Transformation an eine Sinuskurve angepasst werden ([Peternell et al., 2009]). Durch Übereinanderlegen aller neun Ebenen erhält man im Idealfall eine Schnittlinie, die die Orientierung der c -Achse wiedergibt. Wie gut diese Ebenen in einem Linear zusammenfallen, wird durch den Wert der geometrischen Qualität ausgedrückt. Eine schlechte Qualität entsteht bei Verunreinigungen, Einschlüssen und Korngrenzen. Die Orientierung der c -Achse wird für jedes Pixel über die beiden Winkel Azimut, der die Abweichung von Nord angibt (vertikale Orientierung, parallel zur

Eiskernachse) und Werte zwischen 0 und 360° annehmen kann, und Colatitude, der die Abweichung zur Senkrechten zur Dünnschnittfläche (horizontale Orientierung, quer zur Eiskernachse) angibt und Werte zwischen 0 und 90° annimmt, definiert.

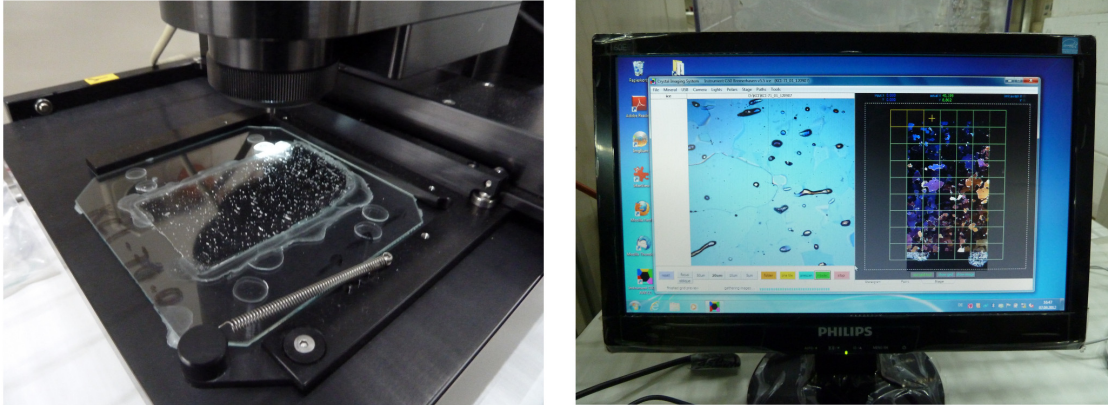


Abbildung 12: Auf dem linken Bild ist eine im Fabric Analyser eingespannte Probe zu sehen, die von unten mit verschiedenen Polarisator- und Richtungseinstellungen beleuchtet wird, während eine CCD-Kamera von oben die Bilder aufnimmt. Auf dem rechten Bild wird das Crystal Imaging System gezeigt. Links ist das aktuelle Bild der CCD-Kamera zu sehen, rechts der aus einzelnen Kacheln zusammengesetzte Dünnschnitt.

Die Probe wird im *Fabric Analyser* (Abbildung 11) eingelegt. In dem dazugehörigen Programm „Crystal Imaging System“ (Abbildung 12, rechts) wird angegeben, ob es sich bei dem Material um Eis oder Quartz handelt (Eis), in welchem Ordner die Messung gespeichert und mit welcher Auflösung gemessen werden soll ($50\ \mu m$, $20\ \mu m$, $10\ \mu m$, $5\ \mu m$). Für diese Studie wurde eine Auflösung von $20\ \mu m$ gewählt und zunächst ein *Prescan* gestartet, um den tatsächlichen Messbereich aus Zeitgründen zu minimieren, indem mit der Maus ein Raster über die Probe gezogen wird, in dem die Kamera die Probe abfahren soll. Mit „Mosaik“ startet die *c*-Achsen-Messung (Abbildung 12, links).

4 Analysemethoden

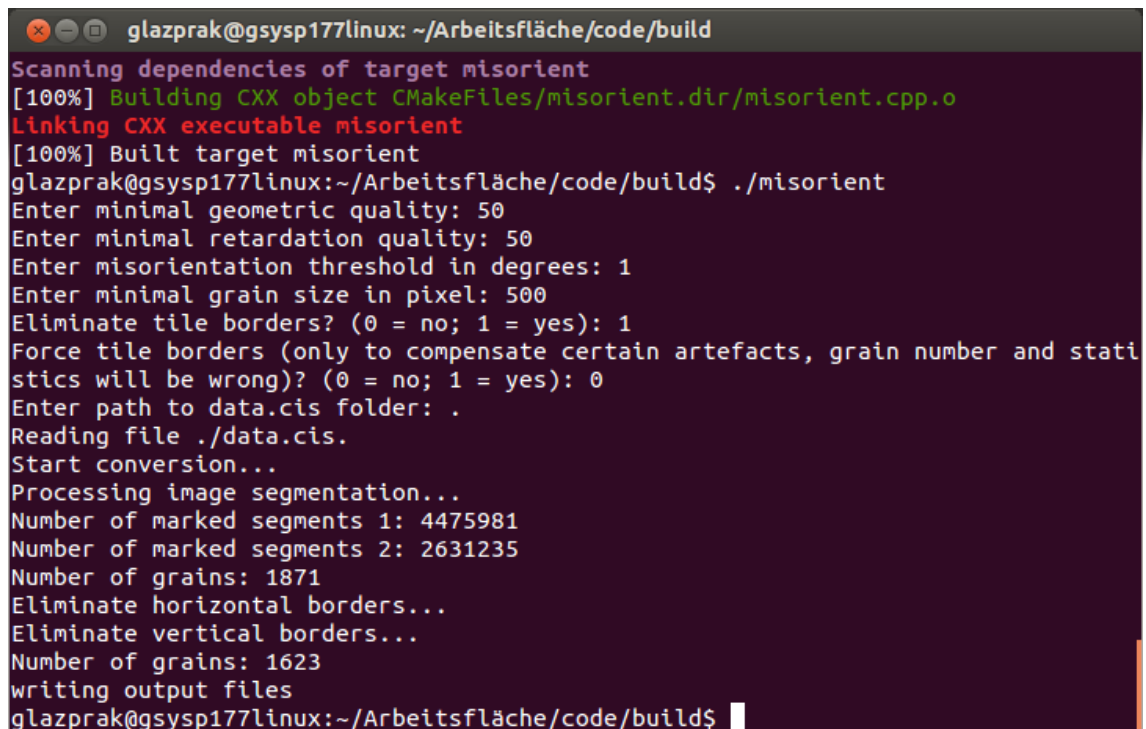
4.1 *cAxes* und *Running Mean*-Programm

4.1.1 Ziel

Die Mikrostrukturanalyse setzt sich aus zwei Programmen zusammen, dem *cAxes* und dem *Running Mean*-Programm (programmiert in C++ von Jan Eichler, AWI). Aufgabe des *cAxes*-Programms ist es eine Kornsegmentierung durchzuführen und für die einzelnen Dünnschnitten eine Körnerstatistik zu erstellen. Ziel des *Running Mean*-Programms ist es mittels eines gleitenden Mittelwerts eine höhere Auflösung der Korngrößen- und Kristallorientierungen auf Basis der Körnerstatistik zu erhalten, die so genau wie möglich die Mikrostruktur im Eis wiedergeben sollen.

4.1.2 Funktionsweise

Das *cAxes*-Programm liest die beiden vom *Fabric Analyser* produzierten Dateien „data.cis“ und „info.txt“ ein. Azimuth und Colatitude werden in ein kartesisches Koordinatensystem überführt. Es wird ein *vector-image* erstellt mit drei Ebenen für x, y und z. Zu diesem *vector-image* werden drei Parametereinstellungen (Abbildung 13) vorgenommen: Die maximale Missorientierung, die minimale Korngröße und der Qualitätsfaktor. Anhand der maximalen Missorientierung, die von einem Pixel zu seinem Nachbarpixel 1° beträgt, werden die Nachbarpixel, deren Missorientierung kleiner gleich 1° ist, zu einem Korn zusammengefasst, das heißt, die Flächen dieser Nachbarpixel werden zu einer Gesamtfläche addiert, die die Fläche des Kornes ergeben. Körner, die kleiner sind als die minimale Korngröße (= 500 Pixel), werden nicht berücksichtigt ebenso wenig wie Pixel mit schlechter Qualität.



```
glazprak@gsysp177linux: ~/Arbeitsfläche/code/build
Scanning dependencies of target misorient
[100%] Building CXX object CMakeFiles/misorient.dir/misorient.cpp.o
Linking CXX executable misorient
[100%] Built target misorient
glazprak@gsysp177linux:~/Arbeitsfläche/code/build$ ./misorient
Enter minimal geometric quality: 50
Enter minimal retardation quality: 50
Enter misorientation threshold in degrees: 1
Enter minimal grain size in pixel: 500
Eliminate tile borders? (0 = no; 1 = yes): 1
Force tile borders (only to compensate certain artefacts, grain number and statistics will be wrong)? (0 = no; 1 = yes): 0
Enter path to data.cis folder: .
Reading file ./data.cis.
Start conversion...
Processing image segmentation...
Number of marked segments 1: 4475981
Number of marked segments 2: 2631235
Number of grains: 1871
Eliminate horizontal borders...
Eliminate vertical borders...
Number of grains: 1623
writing output files
glazprak@gsysp177linux:~/Arbeitsfläche/code/build$
```

Abbildung 13: In diesem Fenster werden die Qualitätsangaben gemacht, mit denen die Kornsegmentierung durchgeführt wird

Die verbliebenen Segmente werden nummeriert und als Körner betrachtet. Dazu wird das Bild „grains.png“ erstellt und gespeichert. In der Körnerstatistik wird die Mittlere Orientierung, die Position und die Größe bestimmt und in der Datei „output.txt“ gespeichert. Dieser *output* ist der *input* für die *Running Mean*-Analyse, in der mit Angaben zur *Framehöhe*, *Schrittweite* und *Abstand zum Rand* die Körnerstatistik gesamt wird und eine Statistik für *Sektionen* und *Bags* erzeugt werden kann, die in der Datei „runningmean.txt“ gespeichert wird. Um eine *Running Mean*-Analyse durchzuführen bedarf es dreier Schritte, die in Abbildung 14 visualisiert sind.

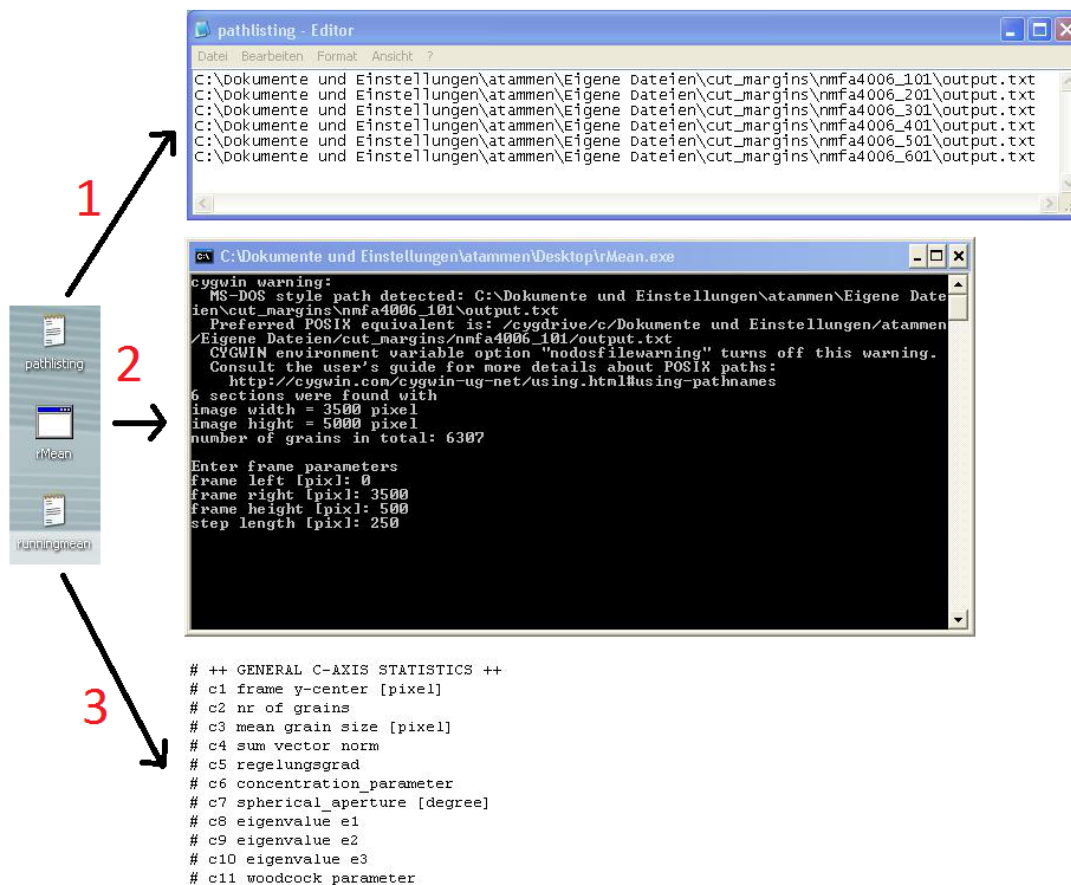


Abbildung 14: *Running Mean* Anwendung: (1) *pathlisting*, (2) *rMean*, (3) *c*-Achsen-Statistik

Schritt 1 ist das *pathlisting*: Über Pfadangaben werden hier alle Dünnschnitte aufgezählt, die bei der Running Mean Analyse aneindergereiht werden sollen. Für diese Arbeit habe ich immer sechs Sektionen gewählt, die einem Bag entsprechen. In **Schritt 2** werden Angaben zu den Parametern gemacht: Rand links ist der Rand in Pixel von dem linken Bildrand zur Probe, Rand rechts ist der Rand in Pixel von der Probe zum rechten Bildrand. Wenn kein Rand weggeschnitten werden soll, werden für Rand links 0 Pixel und für Rand rechts 3500 Pixel angegeben. Sollte nun ein Rand von 250 Pixel abgezogen werden, müssten für Rand rechts dementsprechend 250 Pixel und für Rand links $3500 \text{ Pixel} - 250 \text{ Pixel} = 3250 \text{ Pixel}$ angegeben werden. Für die *Framehöhe* werden 500 Pixel (= 1 cm) und für die *Schrittweite* 250 Pixel (= 5 mm) angegeben. Je kleiner die *Framehöhe* gewählt wird, desto größer ist die Auflösung, weil ein kleinerer Bereich gemittelt wird (Abbildung 15, (a) und (b)). Die *Schrittweite* sollte maximal so groß sein wie die *Framehöhe*, damit keine Lücken entstehen. Hier gilt ebenso, je kleiner die *Schrittweite*, desto höher die Auflösung, da sich die Fenster mehr überlappen und jedes Korn auch noch einmal mit Körnern in anderen Nachbarbereichen gemittelt worden ist (Abbildung 15, (c) und (d)). Die für jedes Fenster berechneten Mittelwerte für alle statistischen Parameter werden in **Schritt 3** in „runningmean.txt“ in den entsprechenden Spalten aufgelistet.

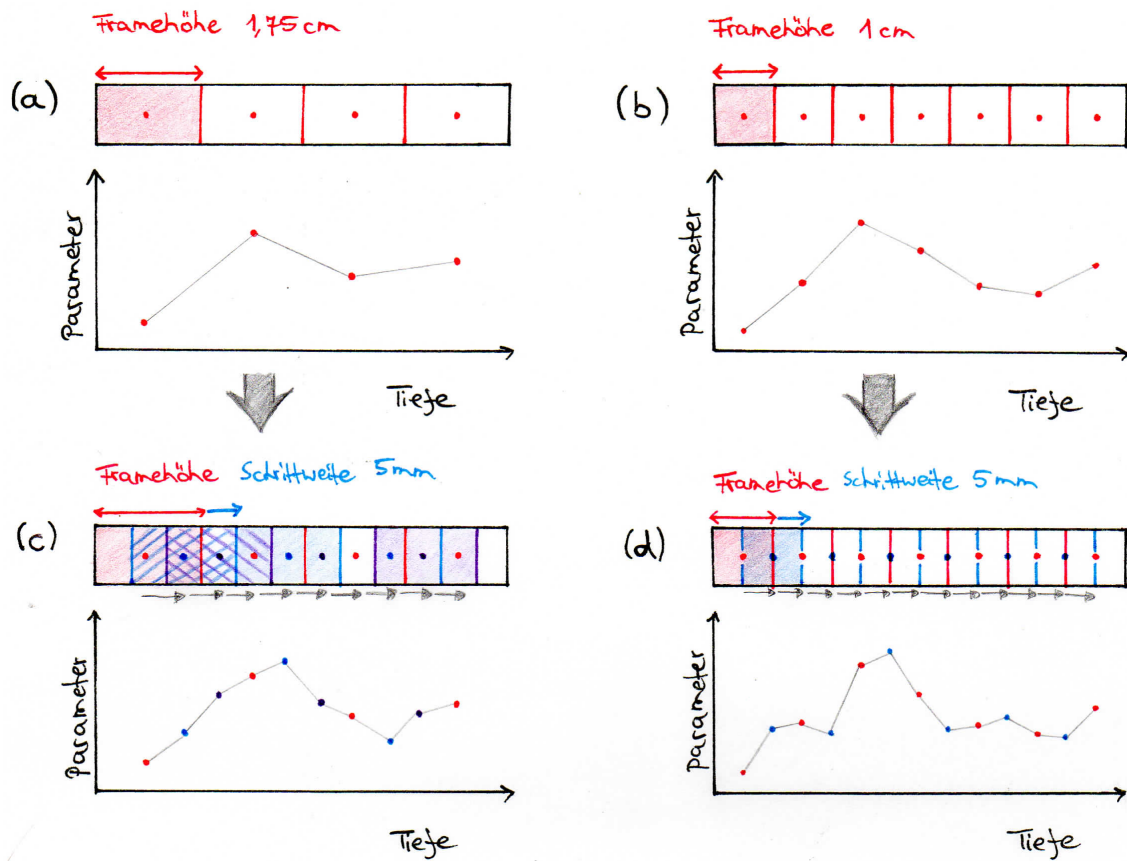


Abbildung 15: Auflösungsunterschiede bei *Framehöhe* und *Schrittweite*. Oben ist immer der Kern mit der entsprechenden *Framehöhe* und *Schrittweite* dargestellt, unten wird der dazugehörige Graph geplotet. (a) eine gewählte *Framehöhe* von 1,75 cm über einen 7 cm langen Kern. Der *Frame* ist der rote Rahmen, der Mittelwert wird in der Mitte des *Frames* als roter Punkt geplotet. (b) eine gewählte *Framehöhe* von 1 cm. Bei kleineren *Frames* werden Mittelwerte von kleineren Bereichen genommen. Somit hat man im Vergleich zu (a) eine höhere Auflösung. (c) Der in (a) gewählte *Frame* wird mit einer *Schrittweite* von 5 mm über die Kernlänge bewegt. Dadurch überlappen sich die weiterbewegten *Frames*. Diese Bereiche sind schraffiert. Die zusätzlich zu dem roten Rahmen gewählten Farben blau und violett sollen zeigen, dass deren Mittelwerte durch die gewählte *Schrittweite* noch zusätzlich zu dem roten Mittelwert hinzukommen. Durch die Berechnung des Mittelwertes in mehreren Bereichen erhöht sich die Auflösung. (d) Der in (b) gewählte *Frame* wird mit einer *Schrittweite* von 5 mm über die Kernlänge bewegt. Dadurch kommt ein weiterer Mittelwert, in blau gekennzeichnet, zu dem roten hinzu. Durch die Kombination von kleiner *Framehöhe* und kleiner *Schrittweite* erhält man die höchste Auflösung, da zum einen von kleineren Bereichen und zusätzlich von sich überlappenden Bereichen Mittelwerte genommen werden.

4.1.3 *cAxes* versus *Fabric Analyser G50*

Eine Frage, die sich stellt, ist, wie gut die Kornsegmentierung anhand der Missorientierung in dem *cAxes*-Programm (noch vor der eigentlichen *Running Mean*-Analyse) funktioniert. Dafür wird ein „grains.png“ Bild (Abbildung 16 links) von der Körnerstatistik mit einem „trend.bmp“ Bild (Abbildung 16 rechts) vom *Fabric Analyser G50* verglichen und überprüft, in wie weit die Körner miteinander übereinstimmen.

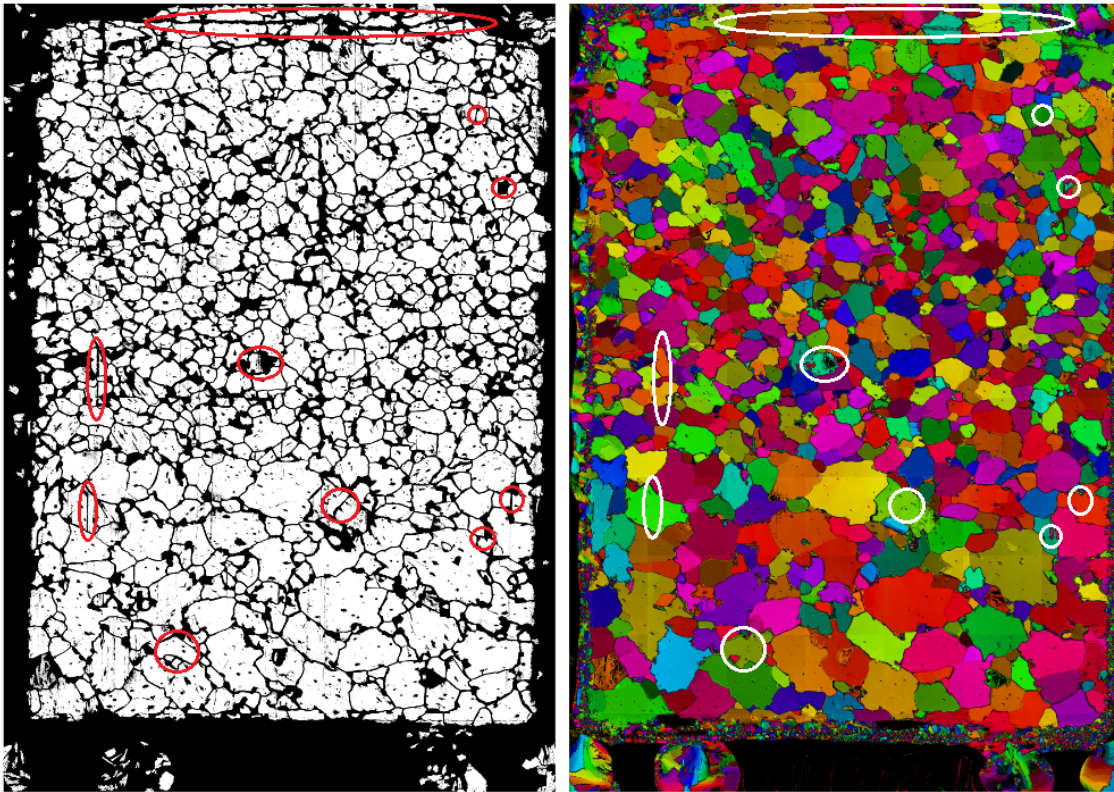


Abbildung 16: Vergleich von „grains.png“ (links) als Ergebnis aus dem *cAxes*-Programm mit „trend.bmp“ (rechts) als Ergebnis aus dem *Fabric Analyser G50* der Probe *nm.fa.1227_101*. Die roten Kreise im „grains“-Bild markieren Körner- und Korngrenzenunterschiede im Vergleich zu den weißen Kreisen im „trend“-Bild. Legende zum „trend.bmp“ in Abbildung 17

Auf den ersten Blick fallen keine großen Unterschiede auf. Links wie rechts ist zu beobachten, dass eher kleinere Körner im oberen Teil des Bildes ab der Mitte des Bildes abrupt in größere Körner übergehen. Was auf den zweiten Blick deutlich zu erkennen ist, ist, dass die Randbereiche sich stark unterscheiden. Vom *Fabric Analyser* erkannte Körner sind im „grains.png“ nicht mehr zu sehen, was an der strengeren Qualitätskontrolle liegen mag. Für die eigentliche Korngrößen- und *c*-Achsenanalyse der Probe sind diese Körner allerdings störend, da sie nicht von der Probe, sondern von dem Klebstoff Wasser stammen. Ansonsten fällt noch auf, dass das „grains“-Bild mehr schwarze Stellen in der Probe hat als das „trend“-Bild, was ebenfalls an der Qualitätskontrolle liegt, da Pixel mit schlechter Qualität schwarz gezeichnet werden. Breitere Korngrenzen führen allerdings zu kleineren Körnern. Die interessanten Stellen sind im „grains.png“ als rote Kreise, im „trend.bmp“ als weiße Kreise markiert. In diesen Kreisen kann man im „grains.png“-Bild Korngrenzen erkennen, die auf dem „trend“-Bild vom *Fabric Analyser* nicht auszumachen sind. Hier wurden mögliche Subkorngrenzen, aber auch Ketten von Pixeln schlechter Qualität als Korngren-



Abbildung 17: Legende zu den Trendbildern (auch in den *Bag Plots*). Die *c*-Achsen der roten Körner liegen parallel zur Eiskernlängsachse

zen interpretiert. So ist anzunehmen, dass durch mehr gezogene Korngrenzen und damit verbundenen kleineren Körnern dies auch in der Statistik der Mittleren Korngröße zu niedrigeren Werten führt. Ein weiterer Fehler der „grains“-Darstellung ist, dass vom Mikrotom erzeugte Schleifspuren, die an ihrem geraden Verlauf durch die Probe zu erkennen sind, als Korngrenzen interpretiert werden.

4.2 *Plot*-Programm

4.2.1 Ziel

Ziel des *Plot*-Programms ist es die wichtigsten Ergebnisse der *Running Mean*-Analyse einheitlich widerzugeben und vergleichbar zu machen. Zum einen soll untersucht werden, ob das *Running Mean*-Programm realistische Ergebnisse oder Artefakte erzeugt, indem der Kurvenverlauf mit dahintergelegten Bildern verglichen wird, zum anderen, ob es Zusammenhänge zwischen der Orientierung der *c*-Achsen und der Korngröße gibt mittels Korrelation. Es werden nur vollständige Bags geplottet, weshalb die Plots „BagPlot“ heißen.

Für das *Plot*-Programm wurde die frei verfügbare Programmiersprache *R* gewählt, weil *R* sich besonders gut für statistische Anwendungen eignet.

4.2.2 Funktionsweise

In dem *BagPlot*-Programm (Anhang) muss zuerst der Pfad der einzulesenden Textdatei „runningmean.txt“ angegeben werden. Dann werden Angaben zu den Eigenschaften der „runningmean.txt“-Datei gemacht. Angegeben werden die Dünnschnittnummern und die Bagnummer, anhand derer die *Toptiefe* und die *Bottomtiefe* ausgerechnet werden; dann werden die für die vorangegangene *Running Mean*-Analyse eingestellten Parameter *Rand*, *Framehöhe* und *Schrittweite* eingegeben und schließlich noch in *mm* umgerechnet. Diese Angaben werden in die Überschrift des Plots eingefügt. Danach werden die Spalten der eingelesenen „runningmean.txt“-Datei benannt und die in Pixel angegebenen Spalten *Frameycenter* (= der Ort eines jeden berechneten Mittelwertes in der Probe) in *cm* und *m* und die Korngröße in mm^2 umgerechnet. Die absolute Tiefe berechnet sich durch den *Frameycenter* in *m* plus die *Toptiefe*, die aus der Bagnummer berechnet wird. Diese Umrechnungen sind wichtig, um die Werte in der für sie relevanten Maßeinheit zu ploten. Darauf folgen Einstellungen zu dem Gesamtbild des Plots, zum Beispiel das vier Plots in eine Spalte geplottet werden sollen (*mfrow*), wie groß der Rand um den gesamten Plot sein soll (*oma*), damit noch Platz für Über- und Überunterschriften ist, wie groß der Abstand der Achsenbeschriftungen (*mgp*) und wie groß der Platz um jeden einzelnen Plot (*mar*) sein soll. Schließlich werden die jeweiligen Hintergrundbilder eingelesen und die statistischen Parameter als Linien geplottet. Für alle statistischen Parameter wurde die *y*-Achse variabel eingestellt, damit die Werte in voller Größe dargestellt werden, bis auf den Woodcockparameter, der von 0 bis 5 begrenzt ist, damit besser erkennbar ist, ob er sich über oder unter der Gürtelverteilungsgrenze befindet, die als graue gestrichelte Linie dargestellt wird. Für die Bildunterschrift wurden die Korrelationswerte (Korrelation nach Pearson) aller statistischen Parameter mit der Mittleren Korngröße eingefügt.

4.2.3 Aufbau eines *BagPlots*

Jeder *BagPlot* besteht aus einer Überschrift, in der in der ersten Zeile die Dünnschnittnummer, die Top-Tiefe und die Bottom-Tiefe in m und in einer zweiten Zeile die *Running Mean*-Analyse-Einstellungen zu Rand, *Framehöhe* und Schrittweite in Pixeln wie in mm angegeben werden.

Im ersten Plot ist die Mittlere Korngröße in $[mm^2]$ in rot und die Anzahl der Körner in blau abgebildet. Die Legende hierzu befindet sich in der rechten oberen Ecke. Die Achse der Mittleren Korngröße befindet sich auf der linken Seite, die der Anzahl der Körner auf der rechten. Durch die variabel angepassten Achsen bekommt man gleich einen Eindruck von dem Bereich, in dem sich die Mittlere Korngröße und die Anzahl der Körner befinden. Für die Anzahl der Körner ist dies besonders nützlich, weil schon grob die statistische Relevanz eingeschätzt werden kann. Auf der oberen x-Achse ist die Bag Tiefe in cm angegeben, damit schneller erkennbar ist, in welcher Tiefe man sich in der Probe befindet, die immer 55 cm lang ist. Das hinterlegte „grains.png“-Panoramabild, das aus den sechs einzelnen „grains.png“-Sektionsbildern zusammengesetzt ist, soll die Kurven untermauern. Weiße Flächen stellen Körner dar, schwarze Korngrenzen.

Nun folgen nur noch Plots, die für die Orientierung der c -Achsen relevant sind. Gleich unter dem ersten Plot folgt die Darstellung des Eigenwerts E3 in schwarz. Ein „trend“-Panoramabild (Legende in Abbildung 17 auf Seite 20) soll diese Kurve bestätigen. Auf der unteren x-Achse ist die absolute Tiefe in m dargestellt.

Beim dritten Plot sind der Regelungsgrad in $[\%]$ in grün auf der linken y-Achse und die Sphärische Apertur in $[\circ]$ in orange auf der rechten y-Achse aufgezeichnet. Die Legende befindet sich ebenfalls in der rechten oberen Ecke. Für die letzten drei Parameter lassen die variablen y-Achsen grobe Schlüsse auf die Verteilung der c -Achsen zu.

Der vierte und letzte Plot ist der Woodcockparameter in violett, der als einziger statistischer Parameter von 0 bis 5 begrenzt ist, damit besser erkennbar ist, ob sich die Kurve unter oder über der Gürtelverteilungsgrenze, die als grau gestrichelte Linie bei eins markiert ist, liegt. Auf der unteren x-Achse ist für die Übersichtlichkeit nochmals die absolute Tiefe abgebildet.

Nun folgt nur noch die Unterüberschrift, in der in der ersten Zeile die Korrelationswerte von der Mittleren Korngröße und den Eigenwerten, in der zweiten Zeile die Korrelationswerte von Mittlerer Korngröße und Sphärischer Apertur und Regelungsgrad und in der dritten Zeile die Korrelationswerte von Mittlerer Korngröße und dem Woodcockparameter aufgeführt werden.

5 Ergebnisse

5.1 Vorläufiges Ergebnis

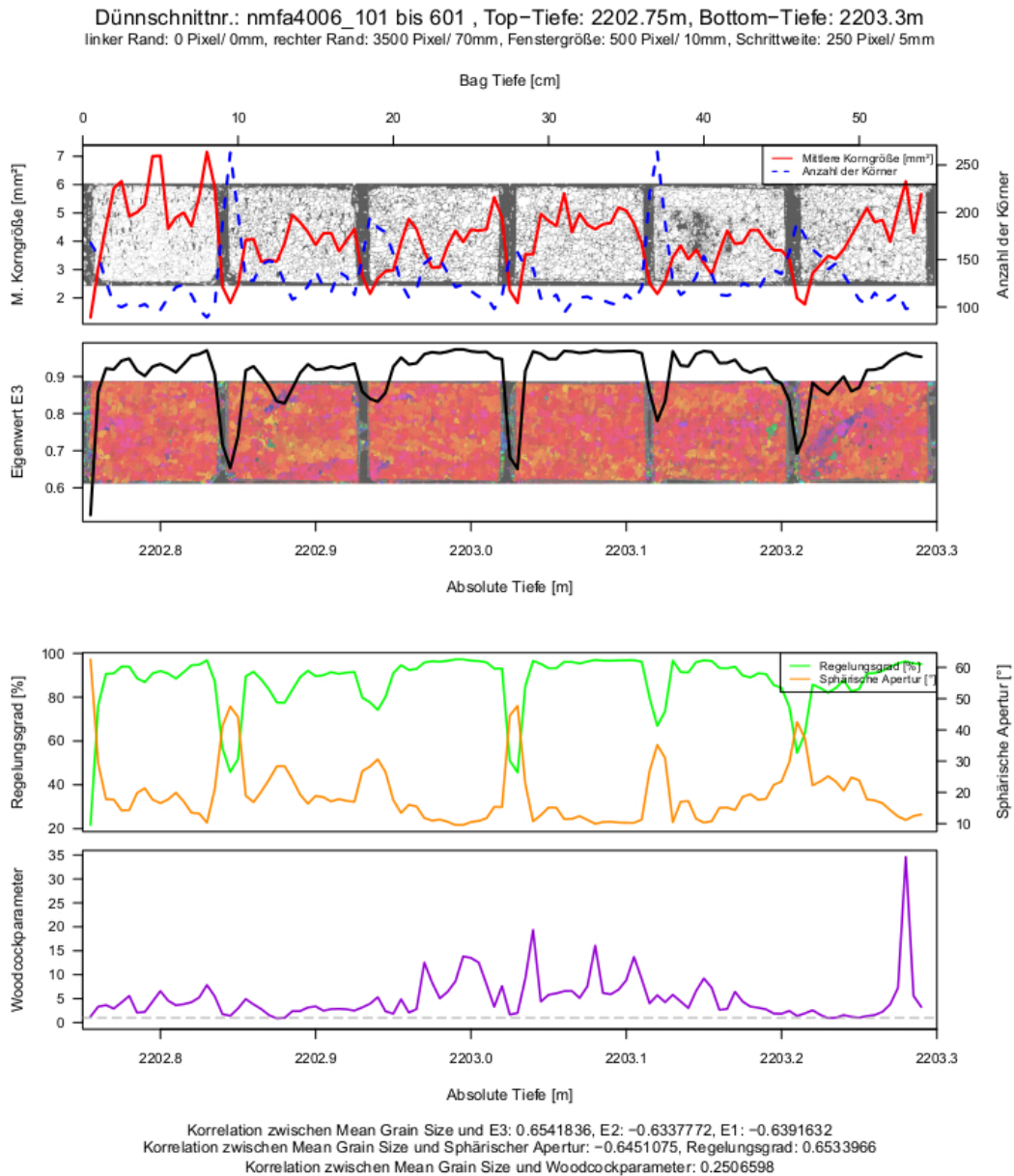


Abbildung 18: Probe nmfa 4006 zeigt bei Verwendung der originalen Proben in allen Kurven bis auf die des Woodcockparameters eine deutliche Boxstruktur mit einer Wellenlänge von ungefähr 9 cm. Legende zum hinterlegten Trendbild in Abbildung 17 auf Seite 20

Bei den ersten *BagPlots* ist ein Muster aufgefallen, das im Extremfall wie Boxen aussieht und deshalb als „Boxstruktur“ bezeichnet wird (Abbildung 18). Diese Boxstruktur hat eine ziemlich regelmäßige Wellenlänge von ungefähr 9 cm. Da dies genau die Länge eine

Dünnschnitts ist, wurde vermutet, dass es an den Randbereichen der Bilder liegen muss, ein Artefakt, das entweder das Programm beim Aneinanderreihen der Bilder erzeugt oder die Proben selbst erzeugen. Nachdem zunächst Fehlerquellen des Programms ausgeschlossen werden konnten, wurden schließlich die Randkörner der Proben in y-Richtung manuell aus den Textdateien anhand der Probenrandpixelwerte, die in einem Bildanzeigeprogramm wie Irfan View abzulesen sind, gelöscht. Damit wurde die „Boxstruktur“ erfolgreich entfernt.

Grund für diese Boxstruktur sind die Körner, die nicht zu der eigentlichen Eisprobe dazugehören, sondern durch das Wasser entstehen, mit dem die Probe auf den Probenträger festgeklebt wird. Durch ihre nicht der Probe angepassten Korngröße und Einregelung haben sie den Mittelwert in den Randbereichen der Probe beeinflusst. Nun wurde von Jan Eichler das Programm *cAxes* zur Erstellung der Textdatei so ergänzt, dass in den äußersten Kacheln, in denen das Programm Zeile für Zeile durchläuft, alle Zeilen schwarz gezeichnet werden, die weniger als 50% weiße Pixel haben. Ab $\geq 50\%$ werden die weißen Pixel zu Körnern hinzugefügt. So werden alle nicht zur Probe gehörigen Körner automatisch in jeder Probe gelöscht (Abbildung 19).

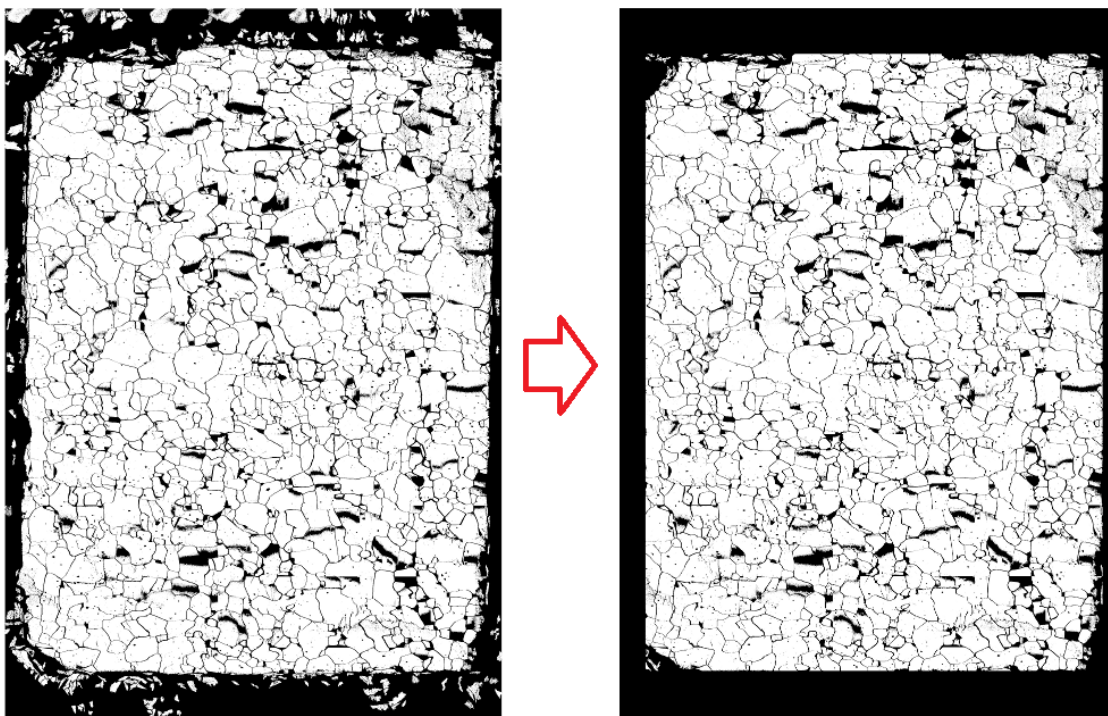


Abbildung 19: Links das grains.png mit Nicht-Probenkörnern wird zu grains_bw.png ohne Nicht-Probenkörner rechts umgewandelt

Eine Fehlerquelle kann allerdings trotz Korrektur noch nicht behoben werden: Die von der Probe abgeschnittenen Randkörner, die in der Mittleren Korngröße immer noch ein Einknicken der Kurve verursachen.

5.2 Korrigierte Ergebnisse

Um den Kurvenverlauf besser mit der Struktur vergleichen zu können, wurde eine Framehöhe von 1 cm und eine Schrittweite von 5 mm gewählt.

5.2.1 Probe nmfa 1227

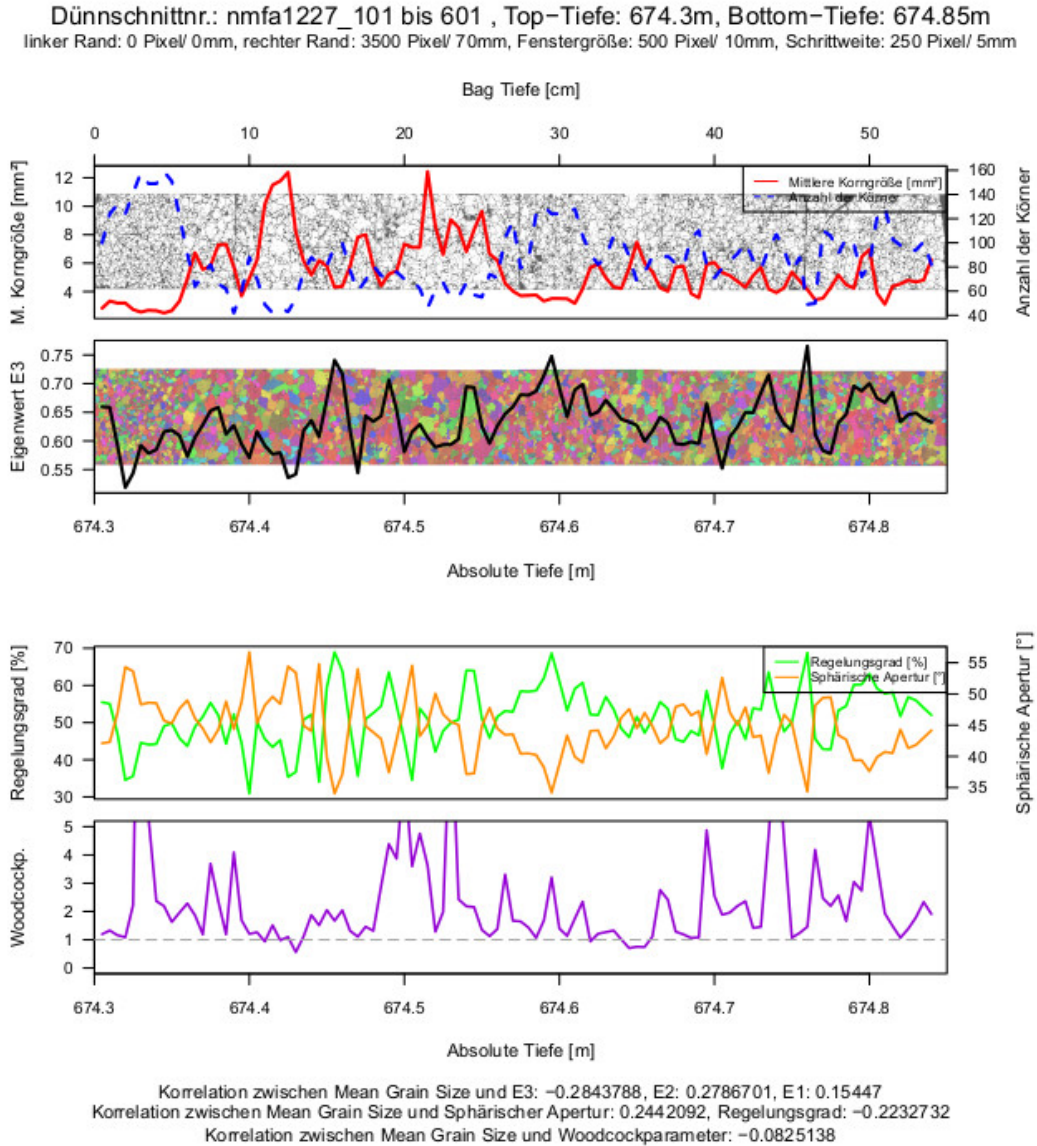


Abbildung 20: BagPlot nmfa 1227. Legende zum hinterlegten Trendbild in Abbildung 17 auf Seite 20

Die Probe nmfa1227 stammt aus einer Tiefe von $674,3\text{ m}$ bis $674,85\text{ m}$. Die Mittlere Korngröße schwankt zwischen 2 und 12 mm^2 . Von 0 bis 5 cm ($674,3$ bis $674,35\text{ m}$) ist sie

am niedrigsten zwischen 2 und 4 mm^2 , dann steigt sie an und hat bei 12 cm (674,42 m) ihre Höhepunkte mit 12 mm^2 . Ab 26 cm (674,56 m) pendelt die Mittlere Korngröße zwischen 4 und 7 mm^2 . Für einen Mittelwert pro Frame werden 40 bis 160 Körner verwendet. Die Anzahl der Körner verhält sich umgekehrt zur Mittleren Korngröße. Sind die Körner groß, befinden sich nur wenige Körner in einem Frame, sind sie klein, sind es viele. An den Sektionsgrenzen sinkt die Mittlere Korngröße generell, da die Körner dort angeschnitten sind und somit im Vergleich zu den Sektionen kleiner.

Der Eigenwert E3 schwankt zwischen 0,50 und 0,76. Bis 13 cm geht er nicht über 0,65 hinaus. Ab da steigt er bis 0,72 an. Von 15 bis 30 cm wechseln sich kleinere Peaks bis 0,65 mit höheren Peaks bis 0,74 ab. Nach 30 cm sinken die Werte bis 0,55 bei 40 cm, um danach auf 0,76 bei 45 cm anzusteigen. Bei 47 cm gibt es noch einmal einen Abfall auf 0,60, danach ist der Eigenwert recht stabil zwischen 0,62 und 0,67.

Der Regelungsgrad hat im Prinzip den gleichen Verlauf wie der Eigenwert E3, nur wird hier ausgedrückt, wie gut die c-Achsen eingeregelt sind. Er schwankt zwischen 30 und 70 %. Bis 13 cm schwankt er zwischen 30 und 55 %, bei 15 cm erreicht er ein Maximum von 65 % und pendelt ab da zwischen 35 und 60 %. Danach, also ab 23 cm, schwankt er zwischen 45 und 70 % bis zum Ende.

Die Sphärische Apertur verhält sich genau umgekehrt wie der Regelungsgrad. Sie schwankt zwischen 35 und 55° .

Der Woodcockparameter erreicht bei 12 cm und 35 cm eine Gürtelverteilung. Er ist von 0 bis 10 cm eher größer, von 10 bis 18 cm eher kleiner, von 18 bis 22 cm wieder eher größer und von 22 bis 38 cm eher wieder kleiner und schließlich wieder relativ größer. Er ist ziemlich oft sehr nah an der Grenze zur Gürtelverteilung und generell mit seinen Maxima auch niedrig im Vergleich zu den beiden Proben nmfa 3356 und nmfa 4006.

5.2.2 Probe nmfa 1866

Die Probe nmfa 1866 stammt aus einer Tiefe von 1025,75 m bis 1026,3 m. In einem Frame befinden sich 10 bis 150 Körner. Die Mittlere Korngröße schwankt zwischen 2 und 16 mm^2 . Von 0 cm (1025,75 m) bis 17 cm (1025,93 m) sind die Körner relativ groß und pendeln sehr stark zwischen 4 und 11 mm^2 , das größte Maximum erreicht 16 mm^2 . Ab 17 cm (1025,93 m) werden die Körner kleiner bis zu einer Größe von 3 mm^2 bis 23 cm (1025,98 m). Zwischen 23 und 28 cm steigt die Korngröße mit zwei Maxima auf 9 und 12 mm^2 an. Ab da fällt die Korngröße wieder und bleibt bis 55 cm sehr niedrig. Von 28 bis 35 cm schwankt sie zwischen 2 und 5 mm^2 , ein kleiner Anstieg ist von 35 cm bis 40 cm zu verzeichnen mit einer Korngröße von 4 bis 7 mm^2 , danach bleibt sie wieder sehr klein zwischen 2 und 5 mm^2 . Die Körner sind also ab 28 cm nur halb so groß wie vorher.

Der Eigenwert E3 hat einen Schwankungsbereich von 0,45 bis 0,83. Von 0 bis 12 cm (1025,87 m) schwankt er zwischen 0,65 und 0,8. Bei 13 cm (1025,8 m) ergibt sich das größte Minimum mit 0,43. Danach steigt der Eigenwert E3 wieder an und pendelt von 13 cm bis 27 cm zwischen 0,65 und 0,83, ab 27 cm bis 44 cm nur sehr gering zwischen 0,65 und 0,72, dann steigt er wieder an auf 0,8 bei 45 bis 48 cm und sinkt bis 0,75 bei 55 cm.

Dünnschnittnr.: nmfa1866_101 bis 601 , Top-Tiefe: 1025.75m, Bottom-Tiefe: 1026.3m
 linker Rand: 0 Pixel/ 0mm, rechter Rand: 3500 Pixel/ 70mm, Fenstergröße: 500 Pixel/ 10mm, Schrittweite: 250 Pixel/ 5mm

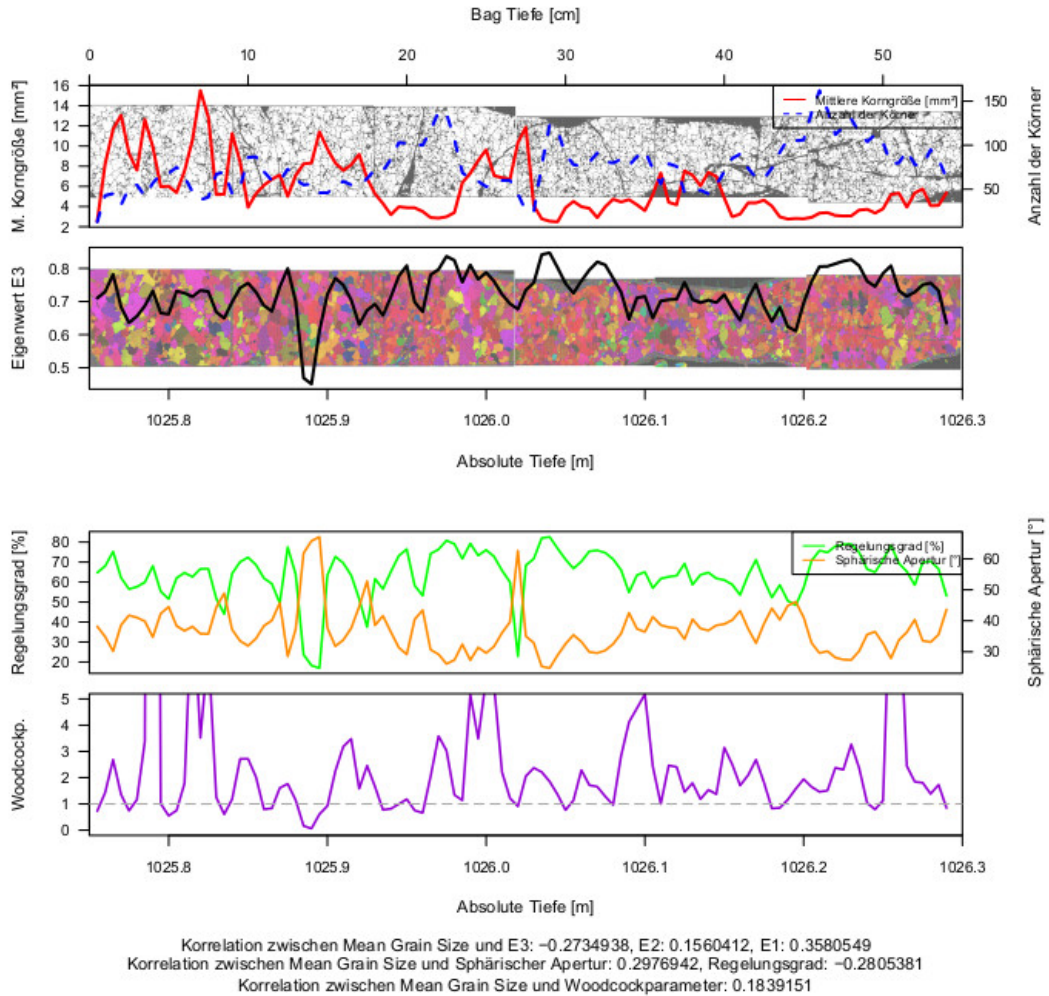


Abbildung 21: BagPlot nmfa 1866. Legende zum hinterlegten Trendbild in Abbildung 17 auf Seite 20

Der Regelungsgrad schwankt zwischen 18 und 80 %. Normalerweise gleicht seine Kurve der des Eigenwert E3, hier gibt es jedoch ein paar Unterschiede. Manche Minima und Maxima fallen breiter aus oder werden in ihrer Amplitude verstärkt. Der Regelungsgrad pendelt hauptsächlich zwischen 50 und 80 % und hat zwei große Minima bei 1025,8 m mit 18 % und bei 1026,2 m mit 25 %.

Die Sphärische Apertur verhält sich genau umgekehrt und schwankt zwischen 25 und 65 °. Hauptsächlich pendelt sie zwischen 25 und 45 °, ihre Maxima liegen bei den Minima des Regelungsgrades mit 65 ° bei 1025,8 m und mit 60 ° bei 1026,2 m.

Der Woodcockparameter zeigt hier nur recht kleine Maxima, meistens pendelt er zwischen

0 und 3. Seine Minima unterschreiten häufig die Gürtelverteilungslinie.

5.2.3 Probe nmfa 3356

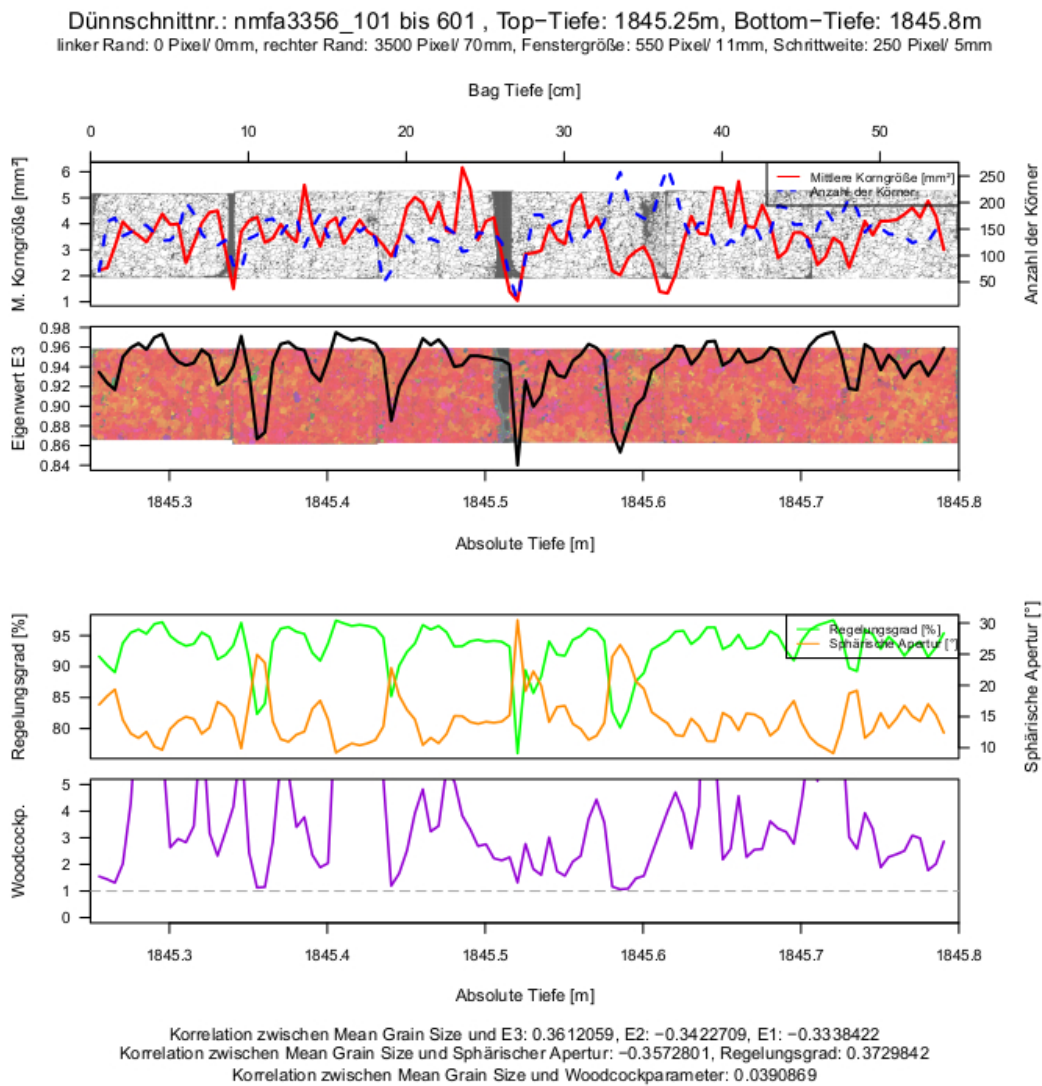


Abbildung 22: BagPlot nmfa 3356. Legende zum hinterlegten Trendbild in Abbildung 17 auf Seite 20

Die Probe stammt aus einer Tiefe von 1845,25 m bis 1845,8 m. Die Anzahl der Körner beträgt 50 bis 250 pro Frame. Die Mittlere Korngröße schwankt zwischen 1 bis 6 mm². Die sehr niedrigen Korngrößen kommen durch breitere Brüche im Eiskern zustande. Generell lässt sich hier besonders deutlich eine Periodizität erkennen, bei der die Mittlere Korngröße in den Sektionsgrenzen fällt. Nimmt man die starken Minima in den Lücken heraus, scheint die Mittlere Korngröße recht stabil zwischen 3 und 4 mm² bis 19 cm (1845,44 m), dann steigt die Korngröße auf 5 mm² an und schwankt zwischen 4 und

6 mm^2 . Bei 24 cm ist der Höhepunkt mit 6 mm^2 erreicht. Durch den großen Bruch bei 26 cm fällt die Mittlere Korngröße auf 1 mm^2 , wo vermutlich nur ein Korn ganz gering angeschnitten wurde. Danach steigt sie auf 5 mm^2 bei 31 cm an, dann sinkt sie bei 36 cm bis unter 2 mm^2 , ist bei 40 cm mit 5 mm^2 wieder recht hoch, sinkt bei ca. 45 cm auf $2,5$ bis $3,5\text{ mm}^2$ und bei 48 cm bis 54 cm ist sie recht konstant bei $4,2\text{ mm}^2$.

Der Eigenwert E3 beträgt $0,84$ bis $0,98$ und ist damit schon deutlich größer als in den Proben nmfa 1227 und nmfa 1866. Auch der Schwankungsbereich ist nicht mehr so groß ($0,35 \rightarrow 0,14$). Das untermauert das hinterlegte Trendbild, das jetzt doch schon recht einfarbig rot wirkt. Im Prinzip ist der Eigenwert E3 ziemlich konstant zwischen $0,94$ und $0,97$, bricht aber bei 11 cm , 19 cm , 27 cm und 33 bis 35 cm heftig zu starken Minima ein, die Werte von $0,84$ bis $0,88$ haben.

Entsprechend ist der Regelungsgrad ziemlich hoch mit 75 bis 95% . So ist er wie der Eigenwert E3 recht konstant zwischen 90 und 95% und hat vier tiefere Einschnitte, die bis zu 80% heruntergehen. Die 90 bis 95% sind eine fast perfekte Einregelung und wird bis $1845,6\text{ m}$ halbwegs periodisch innerhalb der Sektionen zum Einsturz gebracht. Die Sphärische Apertur genau entgegengesetzt beträgt 10 bis 30° , was sehr gering ist.

Der Woodcockparameter kommt zwar sehr oft ziemlich nah an die Gürtelverteilungsgrenze heran, unterschreitet sie aber nie. Die Maxima scheinen aber schon deutlich größer als in der vorigen Probe. Ein eher niedrigerer Bereich zeichnet sich zwischen $1845,5\text{ m}$ und $1845,6\text{ m}$ ab.

5.2.4 Probe nmfa 4006

Die Probe stammt aus einer Tiefe von $2202,75\text{ m}$ und $2203,3\text{ m}$. Die Anzahl der Körner beträgt zwischen 60 und 160 Körnern pro Frame. Die Mittlere Korngröße schwankt zwischen 2 und 8 mm^2 . Das kleinste Minimum mit 2 mm^2 und die zwei größten Maxima mit 7 bis 8 mm^2 befinden sich gleich zu Beginn in der ersten Sektion (0 bis 9 cm). Ab der zweiten Sektion bei 9 cm ($2202,84\text{ m}$) sind die Körner generell kleiner. Sie schwanken zwischen 3 und 5 mm^2 und haben kleinere Abfälle an den Sektionsgrenzen. Die Körner sind größer als in Probe nmfa 3356. Die Korngrößen sind in Probe nmfa 4006 sehr gleichmäßig und schwanken nicht mehr so heftig außer in der ersten Sektion.

Der Eigenwert E3 beträgt $0,84$ bis $0,98$ und ist damit ähnlich wie in Probe nmfa 3356. Der Eigenwert E3 ist insgesamt sehr hoch zwischen $0,93$ und $0,98$ und hat drei große Minima: Der erste zu Beginn bei $2202,75\text{ m}$ mit $0,9$, den dritten bei $2202,88\text{ m}$ mit $0,84$ und den dritten nach einer langen konstanten und homogenen Phase bei 47 bis 50 cm (Doppelminimum).

Der Regelungsgrad ist auch hier entsprechend hoch zwischen 80 und 97% . Das ist höher als in Probe nmfa 3356 und schwankt auch geringer ($20\% \rightarrow 17\%$). Die Kurvenbeschreibung ist dieselbe wie beim Eigenwert E3. Die Sphärische Apertur ist mit 8 bis 26° auch geringer als in Probe nmfa 3356. Die c-Achsen sind also noch stärker eingeregelt.

Dünnschnittnr.: nmfa4006_101 bis 601 , Top-Tiefe: 2202.75m, Bottom-Tiefe: 2203.3m
 linker Rand: 0 Pixel/ 0mm, rechter Rand: 3500 Pixel/ 70mm, Fenstergröße: 500 Pixel/ 10mm, Schrittweite: 250 Pixel/ 5mm

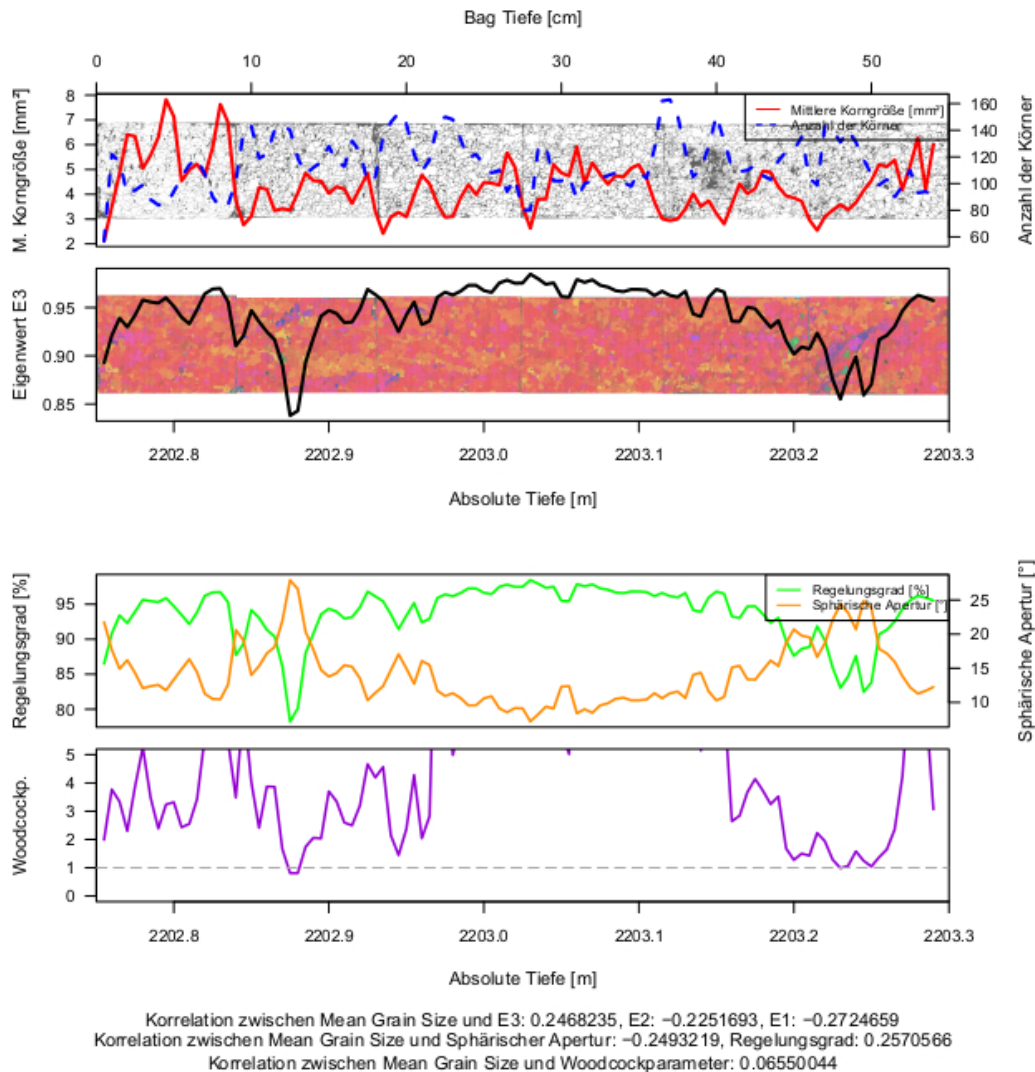


Abbildung 23: BagPlot nmfa 4006. Legende zum hinterlegten Trendbild in Abbildung 17 auf Seite 20

Der Woodcockparameter bleibt erst einmal recht hoch, die Minima sind minimal bei 2. Erst bei 2202,88 m, wo auch der Regelungsgrad stark abfällt, gleitet der Woodcockparameter unter die Gürtelverteilungsgrenze. Danach steigt er etwas an und zwischen 2202,97 und 2203,15 m ist er sehr hoch, wo auch der Regelungsgrad sehr hoch und konstant ist. Dann sinkt er wieder und kommt bei dem Doppelminimum bei 2203,24 m der Gürtelverteilung sehr nahe. Hier scheint ein geringer Eigenwert E3 direkt gekoppelt mit einer Gürtelverteilung. Ab 2203,26 m steigt der Woodcockparameter wieder.

5.3 Korrelation von c-Achsen-Orientierung und Korngröße

Hier werden bei vier *Bags* in möglichst unterschiedlichen Tiefen der Eigenwert E3 mit der Mittleren Korngröße verglichen (Abbildung 24). Die Parameter für den *Running Mean* sind eine *Framehöhe* von 1 cm (außer Bagnummer 3356 mit 1,05 cm) und eine Schrittweite von 5 mm. Die rote Linie stellt die Mittlere Korngröße dar, die schwarze den Eigenwert E3. Für jeden *Bag* wurde der entsprechende Korrelationswert berechnet.

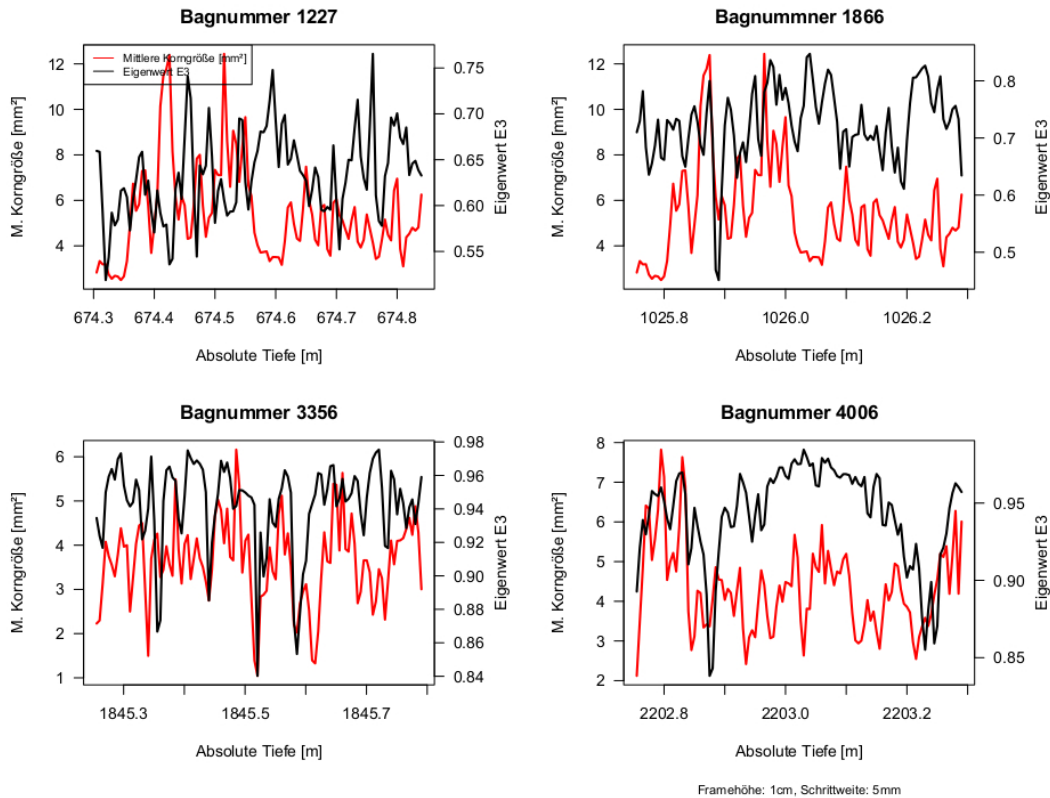


Abbildung 24: Es werden vier ausgewählte Proben gezeigt, in denen die Mittlere Korngröße und der Eigenwert E3 direkt miteinander verglichen werden. dazu wurden zu jeder Probe die Korrelationswerte berechnet und die Signifikanz bestimmt. Für alle Proben wurde eine *Framehöhe* von 1 cm und eine Schrittweite von 5 mm gewählt.

Bagnummer 1227: ($cor = -0,28$; $p - Wert = 0,002856$); Bagnummer 1866: ($cor = -0,27$; $p - Wert = 0,004184$); Bagnummer 3356: ($cor = 0,36$ $p - Wert = 0,0001227$); Bagnummer 4006: ($cor = 0,25$; $p - Wert = 0,01002$)

Bei Bagnummer 1227 scheinen die Mittlere Korngröße und der Eigenwert E3 nicht viele Gemeinsamkeiten zu haben. Meistens laufen die Kurven entgegengesetzt, ganz selten scheinen sie zu korrelieren. Dies wird durch einen Korrelationswert von -0,28 bestätigt. Auch bei Bagnummer 1866 handelt es sich mit einem Korrelationswert von -0,27 um eine schwache Antikorrelation. Ganz anders sieht es bei Bagnummer 3356 aus. Auf den ersten Blick laufen die beiden Kurven ziemlich synchron, was ein Korrelationswert von 0,36 untermauert. Ein Korrelationswert von 0,25 zeigt eine schwache Korrelation in Bagnummer 4006.

Auffällig ist ein Trend der Korrelationswerte, die mit der Tiefe positiver werden. Um zu überprüfen, ob diese Korrelationswerte von der Tiefe abhängig sind, wurde der Korrelationswert für die Mittlere Korngröße und den Eigenwert E3 für 16 Bags berechnet und gegen die Tiefe aufgetragen (Abbildung 25).

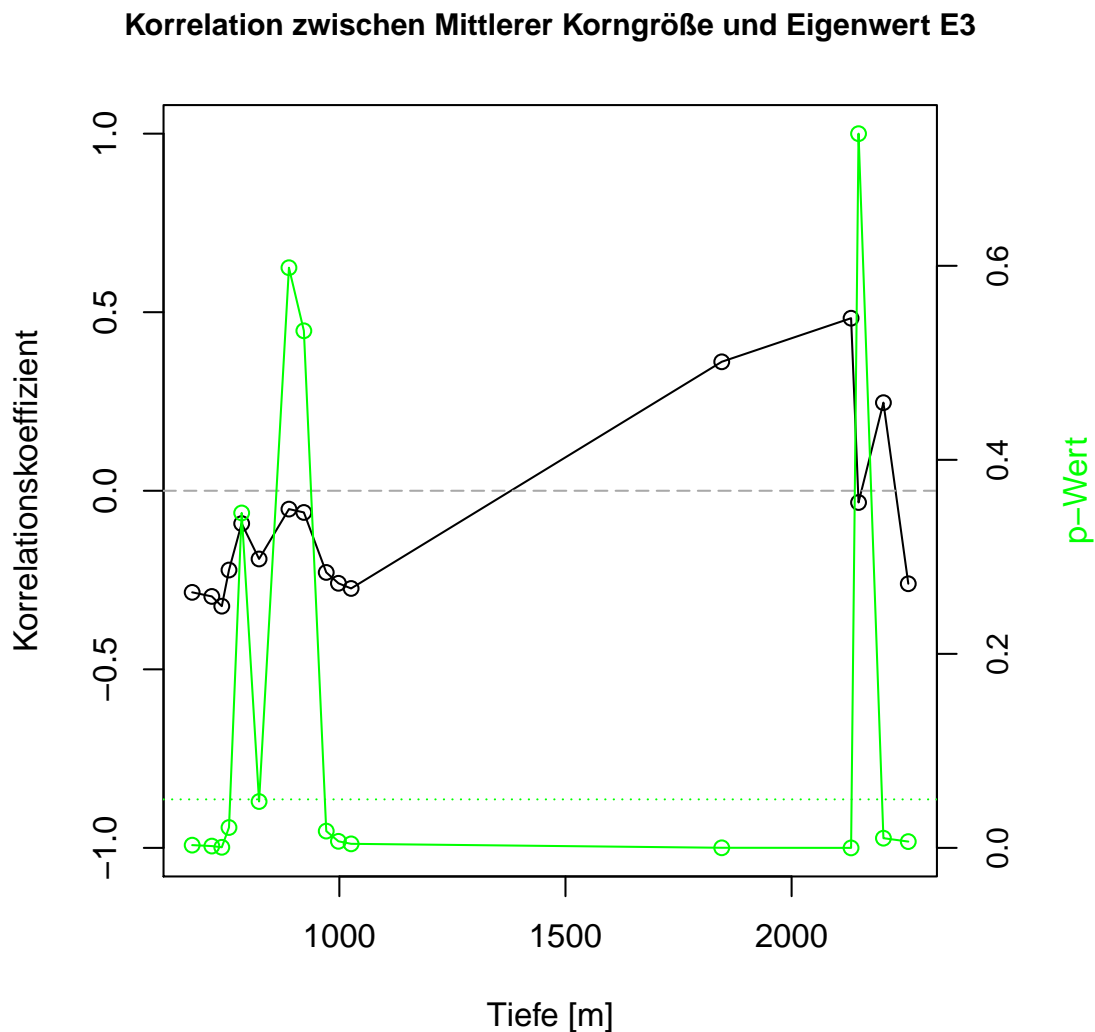


Abbildung 25: Korrelationswerte von Mittlerer Korngröße und Eigenwert E3 mit der Tiefe. Die schwarze Linie zeigt die Entwicklung des Korrelationskoeffizienten, die grüne die dazugehörige Entwicklung des p-Wertes, der die Signifanz der Korrelationswerte angeben soll. Liegt der p-Wert eines Korrelationswertes unter 0,05, ist er signifikant, liegt er darüber ist er nicht signifikant. Die Grenze stellt eine grün gepunktete Linie dar. Die Grenze zwischen positiver Korrelation und negativer Korrelation (Antikorrelation) zeichnet eine grau gestrichelte Linie.

Anhand dieses Graphen kann man schließen, dass die obigen vier Bags durchaus vertretbare Beispiele sind. Generell zeigen die Korrelationswerte in einer Tiefe von 600 bis 1000 m eine Antikorrelation, während sie bei Tiefen von 1845 m bis 4106 m eher korrelieren. Al-

lerdings geht kein Korrelationswert über die $+ - 0.5$ Marke hinaus. Der p-Wert bleibt bis auf vier Proben unter der 0,05-Grenze, sodass fast alle Korrelationswerte signifikant sind.

6 Fehlerbetrachtung

6.1 Kornsegmentierung

Durch die Wahl von 1° Missorientierung von Pixel zu Pixel zur Detektion von Korngrenzen liegt die Kornsegmentierung im Bereich des Messfehlers des *Fabric Analyzers*, dessen Messgenauigkeit innerhalb eines Kristalls $< 2^\circ$ beträgt. Das ruft Diskussionen hervor, ob 1° als Schwellwert für Kleinwinkelkorngrenzen geeignet ist. Für die Eignung spricht allerdings der Abgleich der Körner mit den aus den LASM-Bildern detektierten Körnern von Tobias Binder. Die Wahl einer höheren Missorientierung würde im Vergleich zu wenige Körner ergeben.

Zu breite Korngrenzen, Mikrotomschleifspuren und zusammenhängende Pixel schlechter Qualität, die zusätzliche Korngrenzartefakte generieren sowie angeschnittene Randkörner führen zu kleineren und zu vielen Körnern in der Statistik. Die Korngröße wird unterschätzt.

Zu einer Überschätzung der Korngröße führt dagegen das Weglassen der Körner, die kleiner als 500 Pixel sind.

6.2 Running Mean

Die Ergebnisse sind stark abhängig von der Wahl der Framehöhe und der Schrittweite. Sie beeinflussen auch die Korrelationswerte, sodass nicht klar ist, ob die Korrelationswerte den wahren Zusammenhang zwischen der Mittleren Korngröße und der Kristallorientierung wiedergeben können. Um die Ergebnisse und die Korrelation möglichst nachvollziehbar in Bezug auf Strukturnähe zu gestalten, sind *Framehöhe* und *Schrittweite* sehr klein gewählt worden, in einem Rahmen, in dem die Ergebnisse statistisch noch vertretbar sind. Ein Fehler des *Running Mean*-Programms ist, dass sobald sich keine Körner innerhalb eines *Frames* befinden, die Analyse abgebrochen wird. Damit ist die Analyse von der *Framehöhe* abhängig. Bei vielen anderen Proben konnte noch kein Grund für einen Abbruch gefunden werden. So hat die *Running Mean*-Analyse nur bei 21 Proben funktioniert. Dabei ist nicht unbedingt eine Korrektur im *Running Mean*-Programm notwendig, sondern es ist sinnvoller, die großen Lücken zwischen den Dünnschnitten (die kornfreien Bereiche) schon im *cAxes*-Programm zu entfernen, sodass sie im *Running Mean* nicht als zu analysierende Pixel erkannt werden.

7 Diskussion

7.1 *cAxes* und *Running Mean*-Programm

Die hinterlegten Bilder in den Plots zeigen deutlich, dass das *Running Mean*-Programm funktioniert. Sie geben genau die Struktur wider, die bei der jeweiligen Kurve erwartet werden würde. Nur das *cAxes*-Programm, das die Grundlage für den *Running Mean* liefert, indem es die Körnerstatistik erstellt, bedarf einiger Korrekturen, damit es nicht zur Über- oder Unterschätzung der Mittleren Korngröße kommt. Für die Überschätzung sorgen weggelassene Körner, die kleiner als 500 Pixel sind, für die Unterschätzung Mikrotomschleifspuren und Ketten von Pixeln schlechter Qualität, die Korngrenzartefakte generieren, und zu dicke Korngrenzen. Große Flächen mit schwarzen Pixeln in den Randbereichen bereiten dem anschließenden *Running Mean*-Programm Probleme, das, sobald es weniger als 500 weiße Pixel erkennt, die Analyse abbricht. Zudem verfälschen wenige angeschnittene Körner in einem *Frame* in den Randbereichen beziehungsweise in den Grenzbereichen zwischen den aneinandergereihten Dünnschnitten die Analyse und die Mittlere Korngröße bricht an diesen Stellen ein.

7.2 Mittlere Korngröße

In allen Proben ist die minimale Mittlere Korngröße ziemlich konstant bei 2 bis 3 mm^2 . Die maximale Mittlere Korngröße schwankt dagegen stark. Sie entwickelt sich von 12 mm^2 in 674,3 m Tiefe zu 16 mm^2 in 1025,75 m Tiefe, dann nimmt sie um die Hälfte ab auf 6 mm^2 in 1026,05 m und steigt dann wieder ein wenig an auf 8 mm^2 in 2202,75 m und nimmt ab 2202,85 m wieder ab auf 6 mm^2 . Eine solch starke Abnahme der Korngröße wie in Probe nmfa 3356 ist auch schon in anderen Eiskernen beobachtet worden. Es ist die scharfe Grenze zwischen dem Holozän (der jetzigen Warmzeit) und dem letzten Glazial Würm (Eiszeit), in der große Körner aus der Warmzeit plötzlich in kleine Körner aus der Eiszeit übergehen ([Duval & Lorius, 1980]). Nach dieser Theorie gehören die Proben nmfa 1227 in 674,3 m Tiefe und nmfa 1866 in 1025,75 m Tiefe zum holozänen Eis, ab 1026,25 m bis 1845,25 m die Proben nmfa 3356 und nmfa 4006 zum glazialen Eis. Zwar nimmt die Korngröße auch schon in Probe nmfa 1866 ab, jedoch zeigen auch schon Proben aus höheren Metern einen Abfall um die Hälfte der Korngröße und in der darauffolgenden Probe nimmt die Mittlere Korngröße wieder zu. So ist die Grenze zwischen Holozän und dem letzten Glazialen Maximum zwischen den Proben nmfa 1866 und nmfa 3356 zu vermuten, ab der die Mittlere Korngröße konstant klein bleibt, wie ab Probe nmfa 3356.

Der Grund für die plötzliche Abnahme der Korngröße soll die erhöhte Staubpartikelkonzentration im glazialen Eis sein (Abbildung 26), die zu einem *pinning*-Effekt der Korngrenzen führt, sodass Körner auf eine gewisse maximale Korngröße beschränkt sind ([Durand, 2009]). Migrationsrekristallisationsprozesse können in dieser Tiefe noch keine Rolle spielen, da dafür eine Temperatur größer als -10°C benötigt wird ([Duval & Castelnau, 1995]), die erst nahe des Gesteinsbettes erreicht wird. Rotationsrekristallisation führt über Subkorngrenzen zu kleineren Körnern und kann im GRIP Eiskern aus Grönland ab einer Tiefe von 650 m das normale Kornwachstum ausgleichen ([Thorsteinson, 1996]). Allerdings kann das auch nicht die Begründung für die sehr viel kleineren Körner in der Eiszeit sein, da die maximale Mittlere Korngröße nach den Ergebnissen in dieser Arbeit noch bis mindestens 1025 m ansteigt.

Ob die Mittlere Korngröße als Paläothermometer genutzt werden kann, ist strittig. Dagegen spricht, dass die Lokation der Mikropartikel eine wichtige Rolle spielt ([Durand, 2009]). Nur Mikropartikel, die sich entlang von Korngrenzen befinden, können Korngrenzen „pinnen“, Mikropartikel innerhalb eines Korns haben keinen Einfluss. Zudem kommt es ab einer bestimmten Tiefe zum *unpinning*-Effekt, bei der das Kornwachstum den *pinning*-Effekt überwindet. Andererseits ist aufgefallen, dass die Mittlere Korngröße sehr gut mit $\delta^{18}\text{O}$ -Werten korreliert ([Duval & Lorius, 1980]) (Abbildung 26), wonach angenommen wurde, dass die Korngröße von den klimatischen Ablagerungsbedingungen abhängt ([Petit et al., 1987]).

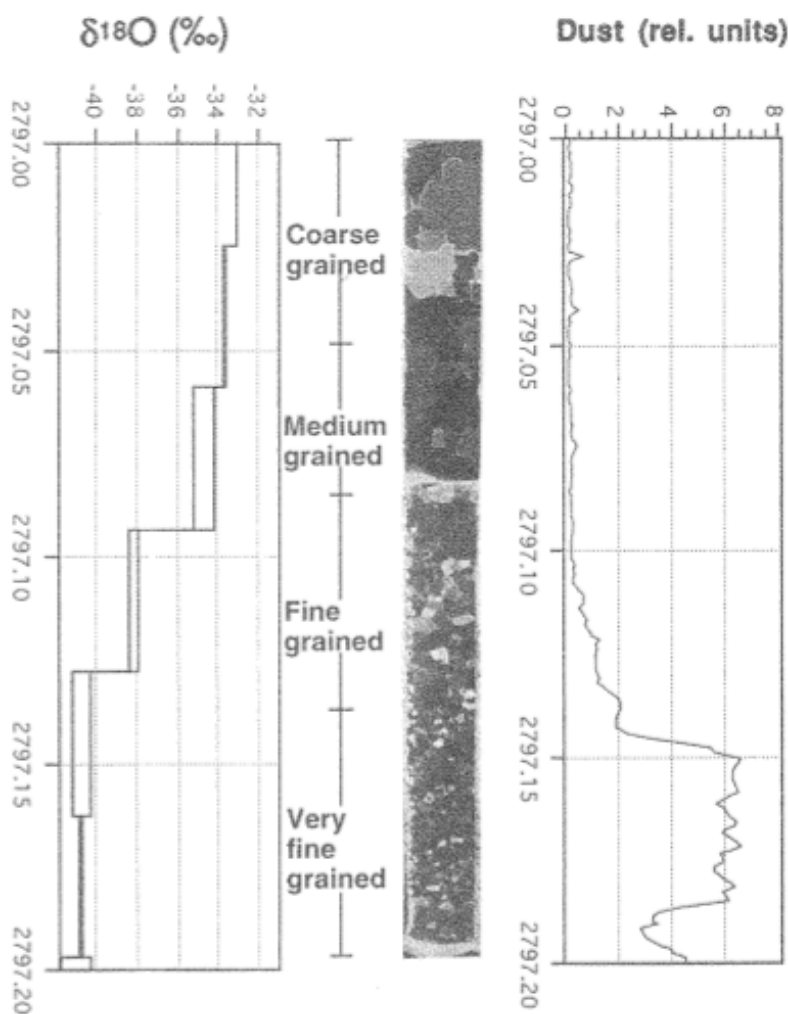


Abbildung 26: Vergleich von $\delta^{18}\text{O}$ - und Staubdaten mit der Korngröße im GRIP Eiskern ([Thorsteinson, 1996])

Um aber genauere Aussagen über die Mittlere Korngröße als Paläothermometer machen zu können, müsste die Mittlere Korngröße mit Chemiedaten verglichen werden, wobei

dann auch Effekte von löslichen und unlöslichen Stoffen untersucht werden können. Bei sogenannten *cloudy bands* (= dunkle Bänder im Eiskern mit hoher Asche- oder Staubpartikelkonzentration), wie sie in Probe nmfa 3356 vorkommen, könnte über ein Grauwertprofil des Eiskerns ein Zusammenhang mit der Mittleren Korngröße und der Kristallorientierung überprüft werden. Auch ein Vergleich mit der $\delta 18 O$ -Kurve des NEEM-Eiskerns ist angebracht, sobald die Daten zur Verfügung stehen.

7.3 *c*-Achsenverteilungen

Für die Probe nmfa 1227 in einer Tiefe von 674,3 m bis 674,85 m ergibt sich nach der Tabelle von [Wallbrecher, 1986](Seite 173) für den Regelungsgrad zwischen 30 und 70 % und dem Eigenwert E3 zwischen 0,50 und 0,75 eine schwache Einregelung der *c*-Achsen (Teilgroßkreis). Probe nmfa 1866 in einer Tiefe von 1025,75 m bis 1026,3 m zeigt nach Einordnung des Woodcockparameters eine deutliche Neigung zur Gürtelverteilung. Die *c*-Achsenverteilung in Probe nmfa 3356 in einer Tiefe von 1845,25 m bis 1845,8 m mit einem Regelungsgrad zwischen 90 und 95 % (konstanter Bereich) und einem Eigenwert E3 zwischen 0,94 und 0,97 (konstanter Bereich) kann nach Tabelle in [Wallbrecher, 1986] einem *Single Maximum* (Parallelorientierung) zugeordnet werden. Auch Probe in Probe nmfa 4006 in einer Tiefe von 2202,75 m bis 2203,3 m mit einem Regelungsgrad zwischen 92 und 97 % (konstanter Bereich) und einem Eigenwert E3 zwischen 0,93 und 0,98 (konstanter Bereich) ist die *c*-Achsenverteilung nach Tabelle [Wallbrecher, 1986] ebenfalls ein *Single Maximum* (Parallelorientierung).

Mit diesen Ergebnissen kann die *c*-Achsenverteilungszuordnung zu der Tiefe im NEEM-Eiskern von [Surma, 2011] bestätigt werden (Kapitel 2.5.2).

7.4 Korrelation von Korngröße und Kristallorientierung

Mittlere Korngröße und Eigenwert E3 korrelieren nur sehr schwach mit Korrelationswerten, die nie über $\pm 0,5$ hinausgehen. Entweder weil es keinen Zusammenhang gibt oder weil die Wahl der Korrelationsmethode (nach Pearson) nicht korrekt ist. Denn die Korrelationsmethode nach Pearson setzt einen linearen Zusammenhang voraus. Ist dieser nicht gegeben, kann es auch zu durchgängig niedrigen Korrelationswerten kommen. So ist zu überprüfen, ob ein nicht-linearer Zusammenhang besteht. Sollte es keinen Zusammenhang geben, kann daraus geschlossen werden, dass *c*-Achsenverteilungen nur die Deformationsgeschichte wiedergeben und nichts mit den Ablagerungsbedingungen zu tun haben.

Es ist aber auch eine Veränderung der Korrelationswerte nach der Tiefe zu erkennen: Von 674,3 m bis 1026,3 m liegen die Korrelationswerte unter 0, während von 1845,25 m bis 2258,3 m 60 % über und 40 % unter 0 liegen. Ein Grund für die Unterschiede der Korrelationswerte nach der Tiefe könnte sein, dass es sich von 674,2 bis 1026,3 m um holozänes Eis handelt, das aus dieser Warmzeit stammt, während die Proben von 1845,25 m bis 2258,3 m glaziales Eis (aus der Eiszeit) beinhalten. Genauso gut könnte auch die *c*-Achsenverteilung eine Rolle spielen, wonach die höheren Meter eine schwache Einregelung bis Gürtelverteilung aufzeigen und die tieferen eher eine *Single Maximum*-Verteilung. Da nach könnte die Art der Korrelation von der Isotropie beziehungsweise Anisotropie des polykristallinen Eises abgeleitet werden.

Literatur

- [Alley et al., 1986a] R.B. ALLEY, J.H. PEREPEZKO & C.R. BENTLEY
Grain growth in polar ice: I. Theory
J. Glaciol., 32
pp. 415–425
- [Alley, 1988] R.B. ALLEY
Fabrics in Polar Ice Sheets: Development and Prediction
Science 1988, Volume 240
pp. 493–495
- [Alley, 1992] R.B. ALLEY
Flow law hypotheses for ice sheet modelling
J. Glaciol., 38 (129)
pp. 245–256
- [Arnaud et al., 2000] L. ARNAUD, M. GAY, J.-M. BARNOLA & P. DUVAL
Physical modeling of the densification of snow/firn and ice in the upper part of Polar ice sheets Physics of Ice Core Records
Hokkaido University Press, 2000
pp. 263–268
- [Azuma & Higashi, 1985] N. AZUMA & A. HIGASHI
Formation processes of ice fabric patterns in ice sheets
Ann. Glaciol. 6, 130
pp. 130–134
- [Binder, 2011] T. BINDER
Microstructure Analysis of Polar Ice Cores by Means of Digital Image Processing
Fakultät für Physik und Astronomie - Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2011
p. 15
- [Blackford, 2007] J.R. BLACKFORD
Sintering and microstructure of ice: a review
Journal of Physics D: Applied Physics, Vol.40
pp. R355–R385
- [Cuffey & Paterson, 2010] K.M. CUFFEY & W.S.B. PATERSON
The physics of glaciers
Elsevier 2010, 4. Ausgabe
- [Durand, 2009] G. DURAND, A. SVENSSON, A. PERSSON, O. GAGLIARDINI, F. GILLET-CHAULET, J. SJOLTE, M. MONTAGNAT, D. DAHL-JENSEN
Evolution of the Texture along the EPICA Dome C Ice Core
Physics of Ice Core Records II, Supplement Issue of Low Temperature Science, Vol. 68, 2009, 2
pp. 91–105
- [Duval & Castelnaud, 1995] P. DUVAL & O. CASTELNAU
Dynamic recrystallization of ice in polar ice sheets

- J. Phys., 5
pp. 197–205
- [Duval & Lorius, 1980] P. DUVAL & C. LORIUS
Crystal size and climatic record down to the last ice age from Antarctic ice
Earth Planet. Sci. Lett., 48
pp. 59–64
- [Fossen, 2011] H. FOSSEN
Structural Geology
Cambridge University Press, 3. Auflage
- [Hooke, 2005] R.L.E.B. HOOKE
Principles of Glacier Mechanics
Cambridge University Press, 2nd edn.
- [Jacka & Jun, 2000] T.H. JACKA & L. JUN
Flow rates and crystal orientation fabrics in compression of polycrystalline ice at flow temperature and stresses
Hondoh, T. (ed.) Physics of Ice core Records
pp. 83–102
- [Müller & Raith, 1993] G. MÜLLER & M. RAITH
Methoden der Dünnschliffmikroskopie
Clausthaler Tektonische Hefte Nr. 14, 5. Auflage
pp. 37–38, pp. 52–57
- [Passchier & Trouw, 2005] C.W. PASSCHIER & R.A.J. TROUW
Microtectonics
Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Auflage
- [Paterson, 1994] W.S.B. PATERSON
The Physics of Glaciers
Elsevier 1994, 3. Ausgabe
- [Petit et al., 1987] J.R. PETIT, P. DUVAL & C. LORIUS
Long-term climatic changes indicated by crystal growth in polar ice
Nature, Vol. 326
pp. 62–64
- [Peterzell et al., 2009] M. PETERZELL, F. KOHLMANN, C.J.L. WILSON, C. SEILER & A.J.W. GLEADOW
A new approach to crystallographic orientation measurement for apatite fission track analysis: Effect of crystal morphology and implications by automation
Elsevier B.V., Chemical Geology, Vol. 265
pp. 529–533
- [Peterzell et al., 2010] M. PETERZELL, P. HASALOVÁ, C.J.L. WILSON, SANDRA PIAZOLO & KAREL SCHULMANN
Evaluating quartz crystallographic preferred orientations and the role of deformation partitioning using EBSD and fabric analyser techniques

- Journal of Structural Geology, Vol. 32
pp. 803–817
- [Petrenko & Withworth, 1999] V.F. PETRENKO & R.W. WITHWORTH
Physics of Ice
Oxford, Oxford University Press 1999
pp. 15-21
- [Schulson & Duval, 2009] E.M. SCHULSON & P. DUVAL
Creep and Fracture of Ice
Cambridge, Cambridge University Press 2009
pp. 5-14, pp. 78-80
- [Surma, 2011] J. SURMA
Die Orientierungen der C-Achsen im NEEM Eiskern (Grönland)
Institut für Geologie und Mineralogie, Universität zu Köln
- [Thorsteinson, 1996] T. THORSTEINSON
Textures and fabrics in the GRIP ice core, in relation to climate history and ice deformation
Alfred Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung Bremerhaven 1996
- [Wallbrecher, 1986] E. WALLBRECHER
Tektonische und gefügeanalytische Arbeitsweisen
Stuttgart, Enke 1986
pp. 148–175
- [Weertman & Weertman, 1964] J. WEERTMAN & J.R. WEERTMAN
Elementary Dislocation Theory
The Macmillan Company New York, 1964
- [Wilson et al., 2003] C.J.L. WILSON, D.S. RUSSEL-HEAD & H.M. SIM
The application of an automated analyzer system to the textural evolution of folded ice layers in shear zones
Annals of Glaciology, Vol. 37
pp. 7–17
- [Wilson et al., 2007] C.J.L. WILSON, D.S. RUSSEL-HEAD, K. KUNZE & G. VIOLA
The analysis of quartz c-axis fabrics using a modified optical microscope
Journal of Microscopy, Vol. 227
pp. 30–41
- [Wilson, 2012] C.J. WILSON, M. PETERNELL, S. PIAZOLO, V. LUZIN
Ice as an analogue for rock microfabric development: a review and in situ experimental results Journal of Structural Geology
- [Woodcock, 1977] N.H. WOODCOCK
Specification of fabric shapes using an eigenvalue method
Geological Society of America Bulletin, 1977
pp. 1231–1236

Internetquellen

http://neem.dk/about_neem/drillingcores/
abgerufen am 12.10.2012

http://neem.dk/field_diaries_folder/uk_diaries_2010/2010-07-27/
abgerufen am 12.10.2012

8 Anhang

8.1 Programme

8.1.1 Bag Plot

```
#Einlesen der Datei
runningmean <- read.table("C:/Users/Anneke/Documents/runningmeans_only/
rm_nmfa4006.txt", header=FALSE, dec=".")

#Angabe der Dünnschliffnummer und der Tiefe
Nummer <- "nmfa4006_101 bis 601"
bag <- 4006
top <- (bag-1)*0.55
bottom <- bag*0.55
Rand_links <- 0
Rand_rechts <- 3500
frameheight <- 550
steplength <- 250
Rand_links_mm <- Rand_links*0.02
Rand_rechts_mm <- Rand_rechts*0.02
frameheight_mm <- frameheight*0.02
steplength_mm <- steplength*0.02

#Benennung der Spalten in der Textdatei
Frameycenter <- runningmean$V1
NumberofGrains <- runningmean$V2
MeanGrainSize <- runningmean$V3
SumVectorNorm <- runningmean$V4
Regelungsgrad <- runningmean$V5
Konzentrationsparameter <- runningmean$V6
SphärischeApertur <- runningmean$V7
EigenwertE1 <- runningmean$V8
EigenwertE2 <- runningmean$V9
EigenwertE3 <- runningmean$V10
Woodcockparameter <- runningmean$V11

Frameycenter_cm <- Frameycenter*0.002
Frameycenter_m <- Frameycenter*0.00002
MeanGrainSize_mm <- MeanGrainSize*0.0004
Absolute_Tiefe <- Frameycenter_m+top

par(mfrow=c(4,1), las=1, oma=c(8,2,7,2), mgp=c(3,1,0))
par(mar = c(1, 5, 3, 4))
require(pixmap)

Bild1 <- read.pnm("E:/Anneke_Daten/NEEM_neu/nmfa1227/Panoramabilder/
```

```
nmfa1227_grain_panorama_lores2.pnm", bbox=c(0,0,2000,240), bbcent=FALSE)
plot(Bild1, axes=FALSE, xlim=c(0, 2000))
```

```
#Mittlere Korngröße
par(new=TRUE, xaxs="i")
plot(Absolute_Tiefe, MeanGrainSize_mm, col="red", type="l", lwd=2,
xlab="", ylab="M. Korngröße [mm2]", cex.axis = 0.9, xaxt = "n",
xlim=c(top,bottom))
```

```
#Anzahl der Körner
par(new=TRUE)
plot(Absolute_Tiefe, NumberofGrains, type="l", lty=2, col="blue",
lwd=2, axes=FALSE, bty="n", xlab="", ylab="", xlim=c(top,bottom))
axis(side=4, cex.axis=0.9)
mtext("Anzahl der Körner", side=4, line=3, cex=0.7, las=0)
```

```
par(new=TRUE)
plot(Frameycenter_cm, NumberofGrains, axes=FALSE, ylab="", xlab="",
type="n", xlim=c(0,55))
axis(side=3, cex.axis=0.9)
mtext("Bag Tiefe [cm]", side=3, line=3, cex=0.7, las=1)
legend("topright", c("Mittlere Korngröße [mm2]", "Anzahl der Körner"),
col=c("red", "blue"),lty=c(1,2), lwd=1, cex=0.7)
```

```
mtext(substitute(paste("Dünnschnittnr.: ",k," , Top-Tiefe: ",l, "m,
Bottom-Tiefe: ",m,"m")), list(k= Nummer, l= top, m=bottom)), side=3,
line=6, cex=0.9)
mtext(substitute(paste("linker Rand: ", n," Pixel/ ", n1,"mm",",
rechter Rand: ", o," Pixel/ ",o1,"mm", ", Fenstergröße: ", p," Pixel/ ",
p1,"mm", ", Schrittweite: ",q," Pixel/ ",q1,"mm")),
list(n=Rand_links,n1=Rand_links_mm, o=Rand_rechts, o1=Rand_rechts_mm,
p=frameheight, p1=frameheight_mm, q=steplength, q1=steplength_mm)),
side=3, line=5, cex=0.7, las=1)
```

```
#Plot Eigenwerte
par(mar=c(4, 5, 0, 4))
```

```
Bild2 <- read.pnm("E:/Anneke_Daten/NEEM_neu/nmfa1227/Panoramabilder/
nmfa1227_trend_panorama_lores2.pnm", bbox=c(0,0,2000,240), bbcent=FALSE)
plot(Bild2)
par(new=TRUE)
plot(Absolute_Tiefe, EigenwertE3, col="black", type="l", lty=1,
ylab="Eigenwert E3",xlab="Absolute Tiefe [m]", lwd=2,
cex.sub=1, cex.axis=0.9, xlim=c(top, bottom))
#par(new=TRUE)
#plot(Absolute_Tiefe, EigenwertE2, type="l", col="black", lwd=1.5, lty=2,
```

```

axes=FALSE, ylab="")
#lines(Absolute_Tiefe, EigenwertE1, col="black", lwd=1.5, lty=3)
#axis(side=4, cex.axis=0.9)
#mtext("Eigenwerte E1 und E2", side=4, las=0, line=3, cex=0.7)
#legend("topright", c("Eigenwert E1 ", "Eigenwert E2 ", "Eigenwert E3 "),
col=c("black", "black", "black"), lty=c(1,2,3), lwd=1, cex=0.6)

#Regelungsgrad und Sphärische Apertur
par(mar=c(1,5,3,4))
plot(Absolute_Tiefe, Regelungsgrad, col="green", type="l", lwd=1.5,
xlim=c(top, bottom),
cex.main=1, ylab="Regelungsgrad [%]", xlab="", cex.axis=0.9, cex.lab=1,
xaxt="n")
par(new=TRUE)
plot(Absolute_Tiefe, SphärischeApertur, type="l", col="darkorange",
lwd=1.5, axes=FALSE, bty = "n", xlab = "", ylab = "", xaxt="n",
xlim=c(top, bottom))
axis(side=4, cex.axis=0.9)
mtext("Sphärische Apertur [°]", side=4, line=3, cex=0.7, las=0)
legend("topright", c("Regelungsgrad [%] ", "Sphärische Apertur [°] "),
col=c("green", "darkorange"), lty=1, lwd=1, cex=0.7)

#Plot Woodcockparameter
par(mar=c(4,5,0,4))
plot(Absolute_Tiefe, Woodcockparameter, type="l", col="darkviolet",
lwd=1.5, ylab="Woodcockp.", xlab="Absolute Tiefe [m]", cex.axis=0.9,
cex.lab=1, ylim=c(0,5), xlim=c(top, bottom))
abline(h=1, col="darkgray", lty=5)

KorkoefE3MGS <- cor(MeanGrainSize, EigenwertE3, method = "pearson")
KorkoefE2MGS <- cor(MeanGrainSize, EigenwertE2, method= "pearson")
KorkoefE1MGS <- cor(MeanGrainSize, EigenwertE1, method= "pearson")

mtext(substitute(paste("Korrelation zwischen Mean Grain Size und E3: ",
q, ", ", "E2: ", r, ", ", "E1: ", s)), list(q= KorkoefE3MGS, r=KorkoefE2MGS,
s=KorkoefE1MGS)), side=1, line=5, cex=0.7)

KorkoefE3GN <- cor(NumberofGrains, EigenwertE3, method="pearson")
KorkoefE2GN <- cor(NumberofGrains, EigenwertE2, method="pearson")
KorkoefE1GN <- cor(NumberofGrains, EigenwertE1, method="pearson")

KorkoefSP_MGS <- cor(MeanGrainSize, SphärischeApertur)
KorkoefR_MGS <- cor(MeanGrainSize, Regelungsgrad)

```

```
mtext(substitute(paste("Korrelation zwischen Mean Grain Size und
Sphärischer Apertur: ", y, ", ", Regelungsgrad: ", z),list(y=KorkoefSP_MGS,
z=KorkoefR_MGS)), side=1, line=6,cex=0.7)
```

```
KorkoefWMGS <- cor(MeanGrainSize, Woodcockparameter, method="pearson")
mtext(substitute(paste("Korrelation zwischen Mean Grain Size und
Woodcockparameter: ", w), list(w=KorkoefWMGS)), side=1, line=7, cex=0.7)
```

8.1.2 Korrelationsplot (4 Tiefen Vergleich)

```
bag1227 <- read.table("C:/Users/Anneke/Documents/runningmeans_only/
rm_nmfa1227.txt")
bag1866 <- read.table("C:/Users/Anneke/Documents/runningmeans_only/
rm_nmfa1866.txt")
bag3356 <- read.table("C:/Users/Anneke/Documents/runningmeans_only/
rm_nmfa3356.txt")
bag4006 <- read.table("C:/Users/Anneke/Documents/runningmeans_only/
rm_nmfa4006.txt")
```

```
#bag1227
#Nummer <- "nmfa1227_101 bis 601"
bag <- 1227
top <- (bag-1)*0.55
```

```
Frameycenter1227 <- bag1227$V1
NumberofGrains1227 <- bag1227$V2
MeanGrainSize1227 <- bag1227$V3
Regelungsgrad1227 <- bag1227$V5
EigenwertE31227 <- bag1227$V10
```

```
Frameycenter_cm1227 <- Frameycenter1227*0.002
Frameycenter_m1227 <- Frameycenter1227*0.00002
MeanGrainSize_mm1227 <- MeanGrainSize1227*0.0004
Absolute_Tiefe1227 <- Frameycenter_m1227+top
```

```
#bag1866
#Nummer <- "nmfa1866_101 bis 601"
bag <- 1866
top <- (bag-1)*0.55
```

```
Frameycenter1866 <- bag1866$V1
NumberofGrains1866 <- bag1866$V2
MeanGrainSize1866 <- bag1866$V3
Regelungsgrad1866 <- bag1866$V5
EigenwertE31866 <- bag1866$V10
```

```
Frameycenter_cm1866 <- Frameycenter1227*0.002
Frameycenter_m1866 <- Frameycenter1227*0.00002
```

```

MeanGrainSize_mm1866 <- MeanGrainSize1227*0.0004
Absolute_Tiefe1866 <- Frameycenter_m1227+top

#bag3356
#Nummer <- "nmfa3356_101 bis 601"
bag <- 3356
top <- (bag-1)*0.55

Frameycenter3356 <- bag3356$V1
NumberOfGrains3356 <- bag3356$V2
MeanGrainSize3356 <- bag3356$V3
Regelungsgrad3356 <- bag3356$V5
EigenwertE33356 <- bag3356$V10

Frameycenter_cm3356 <- Frameycenter3356*0.002
Frameycenter_m3356 <- Frameycenter3356*0.00002
MeanGrainSize_mm3356 <- MeanGrainSize3356*0.0004
Absolute_Tiefe3356 <- Frameycenter_m3356+top

#bag4006
#Nummer <- "nmfa4006_101 bis 601"
bag <- 4006
top <- (bag-1)*0.55

Frameycenter4006 <- bag4006$V1
NumberOfGrains4006 <- bag4006$V2
MeanGrainSize4006 <- bag4006$V3
Regelungsgrad4006 <- bag4006$V5
EigenwertE34006 <- bag4006$V10

Frameycenter_cm4006 <- Frameycenter4006*0.002
Frameycenter_m4006 <- Frameycenter4006*0.00002
MeanGrainSize_mm4006 <- MeanGrainSize4006*0.0004
Absolute_Tiefe4006 <- Frameycenter_m4006+top

#Berechnung des Korrelationskoeffizienten
Korkoef1227 <- cor(MeanGrainSize_mm1227, EigenwertE31227)
Korkoef1866 <- cor(MeanGrainSize_mm1866, EigenwertE31866)
Korkoef3356 <- cor(MeanGrainSize_mm3356, EigenwertE33356)
Korkoef4006 <- cor(MeanGrainSize_mm4006, EigenwertE34006)

#Berechnung des p-Werts
cor.test(MeanGrainSize_mm1227, EigenwertE31227)
cor.test(MeanGrainSize_mm1866, EigenwertE31866)
cor.test(MeanGrainSize_mm3356, EigenwertE33356)

```

```

cor.test(MeanGrainSize_mm4006, EigenwertE34006)

#Plot
par(mfrow=c(2,2), las=1, oma=c(2,1,3,2), mgp=c(3,1,0),
mar = c(5, 5, 3, 5))

plot(Absolute_Tiefe1227, MeanGrainSize_mm1227, type="l", lwd=2,
ylab="M. Korngröße [mm2]", xlab = "Absolute Tiefe [m]", col = "red",
main="Bagnummer 1227")
par(new=TRUE)
plot(Absolute_Tiefe1227, EigenwertE31227, type="l", lwd=2, axes=FALSE,
ylab="", xlab="")
axis(side=4)
mtext("Eigenwert E3", side=4, line=3, las=0, cex=0.8)
legend("topleft", c("Mittlere Korngröße [mm2]", "Eigenwert E3"),
col=c("red", "black"), lwd=1, cex=0.7)

plot(Absolute_Tiefe1866, MeanGrainSize_mm1866, type="l", lwd=2,
ylab="M. Korngröße [mm2]", xlab = "Absolute Tiefe [m]", col = "red",
main="Bagnummner 1866")
par(new=TRUE)
plot(Absolute_Tiefe1866, EigenwertE31866, type="l", lwd=2, axes=FALSE,
ylab="", xlab="")
axis(side=4)
mtext("Eigenwert E3", side=4, line=3, las=0, cex=0.8)

plot(Absolute_Tiefe3356, MeanGrainSize_mm3356, type="l", lwd=2,
ylab="M. Korngröße [mm2]", xlab = "Absolute Tiefe [m]", col = "red",
main="Bagnummer 3356")
par(new=TRUE)
plot(Absolute_Tiefe3356, EigenwertE33356, type="l", lwd=2, axes=FALSE,
ylab="", xlab="")
axis(side=4)
mtext("Eigenwert E3", side=4, line=3, las=0, cex=0.8)
#mtext(substitute(paste("Korrelationswert für bag 1227: ",
q ,", ", "bag 1866: ", r,", ", ",
"bag3356: ", s,", ", ", "bag 4006: ", t),
list(q= Korkoef1227, r=Korkoef1866, s=Korkoef3356,
t=Korkoef4006)) ,side=1, line=5, cex=0.7)

plot(Absolute_Tiefe4006, MeanGrainSize_mm4006, type="l", lwd=2,
ylab="M. Korngröße [mm2]", xlab = "Absolute Tiefe [m]", col = "red",
main="Bagnummer 4006")
par(new=TRUE)
plot(Absolute_Tiefe4006, EigenwertE34006, type="l", lwd=2,

```



```

axes=FALSE, ylab="", xlab="")
axis(side=4)
mtext("Eigenwert E3", side=4, line=3, las=0, cex=0.8)

mtext("Framehöhe: 1cm, Schrittweite: 5mm", side=1, line=5, cex=0.7)

```

8.1.3 Korrelationsschleife

```

DatAdressen <- list.files("C:/Users/Anneke/Documents/runningmeans_only")

setwd("C:/Users/Anneke/Documents/runningmeans_only")

correlationE1 <- rep(0,16)
correlationE1p <- rep(0,16)
correlationE2 <- rep(0,16)
correlationE2p <- rep(0,16)
correlationE3 <- rep(0,16)
correlationE3p <- rep(0,16)

count <- 0

for (i in DatAdressen){
count <- count + 1

runningmean <- read.table(i)

#Benennung der Spalten in der Textdatei
Frameycenter <- runningmean$V1
NumberOfGrains <- runningmean$V2
MeanGrainSize <- runningmean$V3
SumVectorNorm <- runningmean$V4
Regelungsgrad <- runningmean$V5
Konzentrationsparameter <- runningmean$V6
SphärischeApertur <- runningmean$V7
EigenwertE1 <- runningmean$V8
EigenwertE2 <- runningmean$V9
EigenwertE3 <- runningmean$V10
Woodcockparameter <- runningmean$V11

correlationE1[count] <- cor(MeanGrainSize, EigenwertE1)
correlationE1p[count] <- unlist(cor.test(MeanGrainSize, EigenwertE1)[3],
use.names=FALSE)
correlationE2[count] <- cor(MeanGrainSize, EigenwertE2)
correlationE2p[count] <- unlist(cor.test(MeanGrainSize, EigenwertE2)[3],
use.names=FALSE)
correlationE3[count] <- cor(MeanGrainSize, EigenwertE3)

```

```

correlationE3p[count] <- unlist(cor.test(MeanGrainSize, EigenwertE3)[3],
use.names=FALSE)

}

Tiefe <- c(674.58, 718.03, 740.03, 755.98, 784.03, 822.53, 888.53,
921.53, 971.03, 997.98, 1026.03, 1845.53, 2131.53, 2148.03, 2203.03,
2258.03)

M <- matrix(c(Tiefe,correlationE1,correlationE1p,correlationE2,
correlationE2p,correlationE3,correlationE3p),nrow=21,ncol=7)

setwd("C:/Users/Anneke/Documents/LaTeX Documents")

write.table(M,file="Correlation",sep="\t",row.names=FALSE,
col.names=c("Tiefe","correlationE1\t","corE1pWert\t","correlationE2\t",
"corE2pWert\t","correlationE3\t","corE3pWert\t"))

par(oma=c(0,0.5,0,2.5))
plot(Tiefe, correlationE3, type="o", ylim=c(-1,1), xlab="Tiefe [m]",
ylab="Korrelationskoeffizient",
main="Korrelation zwischen Mittlerer Korngröße und Eigenwert E3",
cex.main=0.9)
abline(h=0, lty=5, col="darkgray")

par(new=TRUE)
plot(Tiefe, correlationE3p, type="o", col="green", xlab="", ylab="",
axes=FALSE)
axis(side=4, cex.axis=0.9)
mtext("p-Wert", side=4, line=3, col="green")
abline(h=0.05, lty=3, col="green")

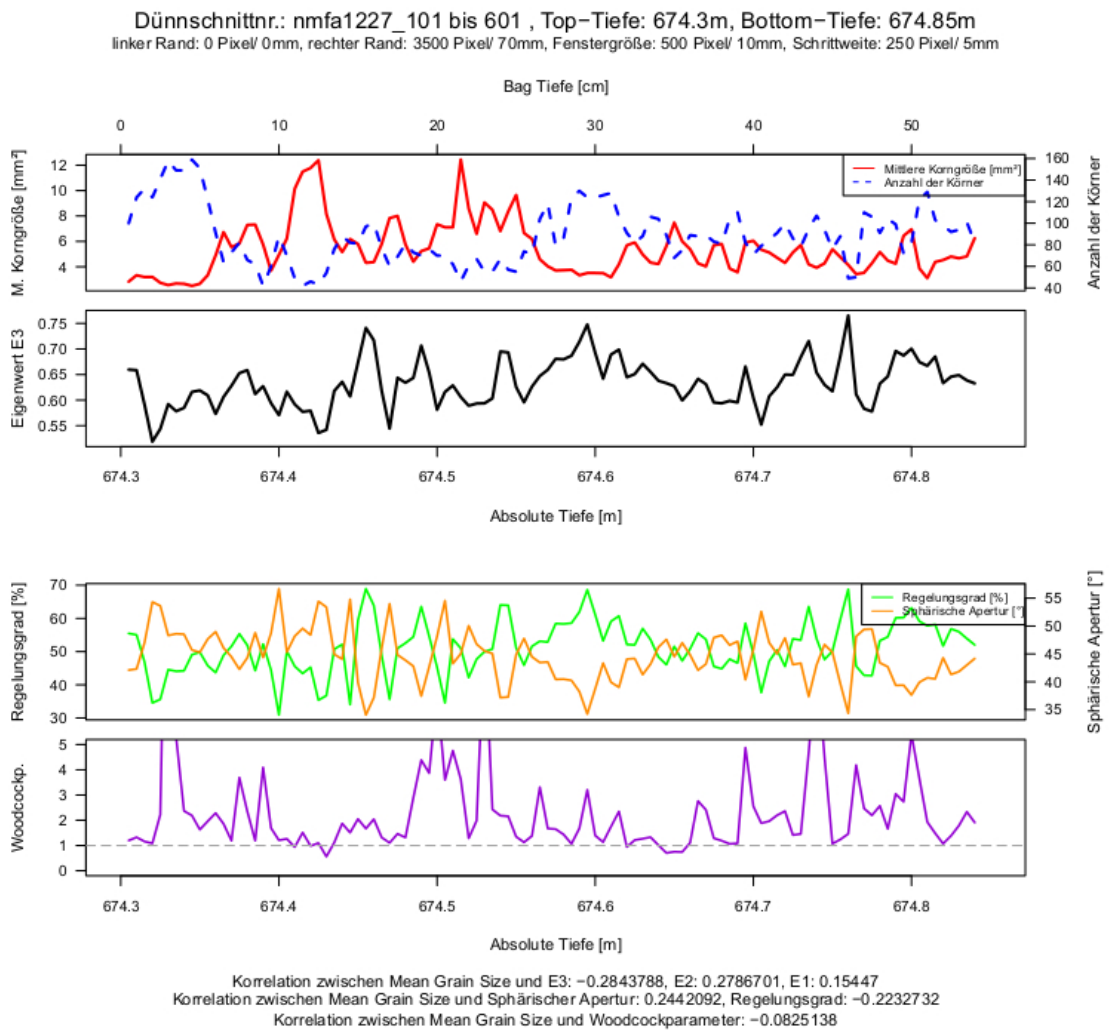
```

8.2 Tabellen

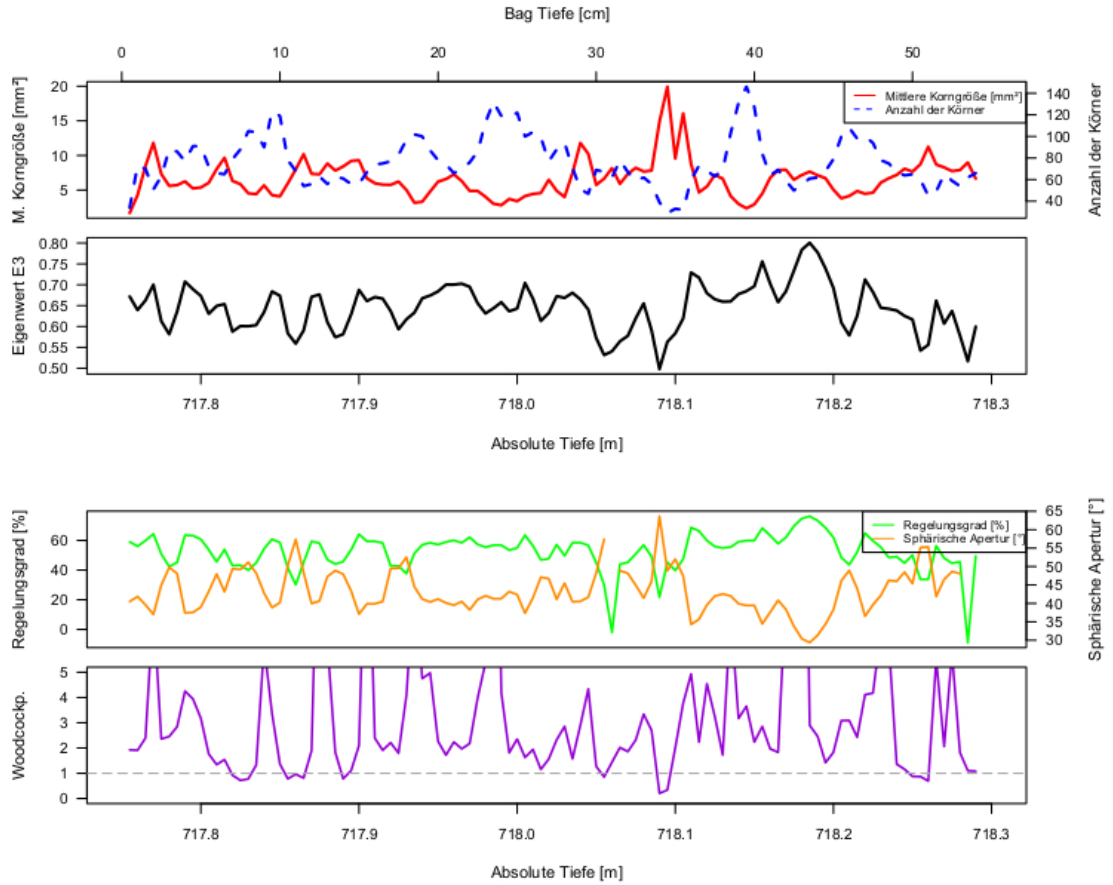
8.2.1 Korrelation von E3 und Mittlerer Korngröße

"Tiefe"	"correlationE3"	"corE3pWert"
674.58	-0.284378824287827	0.00285620723556653
718.03	-0.295842761630489	0.00187970373371591
740.03	-0.323167611016717	0.000646316210411606
755.98	-0.221829090061466	0.0210372057248156
784.03	-0.0916898733243375	0.345286535898554
822.53	-0.190894100856528	0.0478178174611314
888.53	-0.05129418575727	0.598048290800076
921.53	-0.0606360862120226	0.533028150812533
971.03	-0.228587976953432	0.0173356995471885
997.98	-0.258989801571422	0.00679914275578152
1026.03	-0.273493830824033	0.00418361682099597
1845.53	0.361205904774384	0.000122740898467422
2131.53	0.483226855667967	1.17672071198172e-07
2148.03	-0.0327882847257233	0.736213791182174
2203.03	0.246823468454703	0.0100184951557289
2258.03	-0.260316264923947	0.00651075886132424

8.3 Alle 16 Bag Plots ohne hinterlegte Bilder

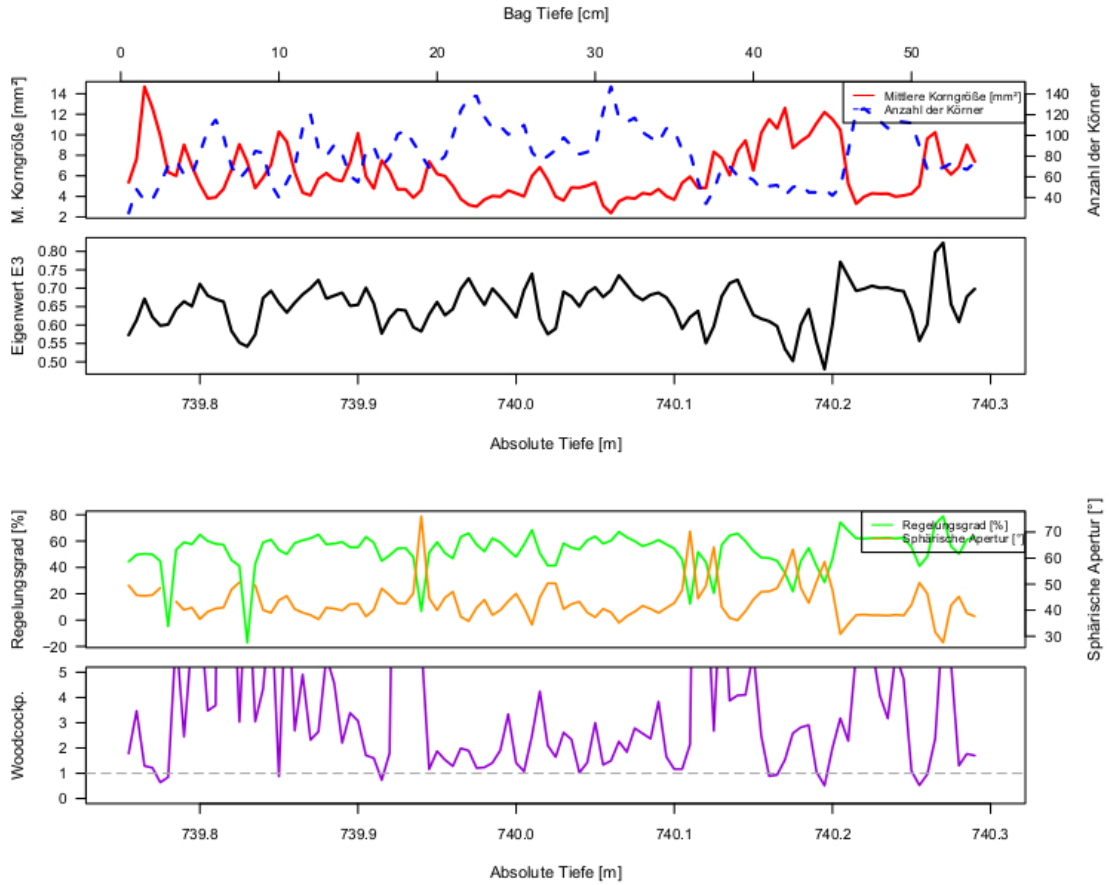


Dünnschnittnr.: nmfa1306_101 bis 601 , Top-Tiefe: 717.75m, Bottom-Tiefe: 718.3m
 linker Rand: 0 Pixel/ 0mm, rechter Rand: 3500 Pixel/ 70mm, Fenstergröße: 500 Pixel/ 10mm, Schrittweite: 250 Pixel/ 5mm



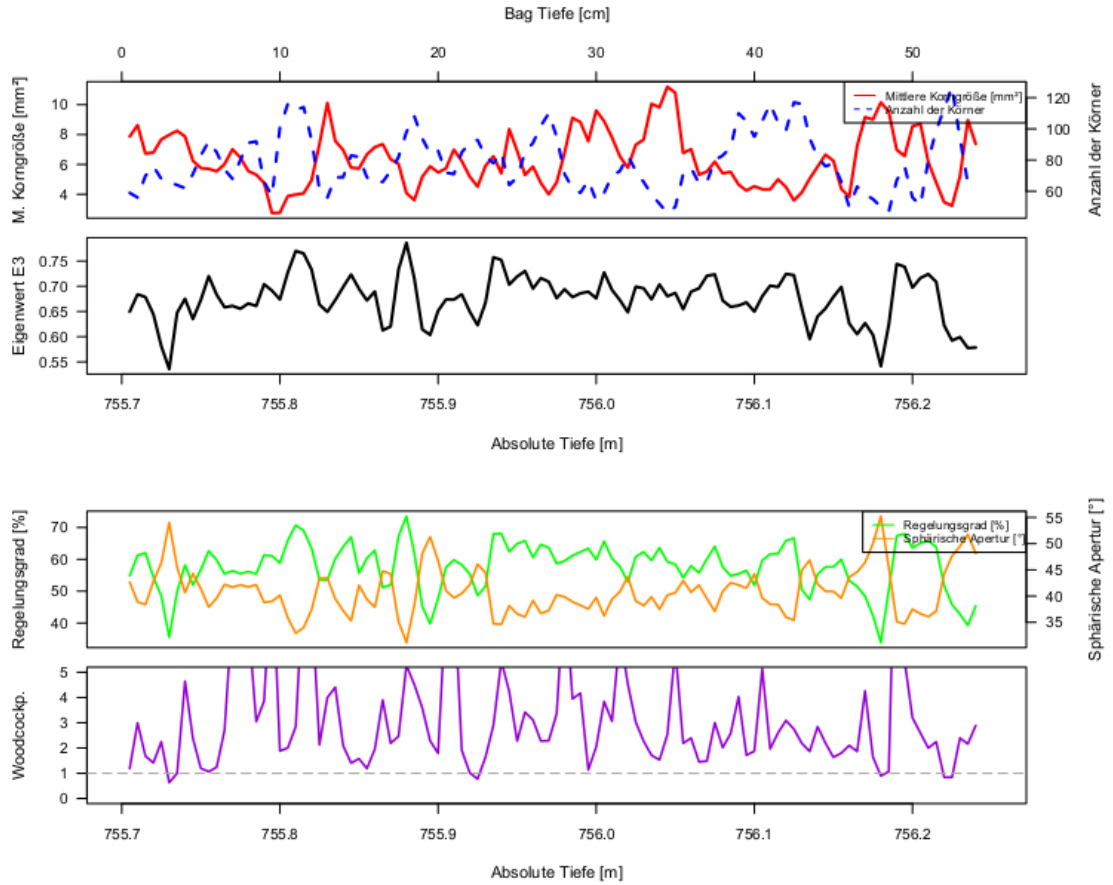
Korrelation zwischen Mean Grain Size und E3: -0.2958428, E2: 0.3865536, E1: -0.03870585
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Sphärischer Apertur: NA, Regelungsgrad: -0.260618
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Woodcockparameter: -0.1258307

Dünnschnittnr.: nmfa1346_101 bis 601 , Top-Tiefe: 739.75m, Bottom-Tiefe: 740.3m
 linker Rand: 0 Pixel/ 0mm, rechter Rand: 3500 Pixel/ 70mm, Fenstergröße: 500 Pixel/ 10mm, Schrittweite: 250 Pixel/ 5mm



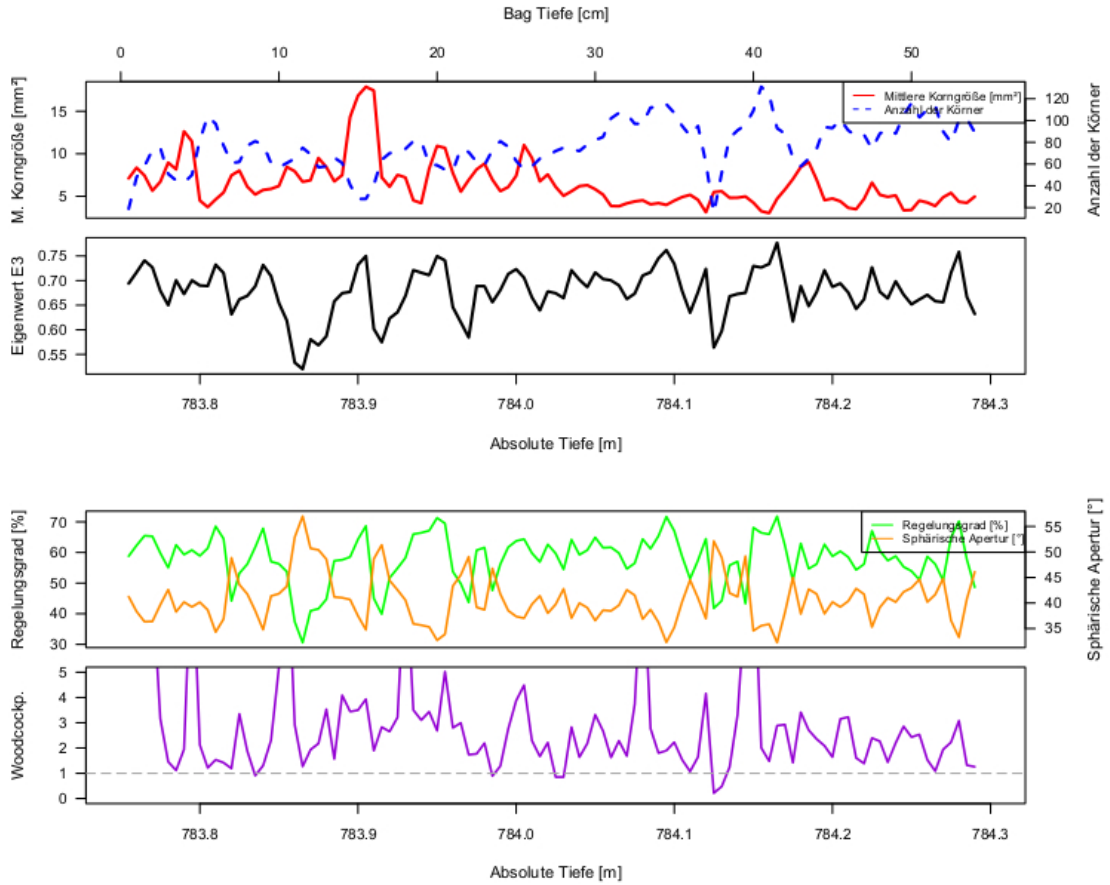
Korrelation zwischen Mean Grain Size und E3: -0.3231676, E2: 0.3382468, E1: 0.1525139
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Sphärischer Apertur: NA, Regulationsgrad: -0.2310119
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Woodcockparameter: -0.1533653

Dünnschnittnr.: nmfa1375_101 bis 601 , Top-Tiefe: 755.7m, Bottom-Tiefe: 756.25m
 linker Rand: 0 Pixel/ 0mm, rechter Rand: 3500 Pixel/ 70mm, Fenstergröße: 500 Pixel/ 10mm, Schrittweite: 250 Pixel/ 5mm



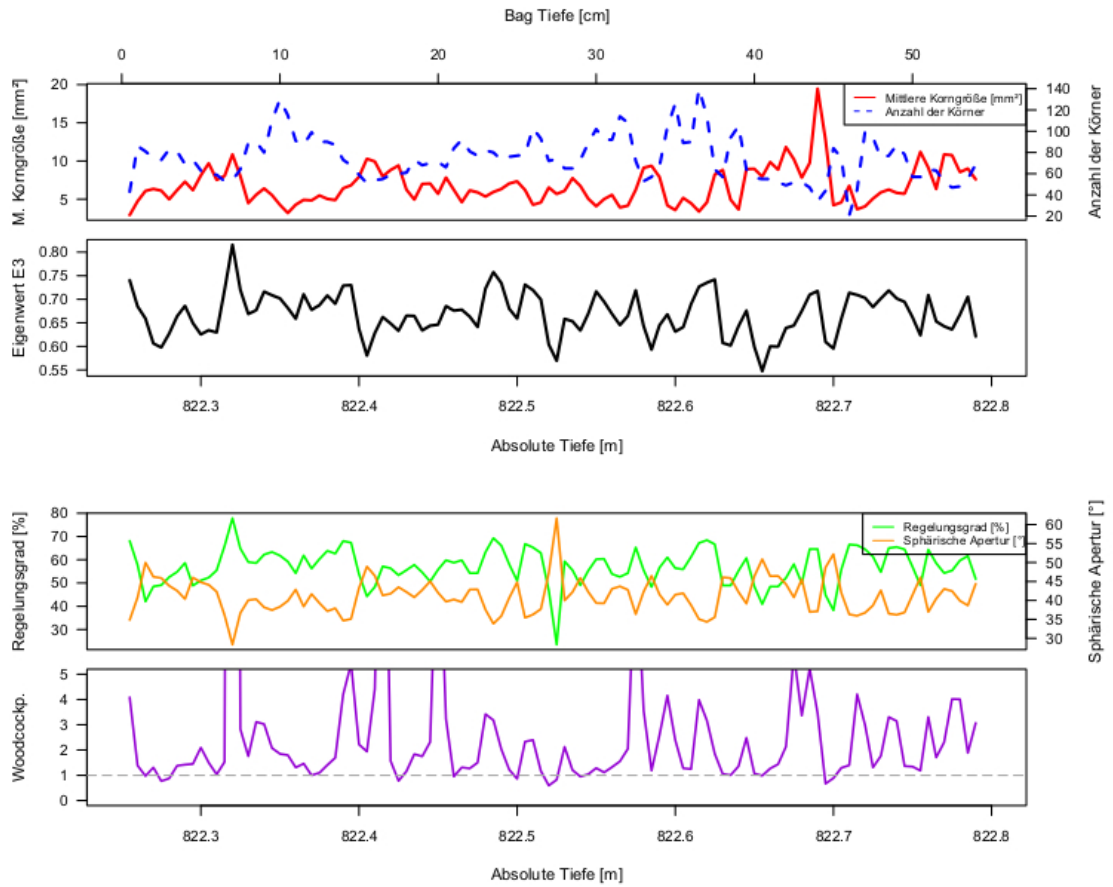
Korrelation zwischen Mean Grain Size und E3: -0.2218291, E2: 0.145482, E1: 0.2227239
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Sphärischer Apertur: 0.1869435, Regelungsgrad: -0.1702517
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Woodcockparameter: -0.03816309

Dünnschnittnr.: nmfa1426_101 bis 601 , Top-Tiefe: 783.75m, Bottom-Tiefe: 784.3m
 linker Rand: 0 Pixel/ 0mm, rechter Rand: 3500 Pixel/ 70mm, Fenstergröße: 500 Pixel/ 10mm, Schrittweite: 250 Pixel/ 5mm



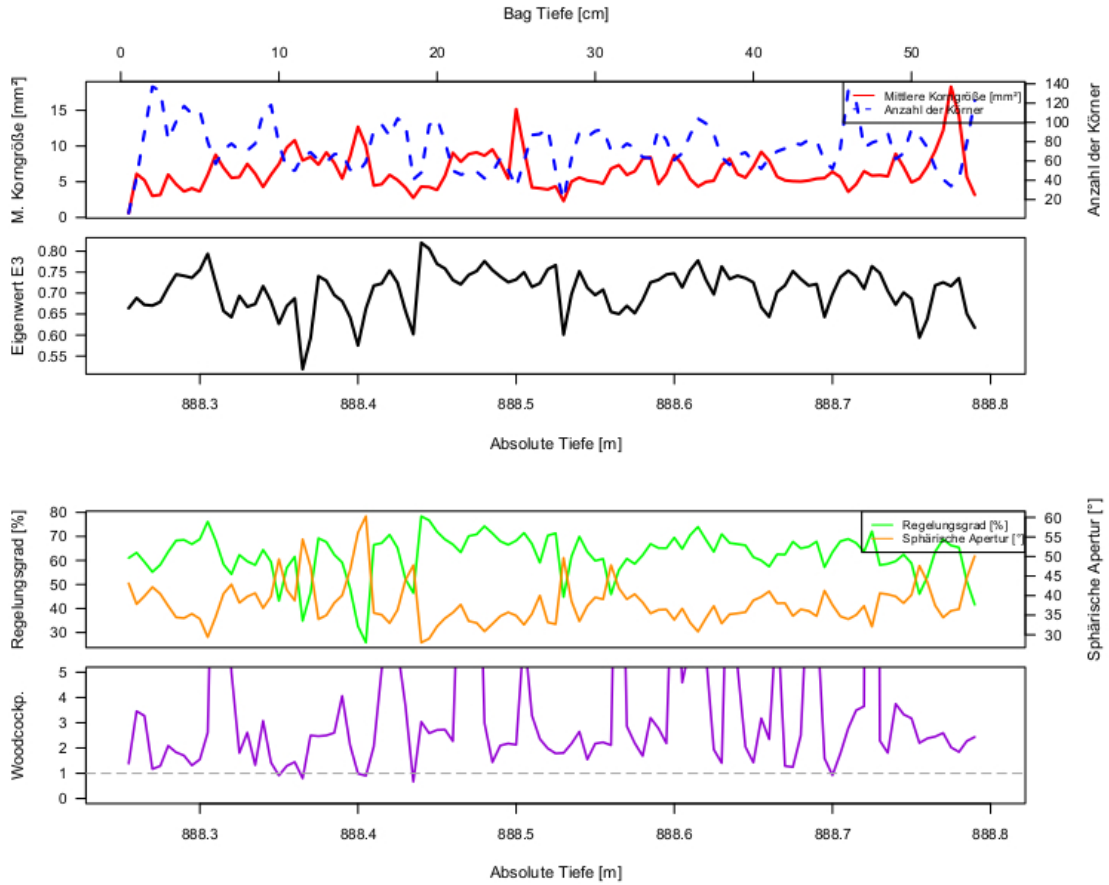
Korrelation zwischen Mean Grain Size und E3: -0.09168987, E2: -0.06922428, E1: 0.2587363
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Sphärischer Apertur: 0.07547836, Regelungsgrad: -0.05694702
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Woodcockparameter: 0.1736057

Dünnschnittnr.: nmfa1496_101 bis 601 , Top-Tiefe: 822.25m, Bottom-Tiefe: 822.8m
 linker Rand: 0 Pixel/ 0mm, rechter Rand: 3500 Pixel/ 70mm, Fenstergröße: 500 Pixel/ 10mm, Schrittweite: 250 Pixel/ 5mm



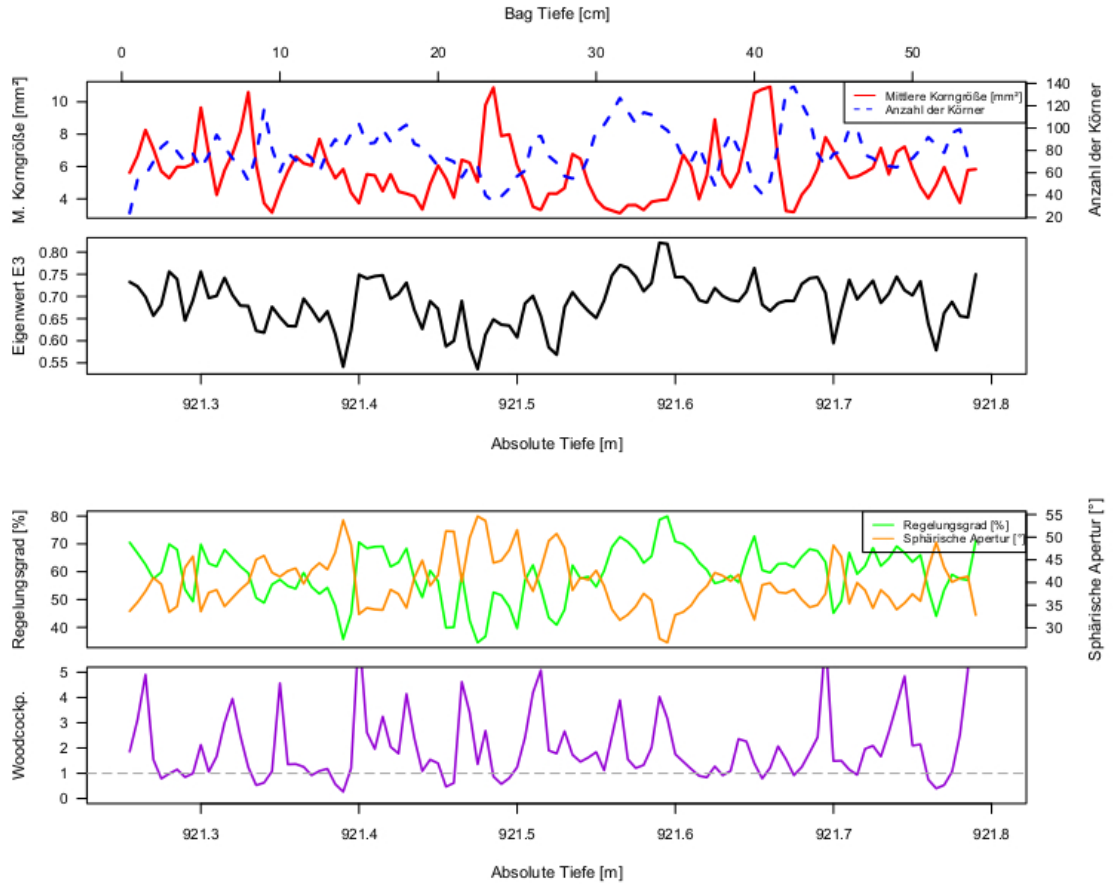
Korrelation zwischen Mean Grain Size und E3: -0.1908941, E2: 0.04392474, E1: 0.3159578
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Sphärischer Apertur: 0.1580021, Regelungsgrad: -0.145745
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Woodcockparameter: 0.1783475

Dünnschnittnr.: nmfa1616_101 bis 601 , Top-Tiefe: 888.25m, Bottom-Tiefe: 888.8m
 linker Rand: 0 Pixel/ 0mm, rechter Rand: 3500 Pixel/ 70mm, Fenstergröße: 500 Pixel/ 10mm, Schrittweite: 250 Pixel/ 5mm



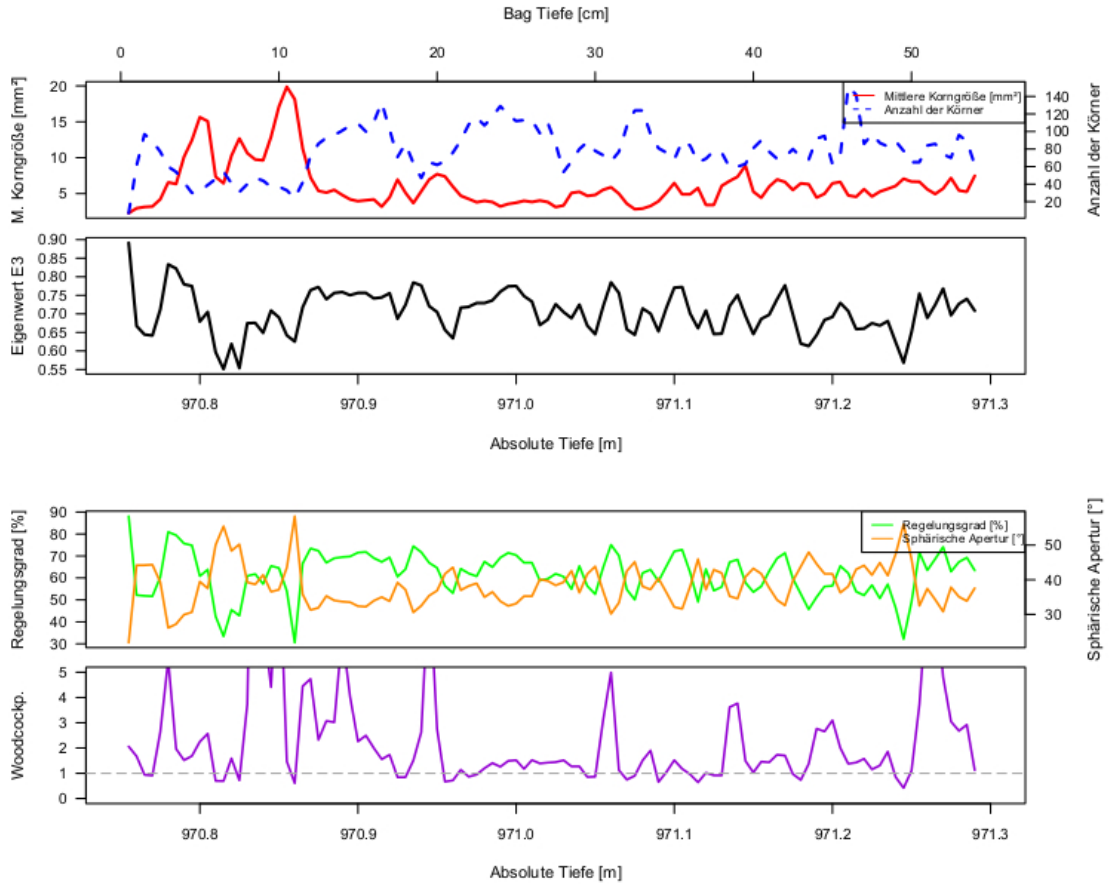
Korrelation zwischen Mean Grain Size und E3: -0.05129419, E2: 0.02148294, E1: 0.0713716
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Sphärischer Apertur: 0.05226465, Regelungsgrad: -0.0559437
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Woodcockparameter: 0.0377741

Dünnschnittnr.: nmfa1676_101 bis 601 , Top-Tiefe: 921.25m, Bottom-Tiefe: 921.8m
 linker Rand: 0 Pixel/ 0mm, rechter Rand: 3500 Pixel/ 70mm, Fenstergröße: 500 Pixel/ 10mm, Schrittweite: 250 Pixel/ 5mm



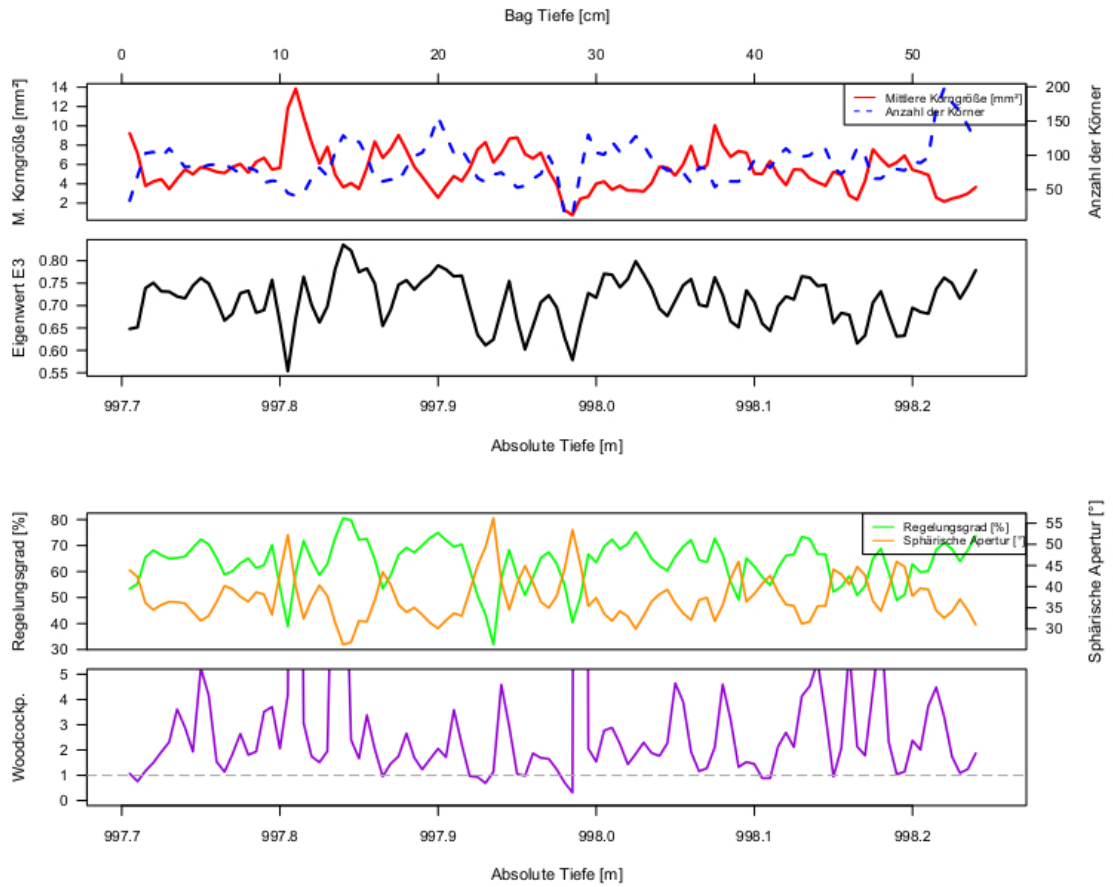
Korrelation zwischen Mean Grain Size und E3: -0.06063609, E2: 0.07113844, E1: 0.0005008393
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Sphärischer Apertur: 0.07785238, Regelungsgrad: -0.06174312
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Woodcockparameter: -0.04188496

Dünnschnittnr.: nmfa1766_101 bis 601 , Top-Tiefe: 970.75m, Bottom-Tiefe: 971.3m
 linker Rand: 0 Pixel/ 0mm, rechter Rand: 3500 Pixel/ 70mm, Fenstergröße: 500 Pixel/ 10mm, Schrittweite: 250 Pixel/ 5mm



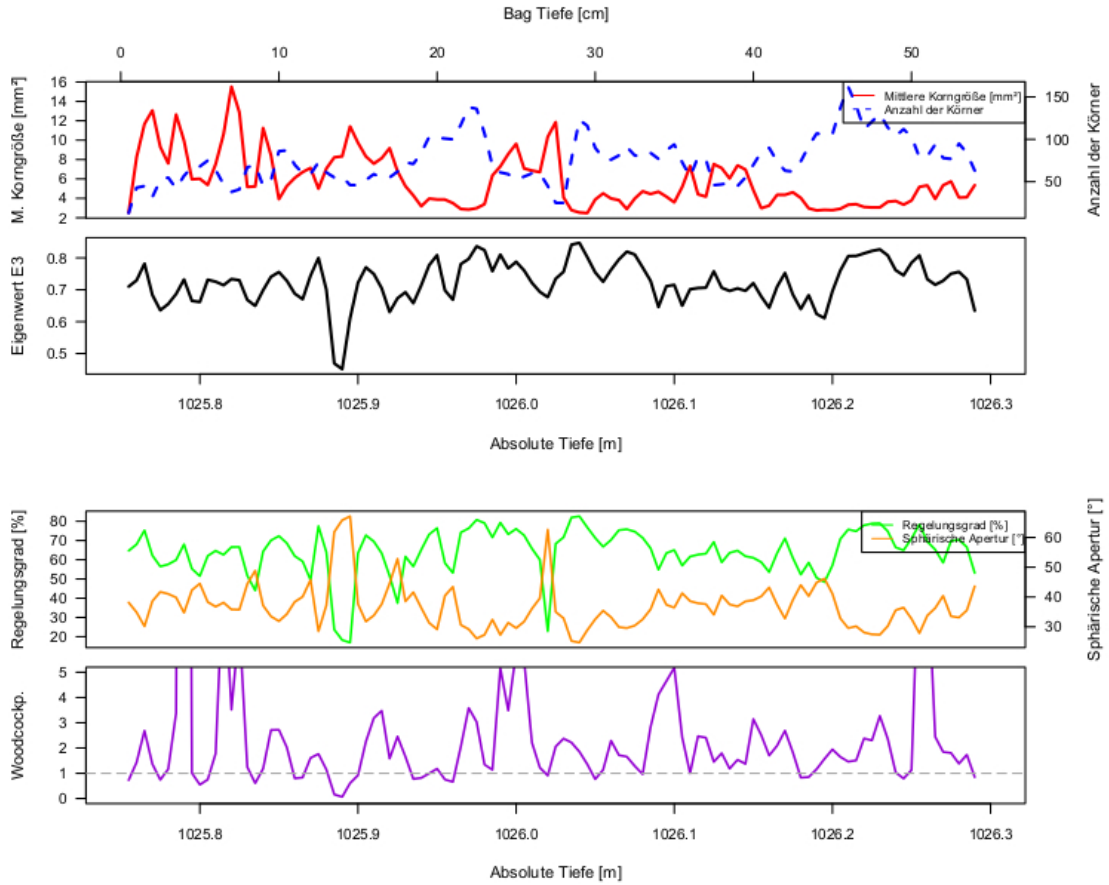
Korrelation zwischen Mean Grain Size und E3: -0.228588, E2: 0.062572, E1: 0.3977732
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Sphärischer Apertur: 0.2088541, Regelungsgrad: -0.1865648
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Woodcockparameter: 0.2518981

Dünnschnittnr.: nmfa1815_101 bis 601 , Top-Tiefe: 997.7m, Bottom-Tiefe: 998.25m
 linker Rand: 0 Pixel/ 0mm, rechter Rand: 3500 Pixel/ 70mm, Fenstergröße: 500 Pixel/ 10mm, Schrittweite: 250 Pixel/ 5mm



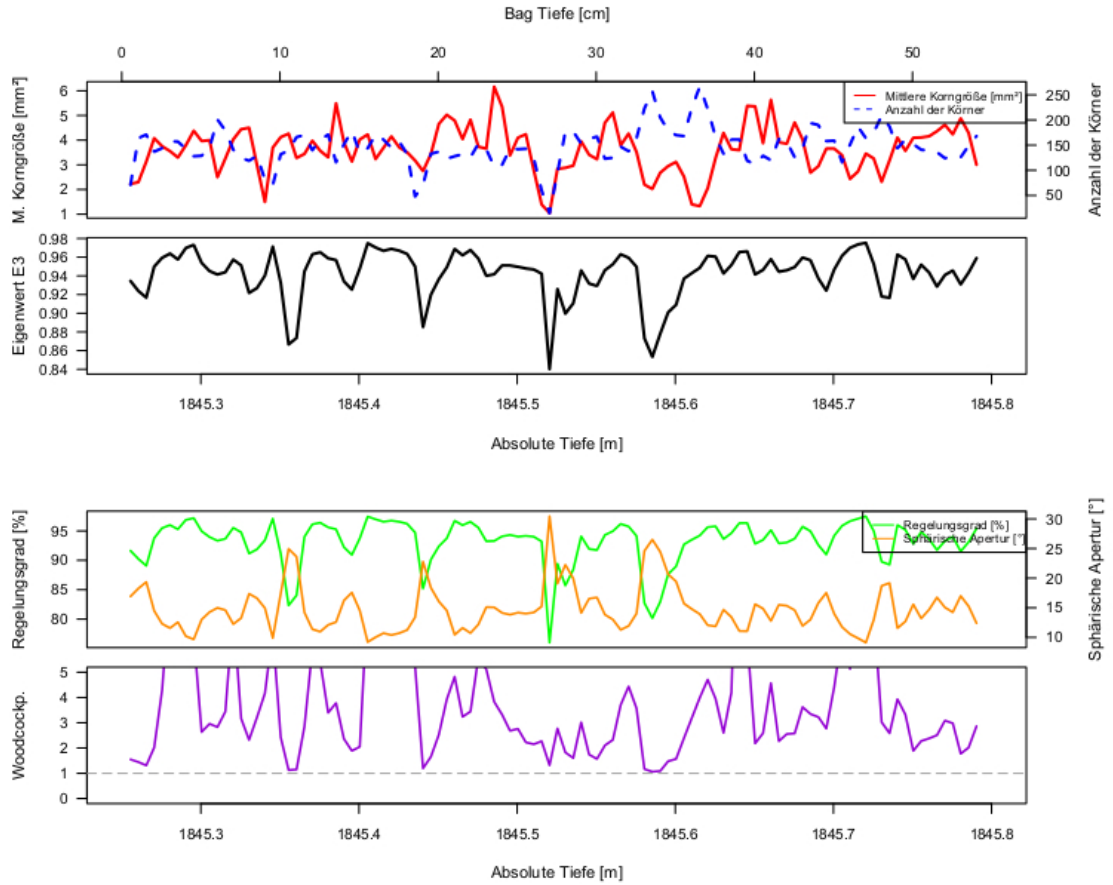
Korrelation zwischen Mean Grain Size und E3: -0.2589898 , E2: 0.1259855 , E1: 0.3429336
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Sphärischer Apertur: 0.2267337 , Regelungsgrad: -0.2315506
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Woodcockparameter: -0.01543046

Dünnschnittnr.: nmfa1866_101 bis 601 , Top-Tiefe: 1025.75m, Bottom-Tiefe: 1026.3m
 linker Rand: 0 Pixel/ 0mm, rechter Rand: 3500 Pixel/ 70mm, Fenstergröße: 500 Pixel/ 10mm, Schrittweite: 250 Pixel/ 5mm



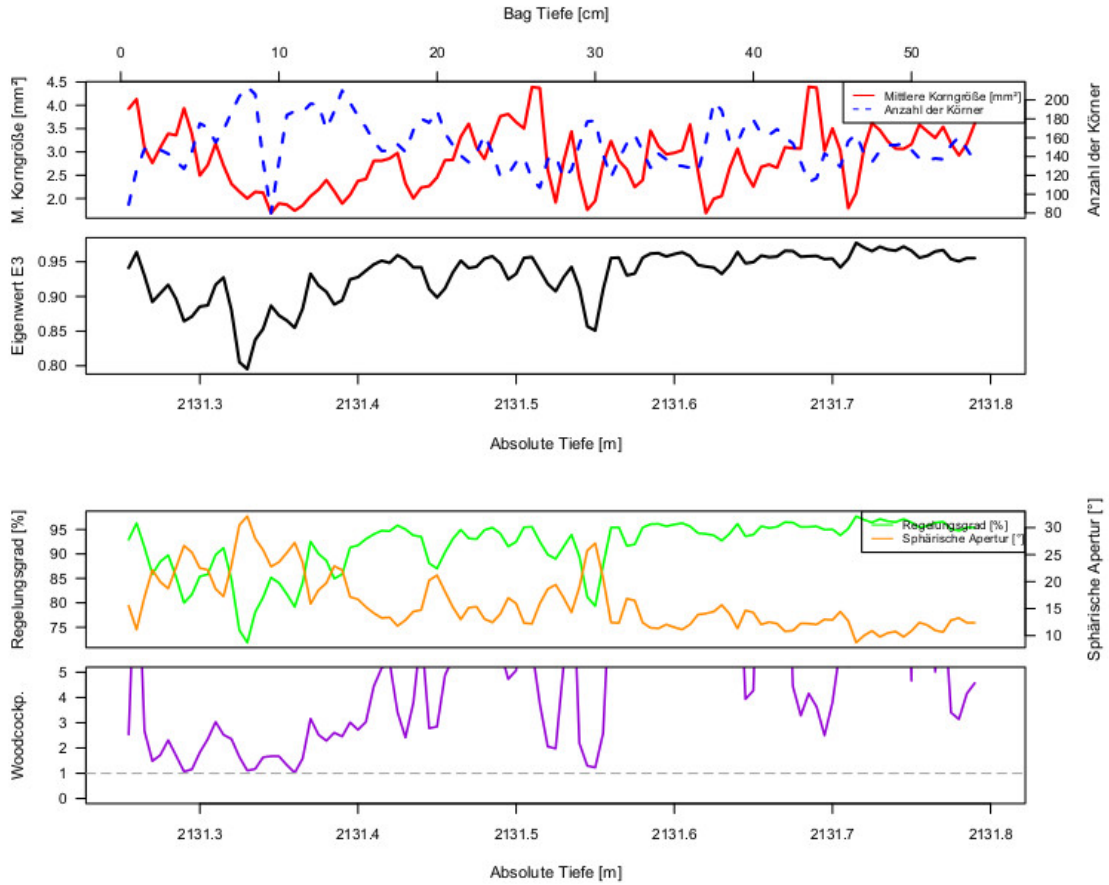
Korrelation zwischen Mean Grain Size und E3: -0.2734938, E2: 0.1560412, E1: 0.3580549
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Sphärischer Apertur: 0.2976942, Regelungsgrad: -0.2805381
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Woodcockparameter: 0.1839151

Dünnschnittnr.: nmfa3356_101 bis 601, Top-Tiefe: 1845.25m, Bottom-Tiefe: 1845.8m
 linker Rand: 0 Pixel/ 0mm, rechter Rand: 3500 Pixel/ 70mm, Fenstergröße: 525 Pixel/ 10.5mm, Schrittweite: 250 Pixel/ 5mm



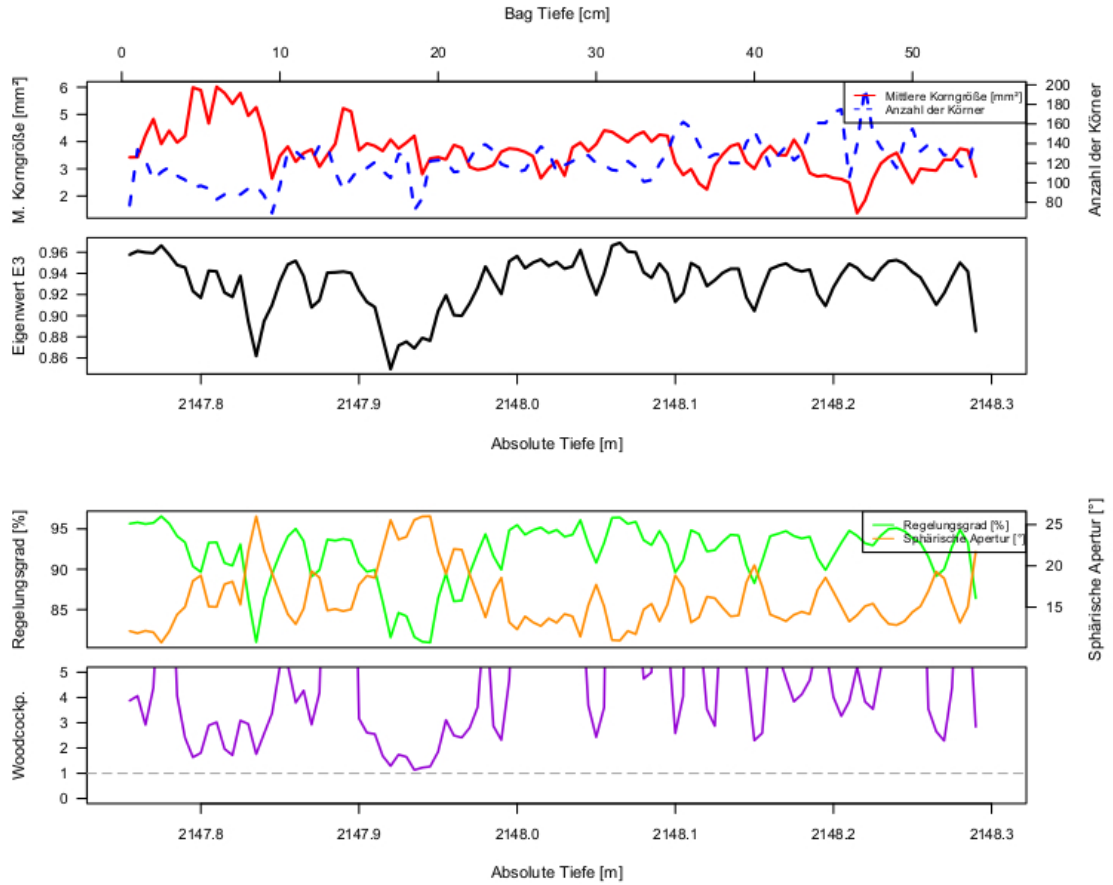
Korrelation zwischen Mean Grain Size und E3: 0.3612059, E2: -0.3422709, E1: -0.3338422
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Sphärischer Apertur: -0.3572801, Regelungsgrad: 0.3729842
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Woodcockparameter: 0.0390869

Dünnschnittnr.: nmfa3876_101 bis 601 , Top-Tiefe: 2131.25m, Bottom-Tiefe: 2131.8m
 linker Rand: 0 Pixel/ 0mm, rechter Rand: 3500 Pixel/ 70mm, Fenstergröße: 500 Pixel/ 10mm, Schrittweite: 250 Pixel/ 5mm



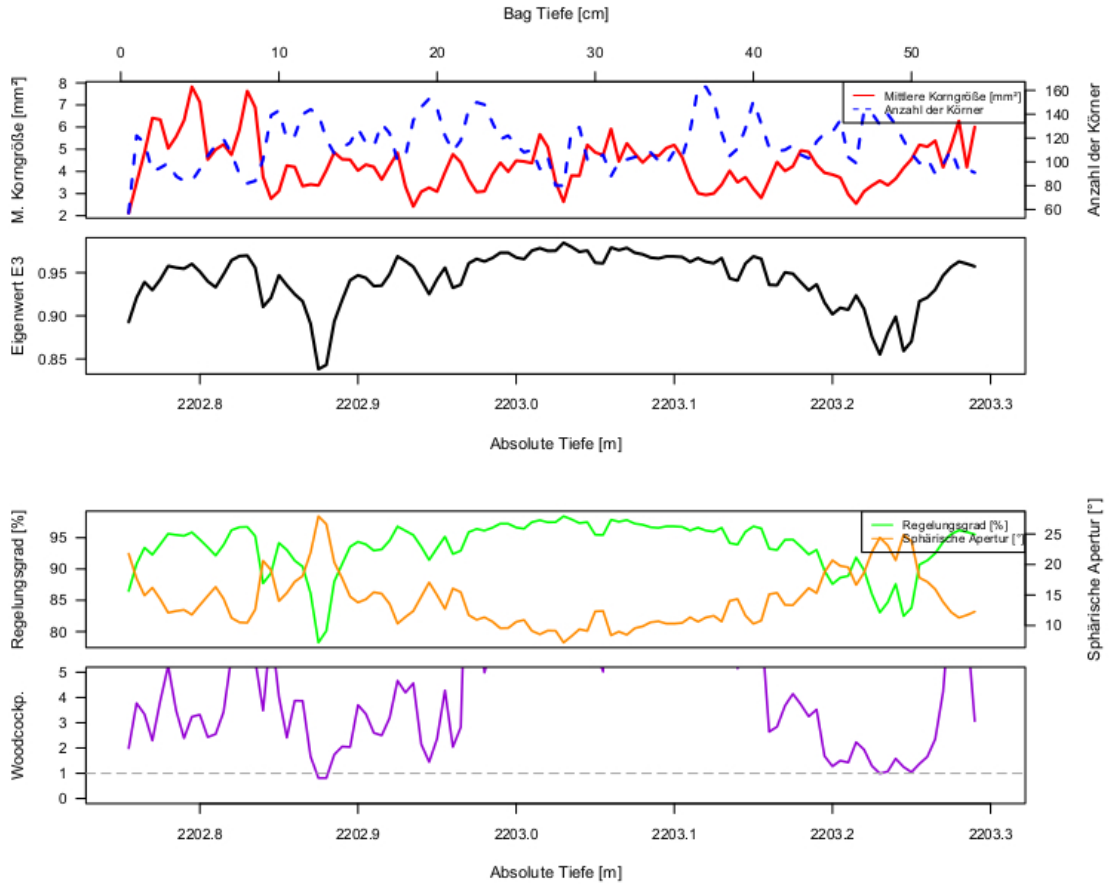
Korrelation zwischen Mean Grain Size und E3: 0.4832269, E2: -0.4659928, E1: -0.4306713
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Sphärischer Apertur: -0.4735192, Regulationsgrad: 0.4635892
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Woodcockparameter: 0.2030747

Dünnschnittnr.: nmfa3906_101 bis 601, Top-Tiefe: 2147.75m, Bottom-Tiefe: 2148.3m
 linker Rand: 0 Pixel/ 0mm, rechter Rand: 3500 Pixel/ 70mm, Fenstergröße: 500 Pixel/ 10mm, Schrittweite: 250 Pixel/ 5mm



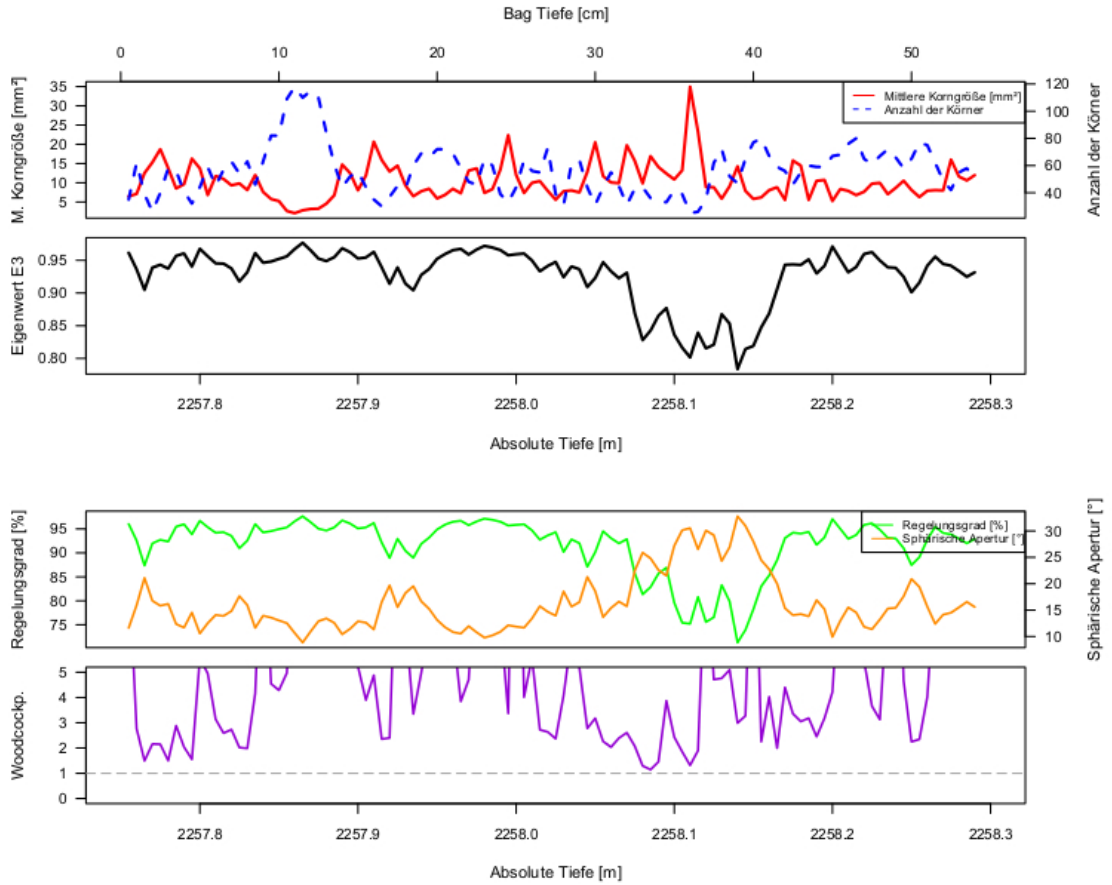
Korrelation zwischen Mean Grain Size und E3: -0.03278828, E2: 0.0929428, E1: -0.2449622
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Sphärischer Apertur: 0.05607609, Regelungsgrad: -0.06506787
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Woodcockparameter: -0.06975348

Dünnschnittnr.: nmfa4006_101 bis 601 , Top-Tiefe: 2202.75m, Bottom-Tiefe: 2203.3m
 linker Rand: 0 Pixel/ 0mm, rechter Rand: 3500 Pixel/ 70mm, Fenstergröße: 500 Pixel/ 10mm, Schrittweite: 250 Pixel/ 5mm



Korrelation zwischen Mean Grain Size und E3: 0.2468235, E2: -0.2251693, E1: -0.2724659
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Sphärischer Apertur: -0.2493219, Regelungsgrad: 0.2570566
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Woodcockparameter: 0.06550044

Dünnschnittnr.: nmfa4106_101 bis 601, Top-Tiefe: 2257.75m, Bottom-Tiefe: 2258.3m
 linker Rand: 0 Pixel/ 0mm, rechter Rand: 3500 Pixel/ 70mm, Fenstergröße: 500 Pixel/ 10mm, Schrittweite: 250 Pixel/ 5mm



Korrelation zwischen Mean Grain Size und E3: -0.2603163, E2: 0.3437604, E1: 0.04606923
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Sphärischer Apertur: 0.2598465, Regelungsgrad: -0.24848
 Korrelation zwischen Mean Grain Size und Woodcockparameter: -0.1927447