

Ernst-Moritz-Arndt Universität Greifswald
Institut für Geographie und Geologie



Bachelorarbeit

Physikalische Eigenschaften und Spurenstoffe im
grönländischen Eis
- Korrelationsberechnungen zwischen Korngröße bzw.
Eigenwert und Spurenstoffkonzentrationen an ausgewählten
Stücken des NEEM-Eiskerns -

vorgelegt von: Ina Kleitz
Fridtjof-Nansen-Str. 5
17493 Greifswald
ik102744@uni-greifswald.de

Erstgutachter: Dr. Ilka Weikusat
Zweitgutachter: Prof. Dr. Reinhard Lampe

Datum: Greifswald, 12. Juli 2013

Danksagung

Als erstes möchte ich Ilka Weikusat für die Vergabe des interessanten Themas danken, sowie Ilka Weikusat und Daniela Jansen für die ausgezeichnete Betreuung in Bremerhaven. Die Arbeit hat mir sehr viel Spaß gemacht und es war mir eine Freude, Teil des Projektes sein zu dürfen.

Des Weiteren danke ich Prof. Dr. Reinhard Lampe für die Betreuung an der Universität Greifswald, für hilfreiche Anregungen und notwendiges Hinterfragen.

Bedanken möchte ich mich auch bei Anna Wegner, die mir den Einstieg in die Glaziologie ermöglichte und viele nützliche Tipps für diese Arbeit gab.

Ich bedanke mich bei Sepp Kipfstuhl und Stephanie Weißbach: sie gaben mir sowohl während dieser Arbeit, als auch während meines Praktikums die Möglichkeit, im Labor mitzuarbeiten und beantworteten geduldig meine Fragen.

Außerdem danke ich allen Mitarbeitern in der Glaziologie für unterhaltsame Mittagspausen und spannende Vorträge. Danken möchte ich auch Anneke Tammen, die mir insbesondere im Umgang mit R eine große Hilfe war.

Aber vor allem danke ich meiner Familie, die mich stets motiviert, bekocht, in allem unterstützt – und diese Arbeit als erstes lesen wird.

Zusammenfassung

Um Klimaprozesse besser zu verstehen und vorhersagen zu können, werden aus Eiskernen aus Grönland oder der Antarktis mit unterschiedlichen Methoden Daten gewonnen. Auf der einen Seite kann die Orientierung der c-Achsen der einzelnen Eiskristalle Aufschluss über das Fließverhalten eines Eiskörpers geben. Auf der anderen Seite verraten eingetragene Spurenstoffe etwas über die frühere mittlere Lufttemperatur auf der Erde und die atmosphärische Zirkulation. Es besteht die Theorie, dass Zusammenhänge zwischen Spurenstoffen und der Mikrostruktur des Eises bestehen. So können z. B. Korngrößen im Eis oder aber auch die Orientierung der c-Achsen durch Spurenstoffe beeinflusst werden.

Ziel dieser Arbeit war es, diese Zusammenhänge statistisch nachzuweisen. Dazu wurden Korrelationen nach Pearson und Spearman sowie Kreuzkorrelationen zwischen der mittleren Korngröße bzw. der Orientierung der c-Achsen und den chemischen Parametern berechnet.

Die Berechnungen wurden für vier Bags des NEEM-Eiskerns (North Greenland Eemian Ice Drilling) durchgeführt, die aus einer Tiefe von ca. 1845 m bis 2202 m stammen. Auf Basis der errechneten Korrelationskoeffizienten konnten jedoch keine bzw. nur sehr schwache Zusammenhänge nachgewiesen werden. Es wird hier vermutet, dass Fehlerquellen bei der Präparation sowie der Messung der Proben und bei der späteren Datenverarbeitung die Ergebnisse beeinflusst haben.

Abstract

Predicting future climate requires deep understanding of past climatic processes. Deep ice cores drilled in Greenland and Antarctica provide an excellent archive for climate proxies, which can be extracted by several methods.

Flow properties of ice sheets can be derived by measuring c-axes orientations; furthermore trace elements and impurities can help to reconstruct atmospheric circulation patterns and provide information about the paleo-temperature. It is assumed that the impurity content of the ice does influence the grain size as well as c-axes orientations.

The aim of this thesis is to investigate the relations between impurities and ice microstructure statistically. This was done by calculating correlations (Pearson and Spearman) and cross-correlations between mean grain sizes, c-axes orientations and chemical components. The data for the calculations was taken from four bags of the NEEM ice core (North Greenland Eemian Ice Drilling), drilled at depths of approximately 1845 m to 2202 m.

The correlation coefficients showed only very weak statistical relations between the parameters. However, during preparation and measurement of the samples as well as during processing of the data, several error sources could be detected, possibly causing slight distortions of the results.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	7
2 Grundlagen	8
2.1 Struktur von Eis.....	8
2.2 Verdichtung von Schnee zu Eis	9
2.3 Eigenschaften von Eis	11
2.3.1 Mechanische Eigenschaften	11
2.3.2 Optische Eigenschaften	14
2.3.3 C-Achsen.....	15
2.4 Spurenstoffe und Unreinheiten im Eis (Aerosole)	17
2.4.1 Quellen, Transport und Deposition	17
2.4.2 Spurenstoffeintrag in Grönland	19
2.4.3 Lokation im Eis	21
2.4.4 Mögliche Effekte auf die physikalischen Eigenschaften	21
3 Untersuchungsgebiet und Probenmaterial	22
4 Methoden.....	23
4.1 Methoden für die Messung physikalischer Parameter	23
4.2 Methoden für die Messung chemischer Parameter	25
4.3 Visuelle Stratigraphie mittels Linescan-Images.....	27
4.4 Korrelationsmethoden	27
4.4.1 Korrelation nach Pearson	27
4.4.2 Korrelation nach Spearman	29
4.4.3 Kreuzkorrelation.....	30
4.5 Datenverarbeitung und verwendete Software	31
4.5.1 cAxes- und RunningMean Programm.....	31
4.5.2 Aufbau der Plots.....	32
5 Ergebnisse	34
5.1 Vorläufiges Ergebnis.....	34
5.2 Korrigiertes Ergebnis	36
5.2.1 Linescan-Plot.....	36
5.2.2 Bag 3356	38
5.2.3 Bag 3876	40

5.2.4 Bag 3906	42
5.2.5 Bag 4006	44
5.3 Korrelation der mittleren Korngröße mit den chemischen Parametern	46
5.4 Korrelation des Eigenwertes E3 mit den chemischen Parametern.....	49
5.5 Faktorenanalyse.....	51
5.6 Fallstudie 3356	53
6 Diskussion	57
6.1 Lücken in den Datensätzen	58
6.2 Schnittplan.....	59
6.3 Tiefenzuordnung	60
6.4 Schichtung.....	62
6.5 Einfluss der Spurenstoffe	63
7 Zusammenfassung und Schlussfolgerung	65
8 Literaturverzeichnis.....	67
9 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	73
10 Anhang	I
10.1 Plots der Total Area.....	II
10.2 Tests auf Normalverteilung.....	III
10.3 Trend-Bilder	VI
10.4 Scatterplots	VII
10.5 Plots der Kreuzkorrelation	XVII
10.6 Ergebnisse der Korrelationsberechnungen.....	XXVII
10.7 Ergebnisse der Faktorenanalyse	XXXIV
10.8 Skripte für die Arbeiten in R	XXXIX

1 Einleitung

Eis ist nicht nur ein vielseitiges und faszinierendes Material, die natürlichen Eismassen der Erde gehören auch zu den wichtigsten Klimaarchiven. Aus Eisbohrkernen gewonnene Isotopendaten, Luftblasen und Mikrostrukturanalysen können helfen, klimarelevante Prozesse und Entwicklungen besser zu verstehen.

Das NEEM-Projekt (North Greenland Eemian Ice Drilling) wurde durchgeführt, um einen grönländischen Eiskern mit vollständigen Lagen des letzten Interglazials, dem Eem, zu erhalten. In den bis dato gebohrten Kernen aus dem grönländischen Eisschild waren diese Lagen bereits geschmolzen oder durch das Eisfließen nahe dem Gesteinsbett gestört (http://neem.dk/about_neem/). Lediglich an Kernen aus der Antarktis konnten schon Lagen des Eem analysiert werden. Mit dem NEEM-Kern besteht nun die Möglichkeit, diese Lagen aus Grönland und der Antarktis zu vergleichen. Das Eem endete vor ca. 115.000 Jahren und gilt als Analog für künftiges Klima. Die Temperaturen in Grönland waren zu dieser Zeit ca. 3-5 °C wärmer als heute; für die Zukunft wird eine Erwärmung von 2-4 °C pro Jahrhundert erwartet (http://neem.dk/about_neem/). Diese Datierungen werden mit Hilfe von Computersimulationen des Eisfließens durchgeführt. Numerische Modelle berücksichtigen jedoch selten die Anisotropie des Eises in einer angemessenen Weise. In einem Mikrostrukturprojekt soll nun nach Möglichkeiten gesucht werden, das Eisfließgesetz zu verbessern und damit auch die Modelle präziser zu berechnen.

Die Verteilung und Orientierung der c-Achsen ist von großer Bedeutung für das Fließverhalten des Eises, da sie direkt von der Deformations- und Rekristallisationsgeschichte des Eises abhängen und aufgrund der Anisotropie große Auswirkungen auf das Fließverhalten der einzelnen Schichten haben. Des Weiteren sind die im Eis enthaltenen Spurenstoffe nicht nur eine bedeutende Quelle für Paläoklimadaten, es wird auch vermutet, dass sie selbst das Deformationsverhalten des Eises beeinflussen können. So treten beispielsweise in Eiskernen besonders hohe Konzentrationen von Staubpartikeln zusammen mit besonders kleinen Körnern auf (da während der Verdichtung von Schnee zu Eis mehrere Kristalle verschmelzen können, werden sie im Folgenden konventionsgemäß als Körner bezeichnet). Es wird davon ausgegangen, dass die Spurenstoffe Einfluss auf die Größe der Körner, sowie auf die Mobilität der Korngrenzen haben, während die Orientierung der c-Achsen durch Deformation bestimmt wird. Es ist jedoch durchaus denkbar, dass auch Zusammenhänge zwischen den

c-Achsenorientierungen und den Spurenstoffen bestehen. Ziel dieser Arbeit ist es nun, diese Zusammenhänge darzustellen und statistisch zu erfassen.

Es soll den Fragen nachgegangen werden, ob Korrelationen zwischen Korngrößen bzw. Eigenwerten der c-Achsenverteilung und der Spurenstoffkonzentration auftreten, wie diese ausgeprägt sind und ob sie mit zunehmender Tiefe Veränderungen unterliegen. Mit Hilfe dieser Ergebnisse können dann Aussagen darüber getroffen werden, inwieweit kausale Beziehungen dieser Komponenten möglich wären. Dazu werden vier Kernstücke aus dem Bereich von ca. 1845 m bis 2202 m Tiefe untersucht.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel dient dazu, einige grundlegende Eigenschaften der Eiskristalle und Spurenstoffe zu erläutern sowie die im Eis ablaufenden Prozesse darzustellen.

2.1 Struktur von Eis

Es sind insgesamt 12 kristalline Formen von Eis bekannt; unter natürlichen Bedingungen ist jedoch nur Eis Ih stabil und somit für diese Arbeit relevant.

Bei dieser Form weist das Kristallgitter eine hexagonale Struktur auf. Die Sauerstoffatome sind mit den Wasserstoffatomen über relativ starke kovalente Bindungen verknüpft. Schwache Wasserstoffbrückenbindungen verbinden die Moleküle untereinander, was zu der vergleichsweise niedrigen Schmelztemperatur führt (SCHULSON & DUVAL (2009: 7)).

In der nahezu tetraedrischen Anordnung wird jedes Sauerstoffatom von vier weiteren Sauerstoffatomen umgeben (siehe Abbildung 1). Die Sauerstoffatome bilden Ringe, die in die sogenannten basalen Ebenen projiziert werden. Die basale Ebene ist die Ebene der dichtesten Packung in der Struktur von Eis Ih (THORSTEINSSON (1996)), wobei die Bindungen zwischen den basalen Ebenen deutlich geringer sind als innerhalb einer Ebene (HOOKE (1998: 27)). Die Normale zur basalen Ebene wird als c-Achse bezeichnet und bildet die Hauptsymmetrieachse des Kristalls. Wichtig für die Struktur sind die Bernal-Fowler-Eisregeln, die besagen, dass sich zwei Wasserstoffatome in kovalenter Bindung zu einem Sauerstoffatom befinden müs-

sen, wobei jedoch nur ein Wasserstoffatom pro Wasserstoffbrückenbindung vorhanden sein darf (PETRENKO & WHITWORTH (1999: 16)). Werden diese Regeln verletzt, führt dies zu Defekten in der Kristallstruktur.

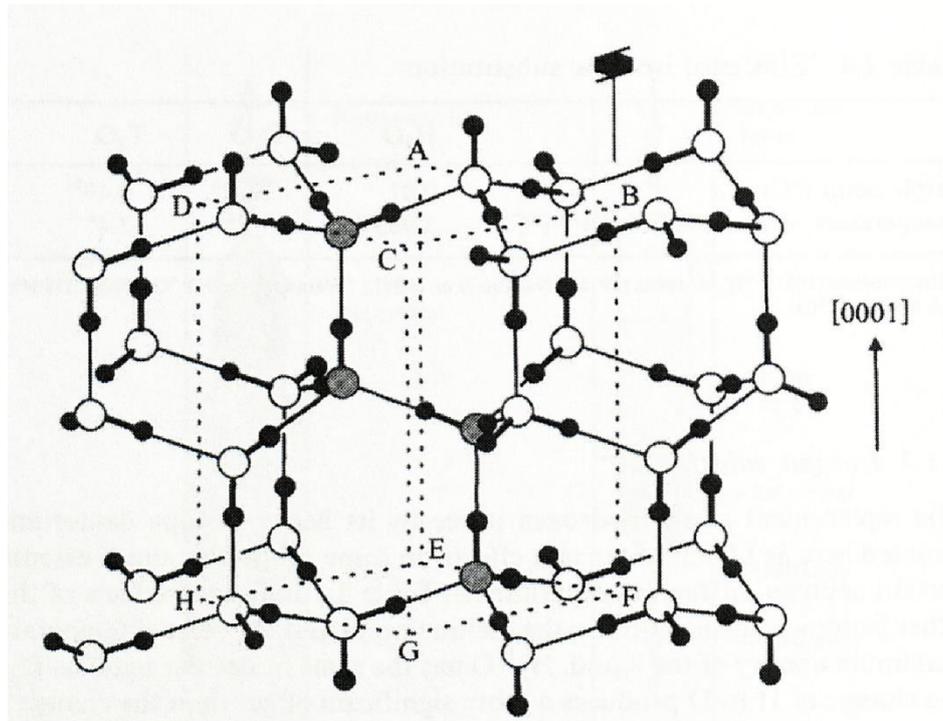


Abb. 1: Die Kristallstruktur von Eis Ih. Die Einheitszelle ist mit ABCDEFGH gekennzeichnet, die dazugehörigen Sauerstoffatome sind grau eingefärbt (SCHULSON & DUVAL (2006: Fig. 2.3)).

2.2 Verdichtung von Schnee zu Eis

Bei der Verdichtung von Schnee zu Eis ist zunächst das thermodynamische Prinzip entscheidend. Dieses beinhaltet, dass jedes System danach strebt, seine Freie Energie zu minimieren. Frisch gefallener Schnee hat eine Dichte von ca. 100 bis 200 kg/m³ (BLACKFORD (2007)). Die Freie Energie kann hier reduziert werden, indem die Oberfläche der Schneeflocken schrittweise verkleinert wird. Dies geschieht vor allem über mechanische Destruktion, d. h., dass die Enden der Eiskristalle abbrechen und die Partikel somit runder bzw. sphärischer werden. Des Weiteren ordnen sich die Partikel so an, dass eine höhere Packungsdichte entsteht. Unter natürlichen Bedingungen kann dabei eine Porosität von minimal 40 % erreicht werden (PATERSON (1994: 17); HOOKE (1998: 13)). Nach der Konsolidierung folgt der Prozess des Sinterns. Hierbei bilden sich durch molekulare Diffusion und Sublimation Verbindungen bzw. „Hälse“ zwischen den Kristallen, was zu größerer Festigkeit und geringerer Energie des Sys-

tems führt. Das Wachstum der Hälse wird durch die Wasserdampfung in den umliegenden Regionen gesteuert (BLACKFORD (2007)).

Bei einer Dichte von ca. 550 kg/m^3 spricht man von Firn (Hooke 1998: 13). In diesem Stadium der Metamorphose existieren keine losen Partikel mehr und es sind bereits deutliche Korngrenzen erkennbar, wobei die Porenräume miteinander verbunden sind, sodass Luftaustausch noch möglich ist (BLACKFORD (2007)). Nimmt die Dichte weiter zu, verringert sich die Sublimationsrate und die Kontaktflächen der Körner werden größer. Nun werden Deformation sowie Rekristallisation (siehe Kapitel 2.3.3) zu den dominierenden Prozessen: molekulare Diffusion ändert Form und Größe der Kristalle, um den Druck des auflagernden Schnees zu reduzieren. Zusätzlich verformen die Kristalle durch Umlagerungen an internen Gleitflächen (PATERSON (1994)).

Schließlich ist die Verdichtung so weit vorangeschritten, dass die Verbindungen der Porenräume geschlossen werden. Darüber hinaus wandelt sich die Form der Porenräume von zylindrisch zu sphärisch. In dieser Phase sind ca. 90 % der Luft bereits über die Oberfläche entwichen, der Rest ist nun in Luftblasen eingeschlossen (PATERSON (1994: 18)). Wenn das Material eine Dichte von 830 kg/m^3 erreicht, spricht man von Eis (HOOKE (1998: 14); BLACKFORD (2007)). Abbildung 2 zeigt die Verdichtung von Schnee zu Eis beispielhaft an vier Stadien.

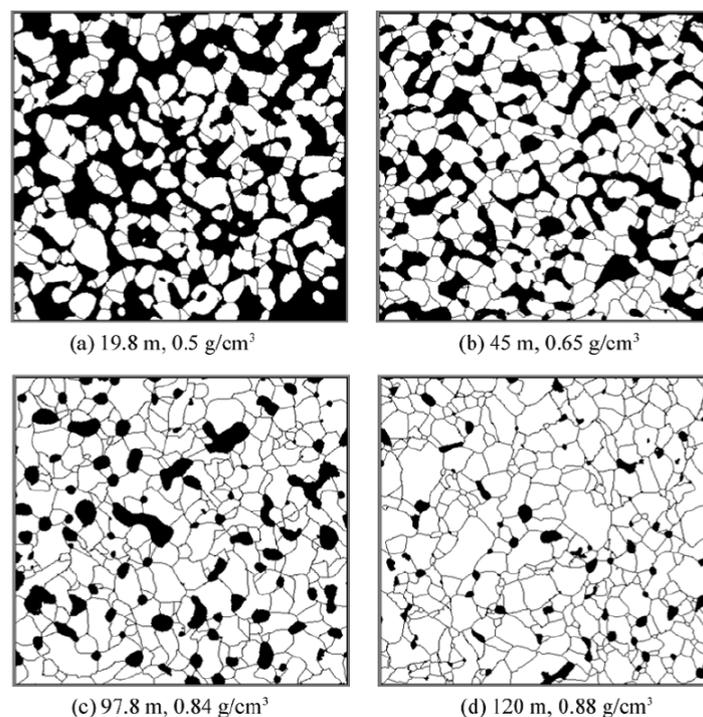


Abb. 2: Die Verdichtung von Schnee zu Eis (BLACKFORD (2007: 12); ursprünglich aus ARNAUD ET AL. (2000: Fig. 4)).

Der Abschluss der Luftblasen wird meist schon bei einer Tiefe zwischen 50 und 120 m erreicht, wo das Eis schon wenige Hundert bis wenige Tausend Jahre alt ist (HÖRHOLD ET AL. (2012)). Bei der weiteren Verdichtung und mit zunehmender Tiefe verkleinern sich die Luftblasen und werden letztlich als Lufthydrate in die Eiskristalle eingebaut. Im grönländischen Eis geschieht dies bei einer Tiefe von 900 bis 1600 m (CUFFEY & PATERSON (2010)). Nach neueren Erkenntnissen wird davon ausgegangen, dass die Verdichtung von Firn durch Spurenstoffe beeinflusst werden kann. Beispielsweise konnten in grönländischen Firnkernen Korrelationen zwischen Dichte und Calcium-Gehalt nachgewiesen werden. Des Weiteren wurden in Experimenten Kristalle mit einer hohen Konzentration ionisch vorliegender Spurenstoffe versetzt („gedopt“). Das hat eine erhöhte Duktilität zur Folge und kann somit zu einer Beschleunigung des Verdichtungsprozesses führen (HÖRHOLD ET AL. (2012)). Unter diesen Gesichtspunkten ist auch ein Einfluss der Spurenstoffe auf die Korngrößen und c-Achsenorientierungen möglich.

2.3 Eigenschaften von Eis

2.3.1 Mechanische Eigenschaften

Monokristallines Eis weist eine deutliche Härteanisotropie auf. Wenn Druck auf ein Eiseinkristall ausgeübt wird, ist die resultierende Deformation in höchstem Grade abhängig von der Richtung des Drucks relativ zur Richtung der c-Achse (THORSTEINSSON (1996)).

Mit großem Winkel zur c-Achse ist bereits eine geringe Scherspannung ausreichend, um Deformation hervorzurufen. Ursache dafür sind die relativ schwachen Bindungen zwischen den basalen Ebenen, die einer Belastung kaum Widerstand entgegenbringen können. Diese Art der Deformation wird als *easy glide* bzw. Gleiten der basalen Ebenen bezeichnet (SCHULSON & DUVAL (2009)). Auf der anderen Seite kann der Kristall in Richtung parallel zur c-Achse nur sehr schwer verformt werden (*hard glide*) (THORSTEINSSON (1996)) (siehe Abbildung 3).

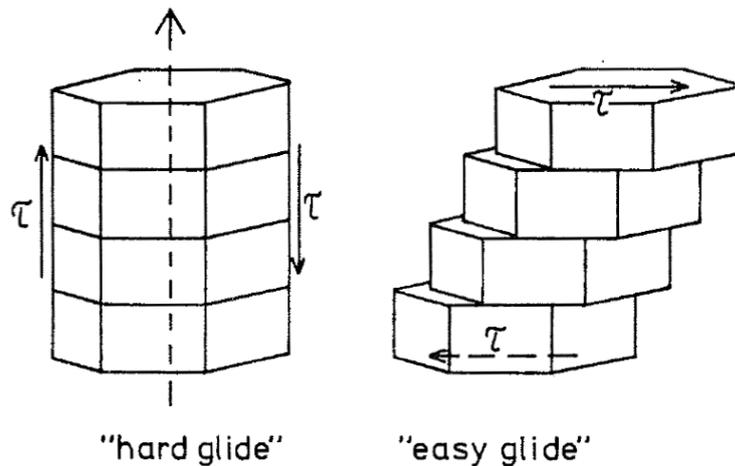


Abb. 3: Schweres und leichtes Gleiten in monokristallinem Eis (THORSTEINSSON(1995: Fig. 2.12)).

Die Deformation von Eis wird durch die Bewegung von Gitterdefekten in der Kristallstruktur beeinflusst. Dies können unter anderem Punktdefekte sein, die beispielsweise durch überschüssige Protonen in der Nähe der Moleküle entstehen (SCHULSON & DUVAL (2009: 9)).

Wesentlich relevanter für das plastische Verhalten von Eis sind jedoch die Liniendefekte, die sogenannten Dislokationen, die den Atomebenen eine leichtere Verschiebung erlauben. Hier unterscheidet man zwischen *edge* und *screw dislocations* (PATERSON (1994)). Diese beiden Arten werden durch den *Burger's Vektor* beschrieben, der anschaulich gesehen über Ausbreitungsrichtung und Betrag der Verschiebung Auskunft gibt (THORSTEINSSON (1996)).

Bei einer *edge dislocation* (Kantenversetzung) wird in einem Teil des Kristalls eine zusätzliche Atomebene eingesetzt. Diese ist senkrecht zur Gleitrichtung orientiert und wandert auf einer horizontalen Ebene (Gleitebene) durch das Kristallgitter (FOSSEN (2011: 210)). Der *Burger's Vektor* ist dementsprechend senkrecht zur *edge dislocation* ausgerichtet.

Die *screw dislocation* (Schraubenversetzung) befindet sich wiederum parallel zu diesem Vektor und kann auch auf andere Atomebenen überspringen. Diese Eigenschaft wird als *cross-slip* bezeichnet (SCHULSON & DUVAL (2009: 16)). Diese Art der Dislokation tritt parallel zur Gleitrichtung auf, wobei die Gleitfläche senkrecht zur Gleitrichtung orientiert ist (FOSSEN (2011: 210)). In natürlichen Kristallen treten jedoch meist *mixed dislocations* auf, also Mischformen, die Komponenten beider Arten enthalten (siehe Abbildung 4).

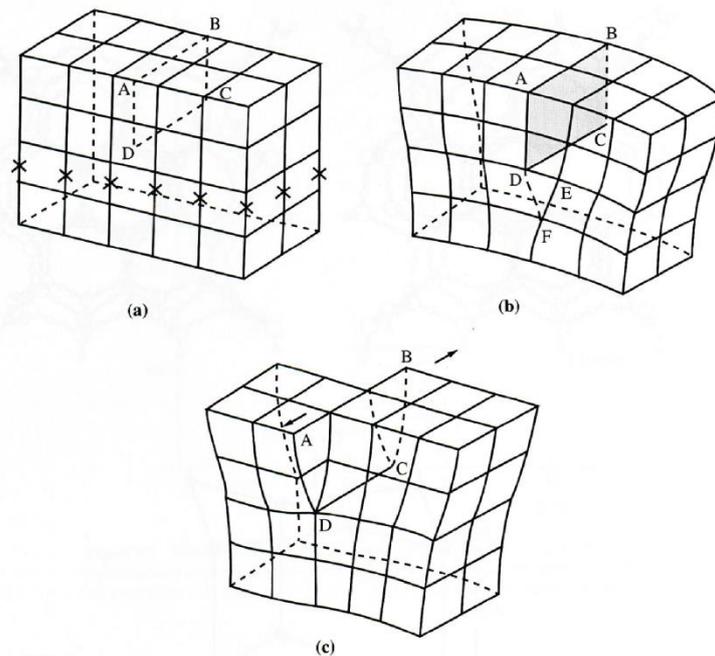


Abb. 4: (a) ein Kristall ohne Dislokationen; (b) eine *edge dislocation*; (c) eine *screw dislocation* (HOOKE (1995: Fig. 4.3)).

Natürliches Eis ist polykristallin und besteht demnach aus mehreren Eiskristallen. Es verhält sich zu Beginn der Deformation zunächst isotrop, da die *c*-Achsen noch keine bevorzugte Orientierung für basales Gleiten aufweisen (JACKA & JUN (2000)). Bei hoher Belastung bzw. unter hohem Druck werden die Fließeigenschaften von Eis hauptsächlich durch intrakristallines Gleiten der Dislokationen bestimmt (DUVAL & MONTAGNAT (2000)).

Insgesamt lassen sich vier Deformationsstadien unterscheiden: Anfangs wird Eis nur elastisch verformt, die Moleküle werden lediglich zusammengeschoben, aber nicht beschädigt. Dann folgt das primäre Kriechen, wo sich zuerst die Körner verformen, deren Orientierung basales Gleiten begünstigt (PATERSON (1994)). Es bilden sich erste Dislokationen, wobei jedoch die Kriechrate kontinuierlich sinkt, da sich die noch unterschiedlich orientierten Körner gegenseitig behindern.

Im Stadium des sekundären Kriechens erreicht die Kriechrate ein Minimum und bleibt zunächst konstant, was vermutlich durch eine zeitweise Balance zwischen den „härteren“ (ungünstige Orientierung) und den „weicheren“ Teilen des Eiskörpers bedingt wird (THORSTEINSSON (1996)).

Im letzten Stadium, dem tertiären bzw. beschleunigtem Kriechen verhält sich Eis anisotrop und die Kriechrate nimmt wieder deutlich zu (JACKA & JUN (2000)). Hier dominiert vor allem die Rekristallisation: es entstehen neue Körner mit einer günstigen *c*-Achsenorientierung, sodass vermehrt basales Gleiten stattfinden kann (THORSTEINSSON (1996)).

Polares Eis wird durch drei Rekristallisationsmechanismen charakterisiert:

Der Prozess des normalen Kornwachstums wird hauptsächlich durch die Krümmung der Korngrenzen zwischen den Körnern verursacht (ALLEY ET AL. (1986)). Durch die Korngrenzenkrümmung entsteht eine Oberflächenspannung und somit ein Druckunterschied, wobei der höhere Druck meist auf der konkaven Seite (der Seite des kleineren Korns) zu finden ist. Um diesen Unterschied auszugleichen, springen Moleküle von der Seite des geringeren Druck auf die Seite des höheren, sodass letztlich die Korngrenze zum Zentrum des kleineren Korns migriert. Der Vorgang beschleunigt sich, weil das Korn immer kleiner und die Krümmung dementsprechend immer größer wird, bis das kleine Korn schließlich durch das große einverleibt wird (ALLEY (1992)).

In einem zweiten Rekristallisationsmechanismus, der sogenannten *rotation recrystallization* (oder *polygonization* nach ALLEY (1992)) wirken auf verschiedene Bereiche eines Korns unterschiedliche Belastungen und es ordnen sich die Dislokationen so an, dass sie diese Bereiche voneinander trennen, um die Spannungen zu reduzieren. Es bilden sich sogenannte Subkorngrenzen, oder *low-angle boundaries* (DUVAL & CASTELNAU (1995)). Diese entwickeln sich schrittweise zu echten Korngrenzen (*high-angle boundaries*), sodass die Bereiche schließlich durch die Bildung neuer Körner ganz getrennt werden. Ab einer Misorientierung von ca. $3-5^\circ$ zum benachbarten Korn spricht man von einer *high-angle boundary* (WEIKUSAT ET AL. (2010), WEIKUSAT ET AL. (2011)).

Oberhalb einer Temperaturgrenze von ca. -10°C tritt dann der Rekristallisationsmechanismus der *migration recrystallization* auf. Die Korngrenzen wandern schneller und es erfolgen Wachstum und Nukleation, d.h. die Entstehung neuer Körner mit günstiger Orientierung für basales Gleiten (THORSTEINSSON ET AL. (1995)).

2.3.2 Optische Eigenschaften

Um Korngrenzen und vor allem c-Achsenorientierungen in polykristallinem Eis messen zu können, wird sich einiger optischer Eigenschaften des Eiskristalls bedient. Eis gehört aufgrund der hexagonalen Struktur zu den optisch anisotropen Mineralen und weist als typisches Merkmal eine schwache Doppelbrechung auf. Tritt eine Lichtwelle in ein anisotropes Mineral ein, wird sie in zwei Transversalwellen aufgespalten, die senkrecht zueinander schwingen und sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausbreiten. Die beiden Wellen werden als ordentlicher und außerordentlicher Strahl bezeichnet (MÜLLER & RAITH (1993: 67)).

Da sie auch unterschiedlich stark gebrochen werden, gibt es somit zwei Brechungsindizes. Ist der Brechungsindex des außerordentlichen Strahls größer als der des ordentlichen, wird dies als positiv doppelbrechend bezeichnet (PETRENKO & WHITWORTH (1999: 219)). In Richtung der c-Achse pflanzt sich nur eine Welle fort, in allen anderen Richtungen gibt es dagegen zwei Wellen mit verschiedener Lichtbrechung. Somit ist Eis optisch einachsig (MÜLLER & RAITH (1993)). Dementsprechend tritt parallel zur c-Achse keine Doppelbrechung auf, wenngleich senkrecht zur c-Achse die größte Doppelbrechung vorhanden ist (PETRENKO & WHITWORTH (1999)).

Die Messung der c-Achsen im Eis wird in Kapitel 4.2 näher erläutert.

2.3.3 C-Achsen

Wenn Eis Belastungen bzw. Spannungen ausgesetzt wird, verändern sich die Verteilungsmuster der c-Achsen. Die Analyse solcher Muster liefert wertvolle Informationen zur Deformationsgeschichte sowie den Fließeigenschaften des Eises.

In den oberen Metern einer Eismasse weisen die Orientierungen noch eine annähernd zufällige Verteilung auf (siehe Abbildung 5). Mit zunehmender Tiefe und zunehmendem Druck findet jedoch eine Einregelung statt und es lassen sich in den Punktwolken eines Schmidt'schen Netzes bestimmte Muster erkennen (ALLEY (1988)).

Bei einfacher Scherung sowie vertikaler Kompression, beispielsweise in einem Eisdome, in dem das Eis in alle Richtungen abfließt, rotieren die c-Achsen zur Kompressionsachse und es bildet sich ein *single maximum* (THORSTEINSSON (1996)).

Treten Extensionskräfte auf, kommt es zu einer Gürtelverteilung, wobei die c-Achsen von der Extensionsrichtung weg rotieren und sich gleichmäßig in einer Ebene senkrecht dazu verteilen (THORSTEINSSON (1996)). Dies ist vor allem in einer Eisscheide der Fall, in der das Eis im Wesentlichen in zwei Richtungen abfließt. Je nach vorherrschenden Kräften können diese Verteilungsmuster ineinander übergehen.

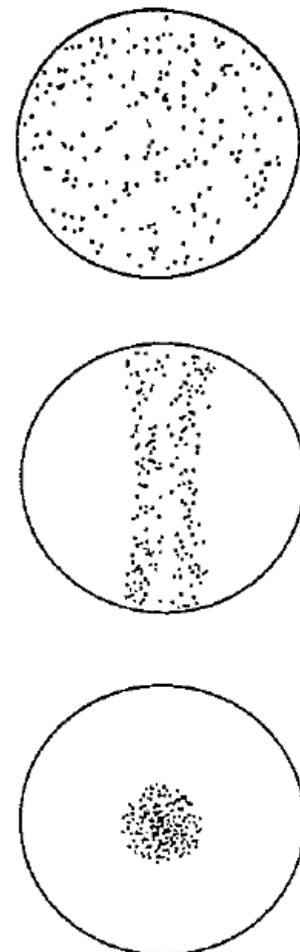


Abb. 5: Die c-Achsenverteilung in einer Eisscheide. (a) zufällige Verteilung; (b) Gürtelverteilung; (c) *Single Maximum* (verändert nach ALLEY (1992: Fig. 2.22)).

Um diese Verteilungsmuster bzw. Orientierungen der c -Achsen im Raum beschreiben zu können, nutzt man einen Orientierungstensor 2. Stufe. Anschaulich, betrachtet man zunächst die Durchstoßpunkte jeder c -Achse auf der Lagenkugel, wobei die Punkte jeweils mit einer Masse $m = 1$ angenommen werden. Wenn die Kugel nun durch eine beliebige Achse durch den Mittelpunkt rotieren soll, wird eine bestimmte kinetische Energie benötigt, um die Rotation in Gang zu setzen: das Trägheitsmoment, welches als $M = m * a^2$ definiert ist, wobei m die Masse des Partikels ist und a der senkrechte Abstand zur Drehachse (WALLBRECHER (1986: 157)). Nun gilt es, aus allen möglichen Drehachsen diejenigen herauszufinden, denen das maximale und minimale Trägheitsmoment zugeordnet sind, wobei man zwei Richtungen erhält, die die Raumlage der c -Achsenverteilung gut beschreiben (WALLBRECHER (1986:159)). Diese Richtungen sind die Eigenvektoren λ_1 und λ_2 , der dritte Eigenvektor λ_3 ergibt sich aus der Senkrechten zu diesen beiden. Jedem Eigenvektor wird als Betrag der entsprechende Eigenwert zugeordnet, wobei gilt:

$$E_1 < E_2 < E_3$$

Für den normierten Orientierungstensor gilt:

$$E_1 + E_2 + E_3 = 1$$

(THORSTEINSSON (1996); EISEN (2007)).

Die Richtungen der Eigenvektoren können ein rechtwinkliges, dreiachsiges Koordinatensystem vorgeben. Dabei wird der Achse mit dem maximalen Trägheitsmoment der kleinste Eigenwert E_1 zugeordnet und der Achse mit dem minimalen Trägheitsmoment der größte Eigenwert E_3 (WALLBRECHER (1986)).

Die Achsen des Koordinatensystems können ein Ellipsoid aufspannen: da die Verteilung der c -Achsen sich auf die Verhältnisse der Eigenwerte auswirkt, verformt sich der Ellipsoid entsprechend. (SURMA (2011)).

2.4 Spurenstoffe und Unreinheiten im Eis (Aerosole)

2.4.1 Quellen, Transport und Deposition

Aerosole sind kleinste Partikel, die sich in der Atmosphäre in Suspension befinden. Ein Großteil der Aerosole, die in Eiskernen analysiert werden, ist mineralischen Ursprungs. Sie liefern wichtige Informationen zu den klimatischen Bedingungen in ihren Quellgebieten sowie zu den früheren Zirkulationsmustern in der Atmosphäre (RUTH (2002)).

Damit Partikel in die Atmosphäre gelangen können, müssen sie zunächst in ihren Ursprungsgebieten erodiert werden: in hauptsächlich ariden und semiariden Gebieten entsteht durch Verwitterungsprozesse loses, feinkörniges Material. Vor allem die physikalische Verwitterung (z. B. Frostverwitterung) führt zum Zerbrechen kristallinen Materials durch mechanische Belastung aufgrund von Temperaturschwankungen (RUTH (2002)).

Für die Erosion sind Windgeschwindigkeit und Größe der Partikel von entscheidender Bedeutung. Partikel mit einem Durchmesser $>0,5$ mm können durch den Wind lediglich über den Boden gerollt werden (Oberflächenkriechen bzw. Reptation). Partikel im Bereich von 0,05 bis 0,5 mm können durch den Wind zumindest kurz angehoben werden. Sie springen und können beim Aufkommen auf den Boden andere Partikeln anstoßen und so ihre kinetische Energie übertragen, sodass diese in Bewegung versetzt werden. Dies wird als Saltation bezeichnet, wobei sich ca. 50 bis 80 % der Partikel auf diese Art bewegen. Ungefähr 1 % der Partikel haben jedoch einen so geringen Durchmesser ($<0,05$ mm), dass sie für längere Zeit in der Atmosphäre in Suspension verbleiben (siehe Abbildung 6) (RUTH (2002)).

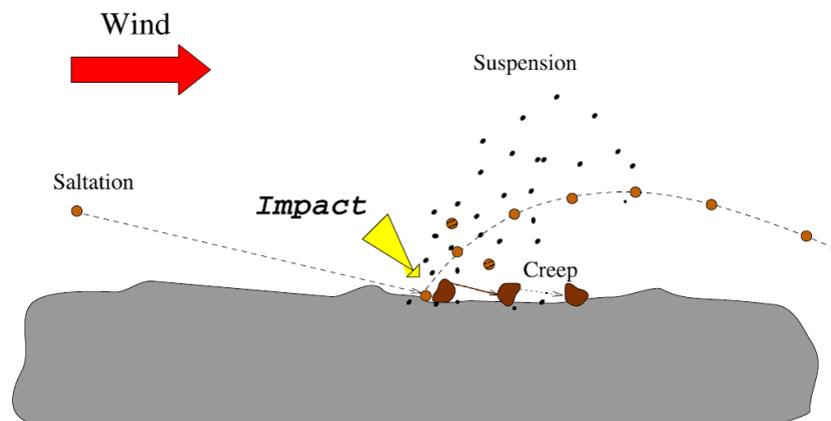


Abb. 6: Schematische Darstellung der Transportmechanismen von (Staub-)Partikeln (RUTH (2002: Fig 2.1), ursprünglich aus HUA (1999: Fig. 1.1)).

Partikel, die sich in Suspension befinden, weisen verschiedene Verweilzeiten in der Atmosphäre auf. In der unteren Troposphäre (bis ca. 3 km Höhe) kann Material einige Tage bis wenige Wochen überdauern, in der oberen Troposphäre (ca. 3 bis 10 km) sogar bis zu einem Monat. In der darüber liegenden Stratosphäre (ab ca. 10 km Höhe) sind sogar Verweilzeiten von bis zu einem Jahr möglich (BARRIE (1985)).

Allgemein kann ein Transport über große Distanzen nur über der planetarischen Grenzschicht stattfinden. Das Material wird durch hohe Windgeschwindigkeiten über Konvektionszellen in diese Schicht befördert. In der nördlichen Hemisphäre findet zonaler Transport vor allem in der Westwindregion statt, meridionaler Transport in die polare Zelle entsteht wiederum durch die Tiefdruckgebiete, die sich entlang der polaren Front entwickeln (RUTH (2002)).

Während des letzten Glazials lag die polare Front deutlich südlicher als heute und der Temperaturgradient zwischen der Arktis und den Tropen war wesentlich höher (RUTH ET AL. (2003)). Durch die Baroklinität wurde der Transport gestärkt und es konnten Zykclone entstehen, die sehr weit äquatorwärts vordrangen (RUTH (2002); FISCHER ET AL. (2007)). Aufgrund der Verschiebung der Polarfront kann im Winter sowie zu Kaltzeiten mit kürzeren Transportzeiten gerechnet werden.

Bei der Deposition wird im Wesentlichen zwischen trockener und nasser Deposition unterschieden. Die nasse Deposition tritt immer in Verbindung mit Niederschlagsereignissen auf, wobei die Aerosole, die als Kondensationskerne (CCN – *cloud condensation nuclei*) dienen, mit dem Niederschlag absinken (*rain-out*). Wenn sich viele Partikel unterhalb der Wolken in Suspension befinden, ist es jedoch auch möglich, dass diese durch den fallenden Niederschlag ausgewaschen werden (*wash-out*) (RUTH (2002)).

Bei der trockenen Deposition, die vor allem in Kaltzeiten wichtiger ist, treten keine Niederschlagsereignisse auf. Hier ist vor allem die Sedimentation großer Aerosole (>10 µm) von Bedeutung. Des Weiteren lagern sich Partikel durch Impaktion oder simples Anhaften an der Schneeoberfläche ab; auch der diffusive Transport durch die laminare Grenzschicht spielt hier eine Rolle (BARRIE (1985)).

Trockene Deposition tritt besonders bei niedrigen Akkumulationsraten sowie im Frühling auf, wenn sich viele Partikel in der Atmosphäre befinden (HUTTERLI ET AL. (2006)).

2.4.2 Spurenstoffeintrag in Grönland

In diesem Kapitel soll zunächst ein Überblick über die wichtigsten Spurenstoffe im grönländischen Eis gegeben werden. Hauptsächlich werden die Komponenten näher erläutert, die für die späteren Korrelationsberechnungen in Frage kommen. Des Weiteren werden die saisonalen Schwankungen im Eintrag der Spurenstoffe dargestellt.

Die festen bzw. ungelösten, mineralischen Komponenten des Staubs können direkt als Partikel gemessen werden. Staub aus kontinentalen Quellen weist vor allem Bestandteile an Aluminium (Al^{3+}) und Silizium (Si^{4+}) auf. Betrachtet man die löslichen Komponenten des Staubs, stellt Calciumcarbonat (CaCO_3) den größten Anteil dar, wobei Kalzium (Ca^{2+}) oft als Proxy für Staub im Eis genutzt wird (RUTH ET AL. (2003)). Je nach Gebiet kann die Zusammensetzung variieren.

Als Hauptquelle des Staubes in Grönland konnten die Wüsten in Asien, speziell die Taklamakan-Wüste in Westchina identifiziert werden (BORY et al. 2003). Einerseits wird der Transport von Staub durch den Monsunzyklus in den Quellgebieten beeinflusst, andererseits durch die Verlagerung der Polarfront. Die Front ist im Winter sowie in Kaltzeiten nach Süden verschoben, was, wie bereits erläutert, den Transport erleichtert (RUTH (2002)).

Der Eintrag von Staub und somit auch Kalzium erreicht im Frühjahr sein Maximum (siehe Abbildung 7), weil der Schnee in den Quellgebieten bereits zum Großteil geschmolzen, aber noch nicht genug Vegetation da ist, um die Erosion von Material zu verhindern (FISCHER & WAGENBACH (1996)). Die Staubkonzentrationen sind in Kaltzeiten 10- bis 100- mal höher als beispielsweise im Holozän (STEFFENSEN (1997)).

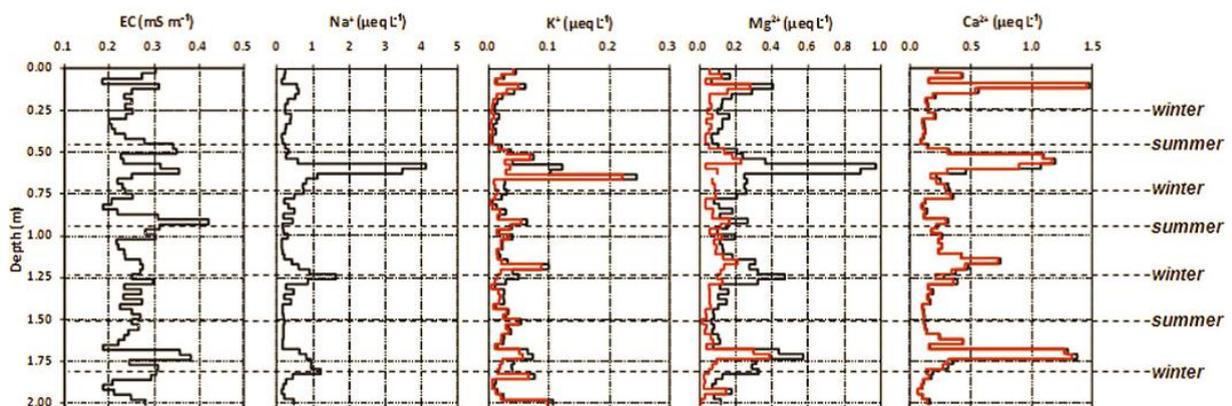


Abb. 7: Saisonalität der Leitfähigkeit sowie Spurenstoffkonzentrationen in Schneeprofilen des NEEM-Eiskerns (KURAMOTOT ET AL. (2011: 4))

Des Weiteren werden Komponenten des Meersalzes auf den grönländischen Eisschild transportiert. Bei hohen Windgeschwindigkeiten zerplatzen in der Gischt der Wellenkämme kleinste Bläschen, sodass in erster Linie Na^+ und Cl^- Ionen transportiert werden können. Aufstieg und Transport werden bedingt durch die Aktivität von Zyklonen (FISCHER ET AL. (2007); OHNO ET AL. (2005)). Da im Winter über dem Ozean stärkere Stürme auftreten, weist vor allem der Eintrag von Meersalz im Winter und im zeitigen Frühjahr ein Maximum auf (siehe Abbildung 7) (KURAMOTO ET AL. (2011)).

Auch Stickstoffverbindungen können bei der Spurenstoffanalyse eine Rolle spielen: besonders im rezenten Firn tritt Nitrat (NO_3^-) als dominante Verbindung auf, was auf anthropogen verursachte Emissionen zurückzuführen ist (FISCHER ET AL. (1998)).

In geringeren Konzentrationen ist auch Ammonium (NH_4^+) zu finden. Es entsteht hauptsächlich als Produkt bakterieller Verwesung, ALLEY & WOODS (1996) sehen es jedoch auch als einen möglichen Indikator für Waldbrände. Die saisonalen Signale der Stickstoffverbindungen sind wesentlich schwächer, dennoch lässt sich auch bei Nitrat und Ammonium ein Maximum feststellen. Dies liegt im Frühling bzw. im Sommer, da hier die bakterielle Aktivität am größten ist. In rezenten Firnlagen können auch Maxima im Übergang vom Winter zum Frühling auftreten, die jedoch anthropogen bedingt sind (KURAMOTO ET AL. (2011)).

Eine weitere große Gruppe bilden die Schwefelverbindungen. Hier wird bei Analysen in erster Linie die Sulfat-Konzentration (SO_4^{2-}) gemessen. Sulfat kann einerseits ebenfalls anthropogenen Ursprungs sein, andererseits aber auch durch Vulkaneruptionen in die Atmosphäre geschleudert worden sein. Es lässt sich dann für ein bis zwei Jahre eine erhöhte Konzentration im Eis feststellen (FISCHER (2001)).

Auch die Schwankungen im Jahresgang der Schwefelverbindungen können anthropogene Ursachen haben. Da SO_2 durch fehlende Insolation in der Polarnacht nicht abgebaut wird, kann hier ebenfalls ein Maximum im späten Winter bis zeitigen Frühling festgestellt werden (FISCHER (2001); WEIBBACH (2011)).

In dieser Arbeit werden die im CFA gemessenen Daten zum Gehalt von Ca^{2+} , Na^+ , NO_3^- und NH_4^+ Ionen, sowie Leitfähigkeit und der Gehalt an Staubpartikel pro Milliliter Schmelzwasser verwendet.

2.4.3 Lokation im Eis

Die Spurenstoffe bzw. „Unreinheiten“ können sich an verschiedenen Orten im Eiskörper befinden. Einige lösliche Stoffe können beispielsweise als sogenannte Stellvertreter einzelne Wassermoleküle in der Kristallstruktur ersetzen. Dies ist unter anderem den Ionen H^+ oder Cl^- möglich (PATERSON (1994: 88)).

Durch die relativ offene Struktur des Eiskristalls können sich besonders kleine Moleküle aber auch in den Lücken des Gitters befinden, wie z. B. HCl oder teilweise auch H_2SO_4 (PATERSON (1994: 88)).

Unlösliche Partikel, wie der Mineralstaub halten sich bevorzugt im Bereich der Korngrenzen und Tripelpunkte, also die Punkte, an denen die Grenzen dreier Körner aufeinandertreffen, auf (HÖRHOLD et al. 2012). Im temperierten Eis konnten in den Korngrenzen flüssige Phasen festgestellt werden und es wird vermutet, dass die Unreinheiten durch diese Adern diffundieren können (BLACKFORD (2007)). Besonders effektiv ist dieser Vorgang im feinkörnigen Eis, da hier mehr potentielle Pfade vorhanden sind (FARIA ET AL. (2010)).

Die bevorzugte Lokation in den Korngrenzen rührt daher, dass die Atome oder Moleküle der Spurenstoffe, eingebaut ins reguläre Kristallgitter, Spannungen verursachen. Im Vergleich zum Gitter ist die Korngrenze jedoch ein sehr ungeordneter Bereich, sodass die Spannungen hier reduziert werden können (ALLEY ET AL. (1986)).

2.4.4 Mögliche Effekte auf die physikalischen Eigenschaften

Die Unreinheiten, die sich in den Korngrenzen sammeln, können mit diesen interagieren, indem sie beispielsweise deren Migration verlangsamen.

Ist der Antrieb für das Wachstum der Körner und somit für die Wanderung der Korngrenze nicht groß genug, um eine Separation von dem extrinsischen Material, in dem Fall den Unreinheiten, herbeizuführen, wird die Geschwindigkeit der Korngrenze durch die charakteristische Geschwindigkeit des extrinsischen Materials bestimmt. Es kommt zum sogenannten *pinning*-Effekt, bei dem die Korngrenzen die Unreinheiten mitziehen und sich somit langsamer bewegen. Sie befinden sich im *low-velocity regime* (ALLEY ET AL. (1986)).

Diese Zugeffekte treten vor allem bei hohen Spurenstoffkonzentrationen auf (ALLEY & WOODS (1996)).

Ab einer bestimmten Tiefe (und Temperatur) ist der Antrieb für die Migration jedoch so groß, dass die Zügeffekte überwunden werden können. Dies wird als *unpinning*-Effekt bezeichnet, die Korngrenze wandert schneller, sobald sie sich vom extrinsischen Material gelöst hat (*high-velocity regime*) (ALLEY ET AL. (1986)) (THORSTEINSSON (1996)).

Des Weiteren ist es möglich, dass Spurenstoffe als Hindernisse (*obstacles*) für Dislokationen dienen; die Dislokation wird in dem Fall zwischen zwei Punkten bzw. Unreinheiten fixiert (HOOKE (1998)).

3 Untersuchungsgebiet und Probenmaterial

Die Bohrlokation für das NEEM-Projekt befindet sich in Nordwestgrönland (77,45 °N, 50,06 °W) (siehe Abbildung 8). Der Eisschild weist hier eine Dicke von ungefähr 2542 m auf, wobei das Eem in einer Tiefe von 2265 m bis 2345 m mit einer Jahresschichtung von ca.



7 mm Mächtigkeit erwartet wird (http://neem.dk/about_neem/).

Die günstigste Position wurde mittels Radarmessungen ermittelt und musste bestimmte Kriterien erfüllen: zum einen sollte das Eis an dieser Stelle besonders dick sein, um einen möglichst großen Altersbereich abzudecken. Des Weiteren sollte das Gesteinsbett flach sein, da große Unebenheiten zu unregelmäßigem Eisfließen führen, was wiederum die stratigraphischen Schichten zerstören kann. Eine mäßige, nicht zu hohe jährliche Niederschlagsrate war ebenfalls gefordert, denn zu viel Schneefall führt zu schnellerem Eisfließen und einer stärkeren Ausdünnung der jährlichen (älteren) Lagen. Eine zu geringe Niederschlagsrate erschwert aber wiederum das Auffinden und Analysieren ebendieser Lagen. Das letzte zu erfüllende Kriterium war die Bohrung im Bereich der Eisscheide durchzuführen. Eine Eis-

Abb. 8: Lokation der NEEM-Bohrung, sowie Bohrungen anderer Kampagnen in Grönland (http://neem.dk/about_neem/).

scheide ist die Linie, die in Grönland den ostwärts-fließenden Teil des Eisschildes vom westwärts-fließenden trennt. Die ältesten Eislagen sind an dieser Linie zu finden, unter anderem, da das Eisfließen dort auf ein Minimum reduziert ist (http://neem.dk/about_neem/).

4 Methoden

4.1 Methoden für die Messung physikalischer Parameter

Die Proben, die die Datengrundlage für diese Arbeit bilden, wurden direkt nach der Bohrung im Feld gemessen, um eventuelle Relaxationseffekte zu reduzieren. Der Kern wurde hierfür zunächst in je 55 cm lange Stücke geschnitten, welche dann längs der Kernachse für verschiedene Analysen aufgeteilt wurden. Die Stücke werden als *Bags* bezeichnet.

Für die Ermittlung der Korngrößen und Eigenwerte müssen zunächst (vertikal) Dünnschnitte angefertigt werden. Dazu wird das Kernstück in sechs Sektionen geteilt, die jeweils 55/6 cm lang und ca. 7 cm breit sind, wobei durch das Sägen je 2-3 mm Schnittverlust auftreten können. Diese werden mit Wasser auf einen Probenträger geklebt und anschließend mit Hilfe einer Bandsäge und eines Mikrotoms auf ca. 300 μm bis 250 μm Dicke heruntergeschnitten und poliert (siehe Abbildung 9). Für eine weitere Feinpolitur setzt man die Stücke schließlich einige Zeit der Sublimation aus (KIPFSTUHL ET AL. (2006)).



Abb. 9: Mit dem Mikrotom ist es möglich, Eisschnitte von ca. 250 bis 300 μm Dicke anzufertigen.

Mit Hilfe des Fabric Analyzers können c-Achsenorientierungen optisch einachsiger Minerale, wie beispielsweise Eis, Quarz oder Calcit bestimmt werden, wobei das Gerät jedoch auf hexagonale und trigonale Minerale beschränkt ist und nicht die vollständige kristallographische Orientierung erfassen kann.

Die wichtigsten Bestandteile des Fabric Analyzers sind eine Lichtquelle, ein Objektisch, zwei Polarisatoren, ein $\lambda/4$ -Plättchen (bei dem es sich um einen weiteren speziellen Polarisator handelt), eine Objektivlinse und eine CCD-Kamera. Die Lichtquelle besteht aus einer LED senkrecht zur Probe und acht LEDs, die in einem Winkel von 12° zur Senkrechten und 45° zueinander stehen und einen konischen Lichtstrahl auf die Probe fokussieren. Die gekreuzten Polarisatoren können synchron zwischen 0 und 90° in $11,25^\circ$ -Schritten rotiert werden, während der Objektisch, auf dem der Dünnschnitt befestigt ist, stationär ist. Für jede LED nimmt die Kamera einen Stapel Bilder auf: Bilder für die gekreuzten Polarisatoren, für das zugeschaltete $\lambda/4$ -Plättchen sowie Bilder für polarisiertes Licht bei 0 und 90° (WILSON ET AL. (2007); PETERNELL ET AL. (2009), TAMMEN (2012)).

Es wird für jeden Stapel Bilder die Ebene bestimmt, in der sich die c-Achse befindet sowie der Auslöschungswinkel für jede c-Achse. Durch Fourier Transformation werden die Lichtamplitudenwerte bei jedem Schritt der Polarisatoren an eine Sinuskurve angepasst (PETERNELL ET AL. (2009)). Indem man alle neun Ebenen übereinanderlegt, erhält man eine Schnittlinie, die die Orientierung der c-Achse wiedergibt. Über die Winkel Azimut und Colatitude wird für jedes Pixel die Orientierung der c-Achse angegeben. Der Azimut kann einen Wert zwischen 0 und 360° annehmen und gibt den Winkel (bzw. die Abweichung) zur Eiskernlängsachse an, die Colatitude nimmt Werte zwischen 0 und 90° an und ist über den Winkel (bzw. die Abweichung) zur Normalen der Eiskernlängsachse definiert (PETERNELL ET AL. (2009); TAMMEN (2012)).

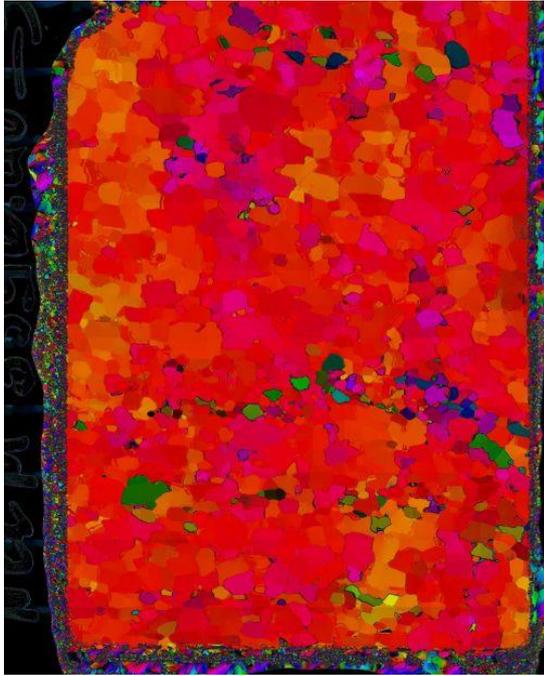


Abb. 10: Beispielhaft werden hier ein Dünnschnitt aus dem Bag 3356, sowie die Legende (Trend) gezeigt. Bei den rot eingefärbten Körnern liegt die c-Achse parallel zur Eiskernlängsachse (WEIKUSAT & KIPFSTUHL (2010)). An den Rändern des Dünnschnittes sieht man das Wasser, mit dem die Probe auf den Probenträger geklebt wurde.

4.2 Methoden für die Messung chemischer Parameter

Die Messung der chemischen Parameter wird über die *continuous flow analysis* (kontinuierliche Schmelzwasser- bzw. Durchflussanalyse), kurz CFA realisiert.

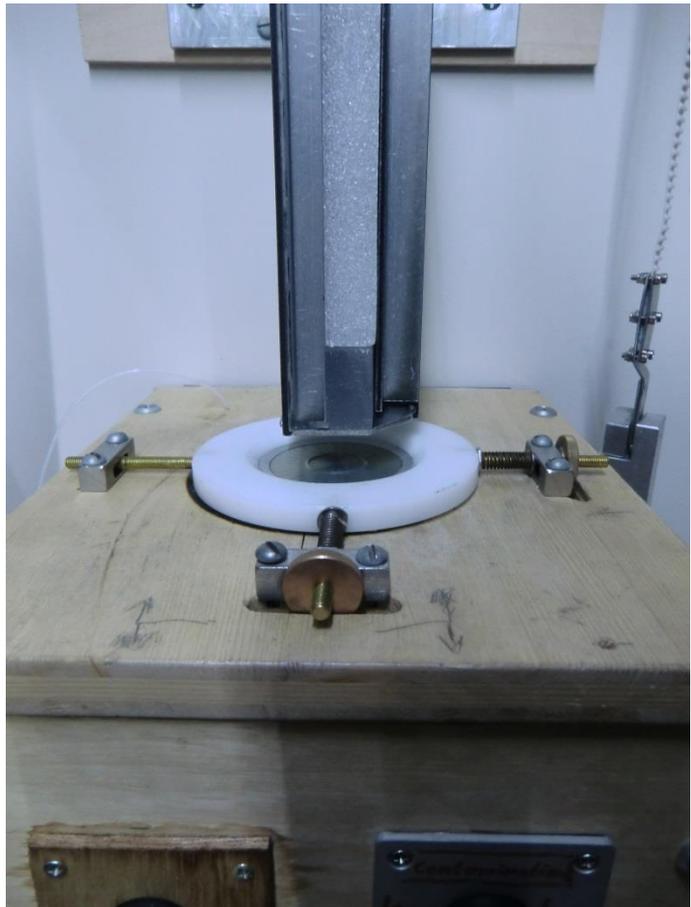
Die Proben für diese Arbeit wurden direkt im Feld während des NEEM-Projektes gemessen. Ich konnte jedoch an CFA-Messungen von Firn-Kernen, die im Zuge der NordGrönland Traverse (NGT) erbohrt wurden, im Eislabor des AWI in Bremerhaven teilnehmen.

Die CFA-Anlage besteht aus zwei Teilen: der Schmelzbereich, in den auch die Kerne vorbereitet werden, befindet sich bei -10 °C bis -15 °C . Die hier verwendeten Stücke sind bereits gesägt und haben ungefähr die Maße $3,5\text{ cm} \times 3,5\text{ cm} \times 100\text{ cm}$.

Die Arbeitsflächen, sowie der Schmelzkopf müssen zu Beginn gereinigt werden (z. B. mit Isopropanol). Bei der Messung von Staubpartikeln und Spurenstoffen ist die Dekontamination unbedingt nötig, da selbst kleinste Verunreinigungen die Messergebnisse verfälschen könnten. Zunächst wird die exakte Länge des Kerns ermittelt sowie Brüche dokumentiert. Gegebenenfalls werden aus Gründen der Dekontamination an den Enden des Kerns einige mm entfernt (RUTH ET AL. (2003)).

Das Kernstück wird nun in eine den Maßen entsprechend eingestellte Schiene gespannt. Beim Schmelzen drückt ein Gewicht den Kern auf den Schmelzkopf, um auch gegen Ende der Messung eine gleichmäßige Schmelzgeschwindigkeit zu garantieren (KAUFMANN ET AL. (2008)).

Die Temperatur des Schmelzkopfes wird in der Regel so gewählt, dass sich eine Schmelzgeschwindigkeit von ungefähr 3,5 cm/min einstellt. Um die Verunreinigungen so gering wie möglich zu halten, wird nur das Schmelzwasser verwendet, welches sich im inneren Ring sammelt (siehe Abbildung 11) (RUTH ET AL. (2003)).



Nach dem Start der Messung wird das Schmelzwasser zum zweiten Teil der Anlage geleitet. Dieser befindet sich

Abb. 11: Beispielhaft wird hier ein Firnkern vor dem Schmelzprozess in der Anlage des Alfred-Wegener-Instituts (Bremerhaven) gezeigt.

im Warmlabor, wo bei Zimmertemperatur gearbeitet wird. Um Messfehler und Lücken in den Datensätzen zu vermeiden, muss die Luft aus dem Schmelzwasser entfernt werden; dies geschieht über den sogenannten Debubbler (RUTH ET AL. (2003)). Dann kann der Schmelzwasserstrom mittels verschiedener Ventile geteilt und zu den einzelnen Messgeräten gepumpt werden. Unter anderem kommen hier Leitfähigkeitsmesser, Flowmeter (ein Gerät zur Messung der Durchflussrate) und ein Staubmessgerät, welches die Anzahl der unlöslichen Partikel erfasst, zum Einsatz. Feste Partikel können über eine direkte Messung erfasst werden, während Kalzium indirekt gemessen wird: hierbei wird eine Kalziumzelle verwendet, bei der ein Spektrometer nach vorherigem Einleiten einer Fluoreszenz-Flüssigkeit den Gehalt an Ca^{2+} Ionen über die Intensität der Fluoreszenz bestimmt. Um Referenzproben zu erhalten, müssen hier regelmäßige Standardmessungen durchgeführt werden. (RUTH ET AL. (2008)).

Zu der Anlage gehört z. T. auch ein Isotopenmessgerät; der Gehalt an $\delta^{18}\text{O}$ wird unter anderem zur Altersbestimmung der Kerne genutzt.

Nach den Messungen muss eine Tiefenzuordnung stattfinden: über das Gewicht, welches den Kern auf den Schmelzkopf drückt und gleichzeitig als Wegzähler dient, kann die Länge des in einer bestimmten Zeit eingeschmolzenen Kernstückes ermittelt werden. Zugleich muss festgestellt werden, welche Menge an Schmelzwasser bei den einzelnen Messgeräten ankommt. Aus diesen Angaben kann dann eine Tiefenachse berechnet werden.

4.3 Visuelle Stratigraphie mittels Linescan-Images

Die Analyse mittels eines Linescanners ist eine der ersten, die an einem Kernstück vorgenommen wird und vermittelt zunächst grundlegende Informationen.

Ein ca. 1,65 m langes, 9 cm breites und 3 cm dickes Eisstück, welches zuvor auf beiden Seiten mikrotomiert wurde, wird auf eine Schiene gelegt, an der eine Lichtquelle sowie eine Kamera befestigt sind. Diese befinden sich über und unter dem Eisstück und bewegen sich während der Messung auf mobilen Elementen synchron entlang des Kerns. Die Kamera nimmt das Licht auf, welches im Kern gestreut wird. Auf den Bildern erscheint das transparente Eis schwarz, während z. B. Spurenstoffe, Luftblasen oder auch Korngrenzen das Licht streuen und somit weiß erscheinen. Mit dieser Methode können vor allem die *cloudy bands*, also Lagen, in denen die Unreinheiten im Eis eine besonders hohe Konzentration erreichen, gut sichtbar gemacht werden (SVENSSON (2005)).

4.4 Korrelationsmethoden

4.4.1 Korrelation nach Pearson

Um einen möglichen Zusammenhang zwischen den physikalischen Eigenschaften und den Chemiedaten aufzeigen zu können, wurden jeweils die mittlere Korngröße und der Eigenwert E3 mit den chemischen Parametern korreliert. Eine Korrelation zwischen den Variablen kann als notwendige Voraussetzung für einen kausalen Zusammenhang gesehen werden, ist jedoch keine hinreichende Bedingung. Liegt eine Korrelation vor, sind verschiedene Interpretationen möglich: so kann die Variable x die Variable y kausal beeinflussen und umgekehrt. Des Weiteren können x und y sich aber auch wechselseitig beeinflussen oder durch eine dritte Variab-

le bestimmt werden. Ohne zusätzliche Informationen kann aus dem Korrelationskoeffizienten allein nicht auf einen bestimmten Zusammenhang geschlossen werden (SCHÖNWIESE (2006)). Orientiert an TAMMEN (2012) wurde hier zunächst die Korrelationsmethode nach Pearson (*Pearson's Product-Moment Correlation*) angewendet.

Berechnet wird der Koeffizient nach der Formel

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

wobei $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ bzw. $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ die Mittelwerte der Daten x_i und y_i sind (BURT & BARBER (1996: 386)).

Es wird ein linearer Zusammenhang angenommen; der Korrelationskoeffizient r kann sich zwischen -1 und 1 bewegen. Eine positive Korrelation mit einem Wert von 1 besteht, wenn die Werte der einen Variablen zeitgleich mit denen der anderen Variable steigen bzw. fallen. Bei der negativen Korrelation (Korrelationskoeffizient -1) steigen die Werte der einen Variable, während die der anderen fallen. Beträgt der Koeffizient 0, geht man davon aus, dass keine Korrelation besteht (BURT & BARBER (1996)). In der vorliegenden Arbeit ist die Zeitachse durch die Tiefenachse gegeben.

Um ein verlässliches Ergebnis zu bekommen, muss der Korrelationskoeffizient auf seine statistische Signifikanz getestet werden. Ein Test ist so angelegt, dass zunächst Hypothesen aufgestellt werden müssen: die Nullhypothese H_0 besagt, dass die zu prüfende Besonderheit (in diesem Fall die Korrelation zwischen den Parametern) zufällig entstanden („bedeutungslos“) ist, während die Alternativhypothese H_1 vom Gegenteil ausgeht. In dieser Arbeit wird die Annahme, dass eine Korrelation zwischen den Parametern x und y vorliegt, als Alternativhypothese formuliert (Korrelationskoeffizient $\neq 0$) (SCHÖNWIESE (2006)).

Des Weiteren bedarf es der Festlegung eines Signifikanzniveaus S_i , welches die Wahrscheinlichkeit angibt, mit welcher der richtige Testentscheid der jeweiligen Hypothesenprüfung getroffen wird. Für die Berechnungen wurde hier ein Signifikanzniveau von 95 % gewählt (SCHÖNWIESE (2006)).

Um nun eine Testentscheidung fällen zu können, wird der p-Wert nach der Formel

$$p = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

berechnet, wobei r der jeweilige Korrelationskoeffizient ist und n die Grundgesamtheit darstellt (BURT & BARBER (1996: 391)). Der p-Wert ist ein Maß für die Glaubwürdigkeit der Nullhypothese: ist er bei einem Signifikanzniveau von 95 % kleiner als 0,05, wird die Nullhypothese abgelehnt und es wird in diesem Fall davon ausgegangen, dass die Korrelation signifikant ist bzw. nicht zufällig auftritt (SCHÖNWIESE (2006)).

4.4.2 Korrelation nach Spearman

Um mit der Korrelationsmethode nach Pearson ein zuverlässiges Ergebnis zu bekommen, müssen die Daten normalverteilt sein. Zur Überprüfung wurde für die Daten der mittleren Korngröße und des Eigenwertes E3 der Shapiro-Wilk-Test gerechnet, bei dem die Stichproben mit hoher Güte auf Normalverteilung getestet werden können. Bei diesem Test ist zu beachten, dass die Aussage, die Daten seien normalverteilt, in der Nullhypothese formuliert ist, das heißt, der p-Wert sollte idealerweise größer als 0,05 sein (http://www.uni-wuerzburg.de/fileadmin/10040800/user_upload/hain/R/Verteilungsanalyse.pdf). Da dies durchgehend nicht der Fall war, wurde nun die Korrelationsmethode nach Spearman (*Spearman's Rho*) angewendet. Diese kann sowohl für nicht normalverteilte, als auch für ordinal skalierte Daten genutzt werden (SCHÖNWIESE (2006)).

Diese Methode unterscheidet sich vom Korrelationskoeffizient nach Pearson nur darin, dass die Werte zu Rängen umgeformt werden, was allerdings dazu führt, dass Informationen verloren gehen können. Es ergibt sich die Formel

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n D_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

mit n als Grundgesamtheit und D_i als Differenzen der Rangzahlen (BURT & BARBER (1996: 395)). Für den Test auf Signifikanz wird die Formel

$$p = r_s \sqrt{n - 1}$$

verwendet, wobei r_s der Korrelationskoeffizient nach Spearman ist und n wiederum die Grundgesamtheit (BURT & BARBER (1996: 396)).

Der p-Wert kann jedoch hier nur asymptotisch berechnet werden, da in den hier verwendeten Datensätzen durch die Umformung in Ränge Bindungen auftreten. Als Bindungen werden

gleiche Werte in den zu korrelierenden Datensätzen bezeichnet, was dazu führt, dass diesen Werten kein eindeutiger Rang zugeordnet werden kann und somit die Mittelwerte der Rangdifferenzen zur Berechnung herangezogen werden müssen. Die oben angegebenen Formeln zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten nach Spearman sowie dessen Signifikanz können nur angewendet werden, wenn bei weniger als 25 % der benutzten Daten Bindungen auftreten, andernfalls muss auf eine erweiterte Formel zurückgegriffen werden. (BURT & BARBER (1996)). Für diese Arbeit konnten die hier angegebenen Formeln verwendet werden. Da die Daten nicht normalverteilt sind, werden die Ergebnisse der Spearman-Korrelation als zuverlässiger angesehen, sodass die Diskussion auf der Grundlage dieser Werte aufgebaut ist. Es wurden für jeden Bag alle verfügbaren Parameter über eine Tiefenachse geplottet (Vgl. z. B. Abbildung 14); darunter sind jeweils die Korrelationskoeffizienten nach Spearman in einer Tabelle zusammengefasst. Sie dienen zunächst der Anschauung bzw. Vollständigkeit und werden im Einzelnen in den Kapiteln 5.3 und 5.4 behandelt.

4.4.3 Kreuzkorrelation

Nach den Korrelationsberechnungen mit den Methoden nach Pearson und Spearman wurden deutlich weniger signifikante Korrelationskoeffizienten festgestellt als zunächst erwartet. Die verschiedenen Ursachen hierfür werden in Kapitel 6 ausführlich diskutiert.

Da der Schnee Schicht für Schicht abgelagert wird, stellt die Tiefe prinzipiell die Zeit dar und die Daten können als Zeitreihen behandelt werden. Es wurde daraufhin noch eine Kreuzkorrelation für alle relevanten Parameter berechnet. Bei dieser Methode werden die zu korrelierenden Daten (-reihen) jeweils in Schritten von einem Datenpunkt gegeneinander verschoben. So kann festgestellt werden, ob bei einer zeitlichen Verschiebung evtl. stärkere Korrelationen beobachtet werden können bzw. ob eine Variable die andere beeinflusst. Im Eis aus geringeren Tiefen könnte man so beispielsweise die saisonalen Signale der Spurenstoffe gut miteinander korrelieren.

Die Berechnung erfolgt nach der Formel

$$r_c = \frac{\sum_{i=1}^{n-\tau} a_i b_i + \tau}{\sqrt{\sum_{i=1+\tau}^n b_i^2 \sum_{i=1}^{n-\tau} a_i^2}}$$

wobei n die Grundgesamtheit ist, a_i und b_i die zu korrelierenden Variablen und τ die Zeitverschiebung (SCHÖNWIESE (2006: 231)). Auch hier liegt der Korrelationskoeffizient zwischen -1 und 1; ein Koeffizient von annähernd 0 deutet auf keinen Zusammenhang zwischen den Variablen hin.

Bei den Daten dieser Arbeit ist die Verschiebung entsprechend der Auflösung des Datensatzes in mm auf der Abszissenachse aufgetragen, während der Korrelationskoeffizient auf der Ordinate abgelesen werden kann (Vgl. z. B. Abbildung 23). Aufgrund der hier verwendeten Software (siehe Kapitel 4.6.2), konnte die Kreuzkorrelation nur nach der Pearson-Methode berechnet werden, die Signifikanzberechnung erfolgt demnach wie in Kapitel 4.5.1 beschrieben. Die gestrichelten blauen Linien im Plot kennzeichnen jeweils das 95 % - Signifikanzniveau (Vgl. z. B. Abbildung 23).

4.5 Datenverarbeitung und verwendete Software

4.5.1 cAxes- und RunningMean Programm

Um aus den Messwerten des Fabric Analyzers eine Statistik zu den Daten der physikalischen Eigenschaften zu erhalten, bedient man sich zweier Programme: erstens, dem c-Axes-Programm, dessen Aufgabe darin besteht, eine Kornsegmentierung durchzuführen und für einzelne Dünnschnitte eine Körnerstatistik zu erstellen. Dazu werden die vom Fabric Analyzer generierten Dateien eingelesen und die Winkel Azimut und Colatitude in ein kartesisches Koordinatensystem überführt. Mit drei Ebenen für x, y und z wird ein vector-image erstellt, zu dem zusätzlich einige Parametereinstellungen vorgenommen werden müssen. (EICHLER (2013)).

Die output-Datei aus dem c-Axes-Programm wird dann als input-Datei für den zweiten Analyseschritt, der mittels RunningMean-Programm (programmiert von JAN EICHLER (2013) in C++) durchgeführt wird, verwendet. Ziel dieses Programms ist es, mit Hilfe eines gleitenden Mittelwertes eine höhere Auflösung der Korngrößen und Kristallorientierungen auf Basis der Körnerstatistik zu erhalten. Hier ist der erste Schritt das *pathlisting*, bei dem die Pfadangaben der Dünnschnitte aufgezählt werden, die bei der Analyse aneinandergereiht werden sollen. Es wurden immer sechs Dünnschnitte eingefügt, was der Länge eines Bags entspricht (TAMMEN (2012)). Den Dünnschnitten werden vom Programm Nummer von 101 bis 601 zugeordnet.

Es folgen auch hier einige Parametereinstellungen: soll bei der Analyse links oder rechts ein Rand weggeschnitten werden, so muss dieser in Pixel angegeben werden. Des Weiteren werden Framehöhe, die die Größe des zu mittelnden Bereiches bestimmt und Schrittweite angegeben. Je kleiner diese beiden Einstellungen gewählt werden, desto höher ist die Auflösung. Da die CFA-Daten mit einer Tiefenauflösung von 1mm vorlagen, wurde bei der RunningMean-Analyse eine Framehöhe von 500 Pixel ($\triangleq 1\text{cm}$) und eine Schrittweite von 50 Pixel ($\triangleq 1\text{mm}$) gewählt. Ein Rand wurde vorerst nicht weggeschnitten.

Nach dem Start des Programms wird die Datei „runningmean.txt“ gespeichert, in der die statistischen Parameter in Spalten aufgelistet sind. Aus dieser Datei werden die für die folgenden Darstellungen relevanten Werte für die mittlere Korngröße und den Eigenwert E3 genommen.

4.5.2 Aufbau der Plots

Für die weitere Arbeit mit den Daten wird die frei verfügbare Programmiersprache R verwendet, die sich besonders gut für statistische Berechnungen und graphische Darstellung eignet (<http://www.wiwi.uni-bielefeld.de/~frohn/Mitarbeiter/Handl/einfuehrunginr.pdf/>).

Um die Daten mit R graphisch darstellen zu können, müssen beide Datensätze gleich viele Werte enthalten. Es ist jedoch aufgefallen, dass im Datensatz aus dem RunningMean Programm jeweils zehn Werte gefehlt haben. Die Ursache dafür liegt vermutlich am Verschnitt, der beim Zersägen des Kerns in die sechs Sektionen entsteht. Es handelt sich dabei nur um wenige Millimeter, doch es ist nicht genau dokumentierbar, wie viel an jedem Ende eines Stückes fehlt. Um dieses Problem zu umgehen, wurden am Anfang, am Ende und in den Übergängen zwischen den Dünnschnittbildern möglichst gleichverteilt NaN's (Not a Number), also fehlende Werte eingesetzt. Nach diesem Schritt konnten die Parameter aus beiden Datensätzen in einem Plot zusammengeführt werden.

Jeder Plot beinhaltet zunächst Angaben zur Bag-Nummer und zur Tiefe. Die Bag-Nummer kann in die Tiefe umgerechnet werden; die Formeln dafür lauten:

$$(B_n - 1) * 0,55 = x_1$$

$$(y - 1) * \frac{0,55}{6} = x_2$$

$$x_1 + x_2 = D$$

wobei B_n die Bag-Nummer ist; y die Stücknummer, die im RunningMean Programm jeder der sechs Sektionen zugeteilt wird (101 bis 601) und D die errechnete Tiefe.

Im Folgenden wird der Aufbau des Datenplots beschrieben, der für alle Bags gleich ist. Die untere x -Achse gibt die absolute Tiefe in Metern an, die obere x -Achse zeigt die relative Position in der Probe an und macht noch einmal deutlich, dass es sich immer um je 55cm lange Kernstücke handelt. Beide Achsen gelten für alle Graphen innerhalb eines Plots. Die y -Achsen auf der rechten und linken Seite sind jeweils variabel den Messwerten angepasst. Um die Ergebnisse jedoch vergleichen und deren statistische Relevanz abschätzen zu können, war es notwendig, die in Pixel angegebene mittlere Korngröße in mm^2 umzurechnen. Beträgt die mittlere Korngröße in einem Frame beispielsweise 8524 Pixel, so ergibt dies multipliziert mit 0,0004 eine Korngröße von ca. 3,42 mm^2 .

Die obersten Graphen zeigen die Kurven für den Gehalt an Ammonium-Ionen (NH_4^+), welche auf der linken Achse dargestellt werden und eine hellgrüne Farbe haben und Nitrat-Ionen (NO_3^-) auf der rechten Achse in schwarz. Darunter folgt die einzelne Kurve der Leitfähigkeit in dunkelgrün. Im mittleren Abschnitt wird der Gehalt an Kalzium-Ionen (Ca^{2+}) auf der linken Achse und in türkis und Natrium-Ionen (Na^+) in violett gezeigt. Unterhalb dieses Abschnittes ist der Eigenwert E3 als wieder als einzelne Kurve in orange aufgezeichnet.

Schließlich folgen noch die Anzahl der Spurenstoffe in blau und die mittlere Korngröße auf der rechten Achse in rot.

5 Ergebnisse

5.1 Vorläufiges Ergebnis

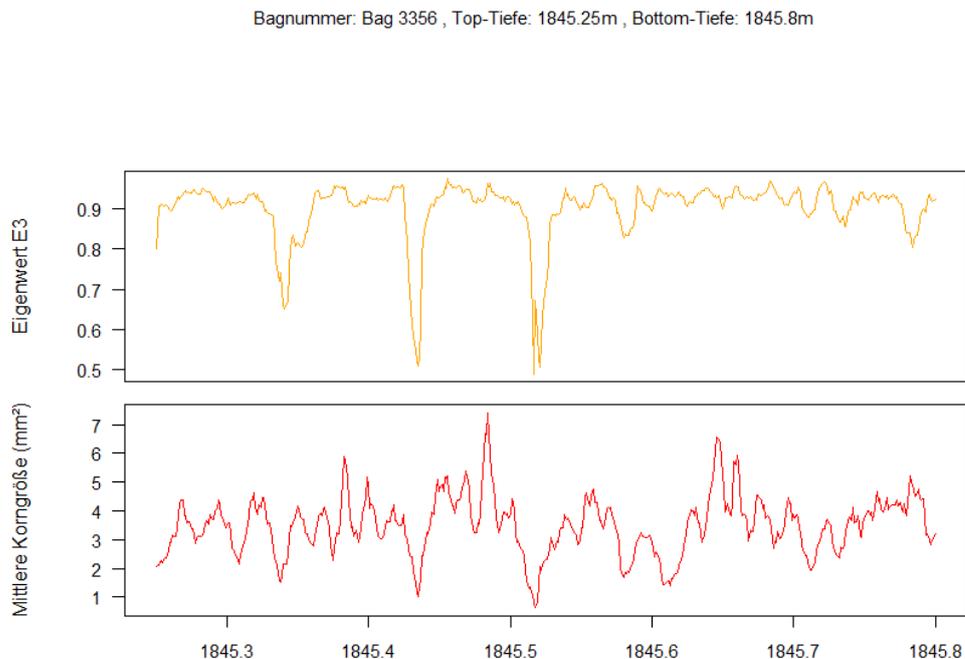


Abb. 12: Der Plots der mittleren Korngröße und des Eigenwertes E3 zeigen jeweils an den Grenzen der Dünnschnittbilder deutliche Ausreißer (hier beispielhaft am Bag 3356 gezeigt).

In Abbildung 12 sind für den Bag 3356 zunächst nur der Eigenwert E3 und die mittlere Korngröße gegen die Tiefe aufgetragen. Es fällt auf, dass es in relativ regelmäßigen Abständen von ca. 9 cm einen Ausschlag der Kurven nach unten gibt. Diese 9 cm entsprechen der Länge eines Dünnschnittes. Die Ausschläge sind Artefakte und werden an den Randbereichen der Bilder verursacht. Als Ursache wurden die Körner identifiziert, die nicht zur eigentlichen Probe gehören, sondern durch das Wasser entstehen, welches als Klebstoff zwischen Probe und Probenträger fungiert. Auch nach Ergänzung und Verbesserung des cAxes-Programms durch Jan Eichler (AWI) konnten diese Artefakte nicht vollständig entfernt werden, sodass ein leichtes Einknicken der Kurven bleibt.

Um diese Ausreißer besser sichtbar zu machen, wurde ein Plot mit der sogenannten *Total Area* angefertigt: multipliziert man bei den Proben für jedes Fenster des gleitenden Mittelwertes die mittlere Korngröße mit der Anzahl der Körner, so müsste dies die jeweils abgescannte

Fenstergröße in Pixel ergeben. Die *Total Area* kann als Maß für die Güte des Processings angesehen werden bzw. als ein Maß dafür, wie gut die durch die Software erkannten Körner das Fenster ausfüllen. Besteht ein zu großes Defizit zwischen Fenstergröße und Kornflächen, bedeutet dies, dass Bereiche nicht erkannt wurden und das Mittelungsergebnis des entsprechenden Fensters wird verworfen.

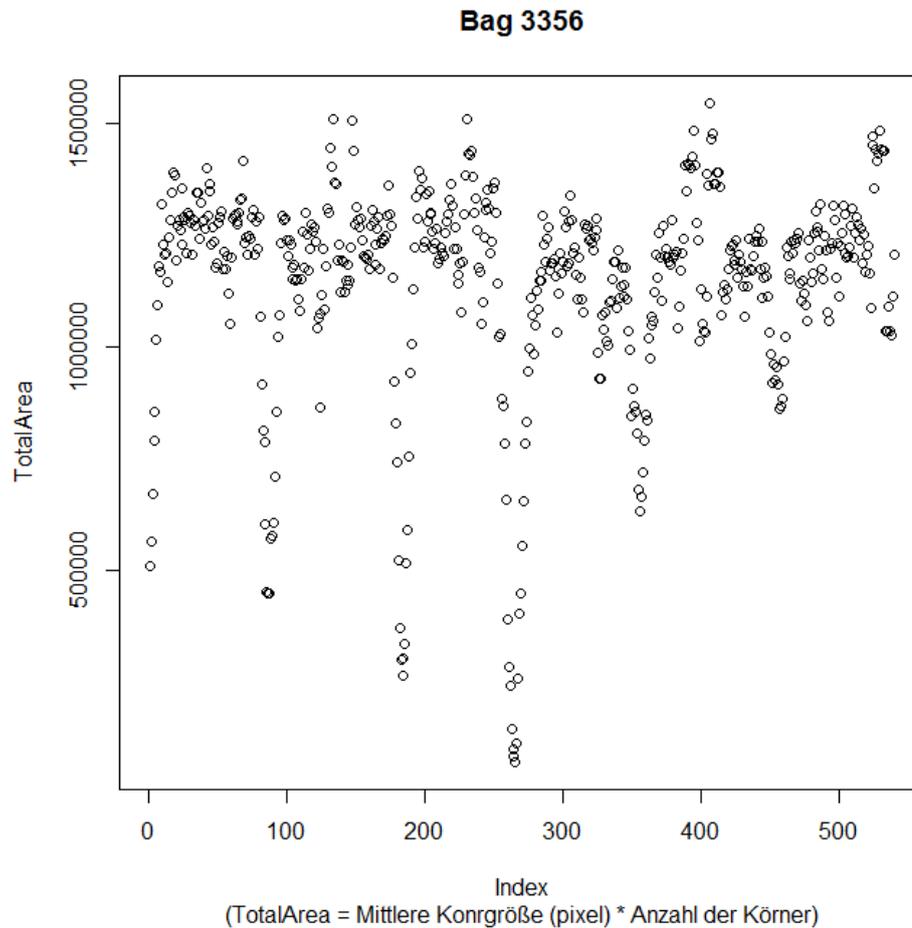


Abb. 13: Mit dem Plot der Total Area konnten die Ausreißer gut identifiziert werden. Anschließend wurden Grenzen festgelegt, um diese per Hand zu entfernen.

So wurde für jede Probe über die Total Area eine Grenze definiert (für den Bag 3356 z. B. 900.000 Pixel, siehe Anhang), unterhalb dieser anschließend die Ausreißer für die mittlere Korngröße per Hand entfernt bzw. durch NaN's ersetzt wurden, um die Tiefenzuordnung und somit Vergleichbarkeit zum CFA-Datensatz beizubehalten.

Bei dem Eigenwert im Beispiel des Bags 3356 fällt vor allem der erste Teil der Kurve durch besonders große Schwankungen auf. In diesem Bag tritt ein Bruch auf, sodass die Schwankungen durch dessen unregelmäßigen Rand verursacht werden können. Generell konnten Schwankungen bei den Eigenwerten auch in den anderen Bags beobachtet werden. Orientiert

an den Erwartungswerten, die JAN EICHLER (2013) im Zuge seiner Diplomarbeit für den Eigenwert E3 im NEEM-Eiskern berechnet hat, wurden auch hier die Ausreißer per Hand entfernt, wobei die Grenzen individuell für die Daten jedes Dünnschnittes festgelegt wurden. Verschiebungen zu den Ausreißern der mittleren Korngröße waren durchaus möglich. Auch beim Betrachten der Trend-Bilder (siehe z.B. Abbildung 14) erscheinen alle vier Bags (siehe Anhang) relativ einheitlich rot, die c-Achsen sind also verhältnismäßig gut eingeregelt, sodass ein Einknicken der Kurven bis zu 0,5 für die Körner der Proben nicht realistisch erscheint.

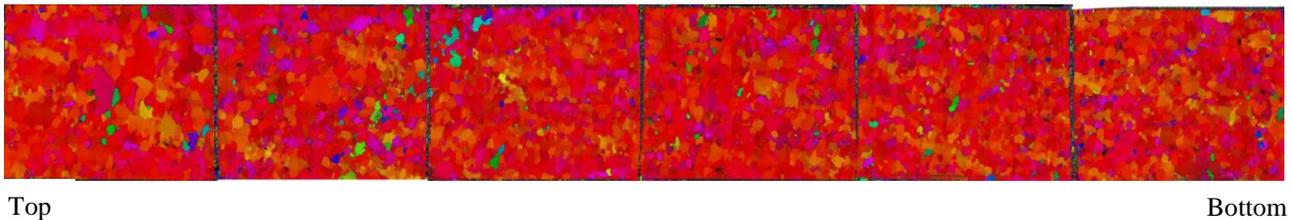


Abb. 14: Aneinandergereihte Trend-Bilder für den Bag 3906 (WEIKUSAT & KIPFSTUHL (2010))

Im Folgenden werden für jeden Bag für den Eigenwert E3 und die mittlere Korngröße prozentuale Angaben zu den letztlich verwendeten Daten gemacht.

5.2 Korrigiertes Ergebnis

5.2.1 Linescan-Plot

Abbildung 15 zeigt die Anzahl der Spurenstoffe pro ml Schmelzwasser in Abhängigkeit von der Tiefe für jeden Bag. Es wurden hier die Linescan-Images hinterlegt, um zu prüfen, ob die Positionen der einzelnen Peaks mit denen der im Bild zu sehenden Schichten erhöhten Staubgehaltes (*cloudy bands*) übereinstimmen. So lassen sich auch große Unstimmigkeiten bei der Tiefenzuordnung aufdecken.

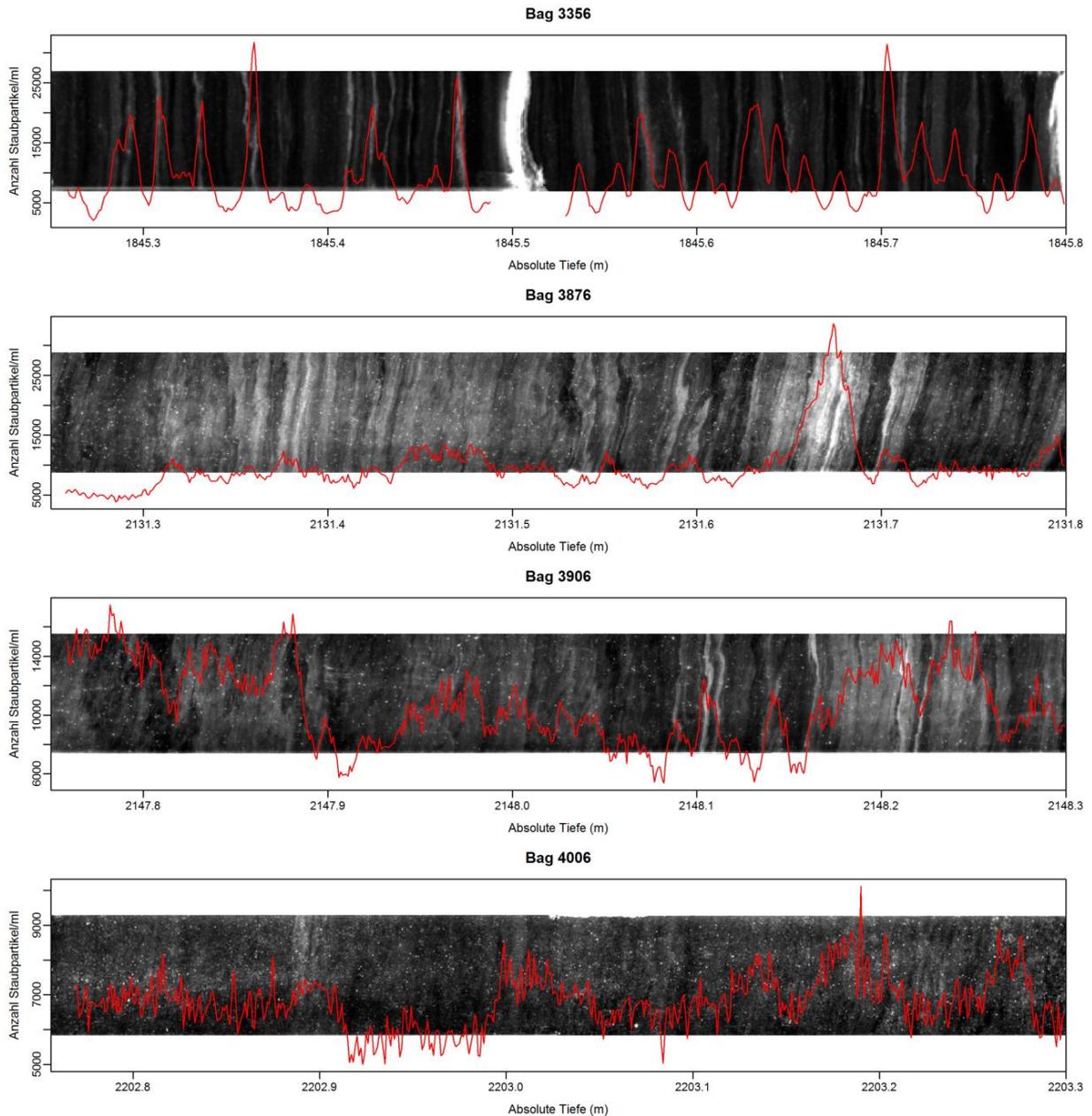


Abb. 15: Mit dem Linescan-Plot sollte überprüft werden, ob die Peaks in den Kurven der Anzahl der Staubpartikel mit den im Linescan-Bild sichtbaren *cloudy bands* übereinstimmen (Linescan-Bilder aus KIPFSTUHL 2010).

Im Allgemeinen lassen sich durchaus Übereinstimmungen finden. Die einzelnen Lagen können jedoch vor allem beim Bag 3356 deutlich voneinander unterschieden werden. Es fällt auf, dass in diesem Bag das Eis trotz der weißen Bänder und der im Gegensatz zu den anderen Kernstücken relativ hohen Spurenstoffkonzentration sehr klar ist.

Im Bag 4006 wird das Eis trüber, es sind viele Luftblasen erkennbar, wobei jedoch die Schichten nicht mehr so klar voneinander unterschieden werden können.

Des Weiteren wurde vor allem im Bag 3876 festgestellt, dass die Lagen teilweise nicht senkrecht zur Kernachse verlaufen, sondern deutlich schräg einfallen, was mit der Deformationsgeschichte des Eisschildes zusammenhängt. Als mögliche Fehlerquelle wird dies noch in Kapitel 6 behandelt.

Da durchaus Übereinstimmungen der Peaks erkennbar sind, scheint es bei der Tiefenzuordnung zumindest keine großen Verschiebungen (>2 cm) zu geben und es können auf dieser Grundlage Korrelationsberechnungen durchgeführt werden.

5.2.2 Bag 3356

Die Probe stammt aus einer Tiefe von 1845,25 m bis 1845,8 m und weist einen Bruch auf. Nach Entfernen der Ausreißer konnten 91,11 % der Daten für die mittlere Korngröße und 83,20 % der Daten für den Eigenwert E3 verwendet werden. Das Eis der Probe stammt, wie auch das der anderen Bags, aus dem letzten Glazial.



Abb. 16: Der Plot der einzelnen Parameter für den Bag 3356.

Tab. 1: Korrelationskoeffizienten nach Spearman berechnet für den Bag 3356.

Bag 3356	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	-0,06	-0,21	-0,14*	-0,09	-0,26	-0,05
Eigenwert E3	-0,05	0	0,01	0,01	0,07	0,06

* signifikant bei einem Signifikanzniveau von 95 %

An diesem Bag kann man deutlich sehen, dass die Ionen-Gehalte positiv mit der Leitfähigkeit sowie der Anzahl der Spurenstoffe korrelieren.

Der mittlere Gehalt an Nitrat-Ionen beträgt 63,59 ng/g, generell hat diese Kurve bei 1845,36 m ein ausgeprägtes Maximum von 101,49 ng/g und ein Minimum bei 1845,53 m (44,58 ng/g). Damit ist der Gehalt an Nitrat-Ionen deutlich höher als der Anteil der Ammonium-Ionen, der im Mittel bei 1,62 ng/g liegt. Dieser Graph hat den größten positiven Ausschlag bei 1845,35 m (3,53 ng/g) und den größten negativen bei 1845,77 m (0,82 ng/g).

Der Gehalt an Natrium- und Kalzium-Ionen ist ähnlich und liegt im Mittel bei 29,35 ng/g bzw. 35,01 ng/g, wobei jedoch bei der Kalzium-Kurve ein Positivtrend beobachtet werden kann. Der Calcium-Gehalt ist bei 1845,70 m (56,03 ng/g) am größten und bei 1845,27 m (18,49 ng/g) am niedrigsten. Natrium hat ein Maximum bei 1845,54 m (53,20 ng/g) und ein Minimum gegen Ende des Bags bei 1845,76 m (12,58 ng/g). Fast identisch ist die Kurve der Leitfähigkeit, die an nahezu den gleichen Punkten die extremsten Werte aufweist. Sie hat einen Schwankungsbereich von 0,54 mikroS/cm bis 1,24 mikroS/cm und beträgt durchschnittlich 0,87 mikroS/cm. Der Eigenwert E3 liegt im Mittel bei 0,92.

Die mittlere Korngröße schwankt zwischen 0,64 mm² und 7,41 mm², über das ganze Kernstück gemittelt, beträgt sie 3,63 mm². In Verbindung mit dem Staubgehalt (Anzahl der Spurenstoffe/ml) gibt es augenscheinlich Bereiche, in denen eine positive als auch negative Korrelation möglich wäre. Auffällig ist, dass hier zunächst nur eine signifikante Korrelation zwischen der mittleren Korngröße und Natrium auftritt (Vgl. Tabelle 1)

5.2.3 Bag 3876

Das Eis dieses Bags wurde einer Tiefe von 2131,25 m bis 2131,8 m entnommen. Es konnten 90,74 % der Daten für die mittlere Korngröße und 84,60 % der Daten für den Eigenwert E3 verwendet werden.

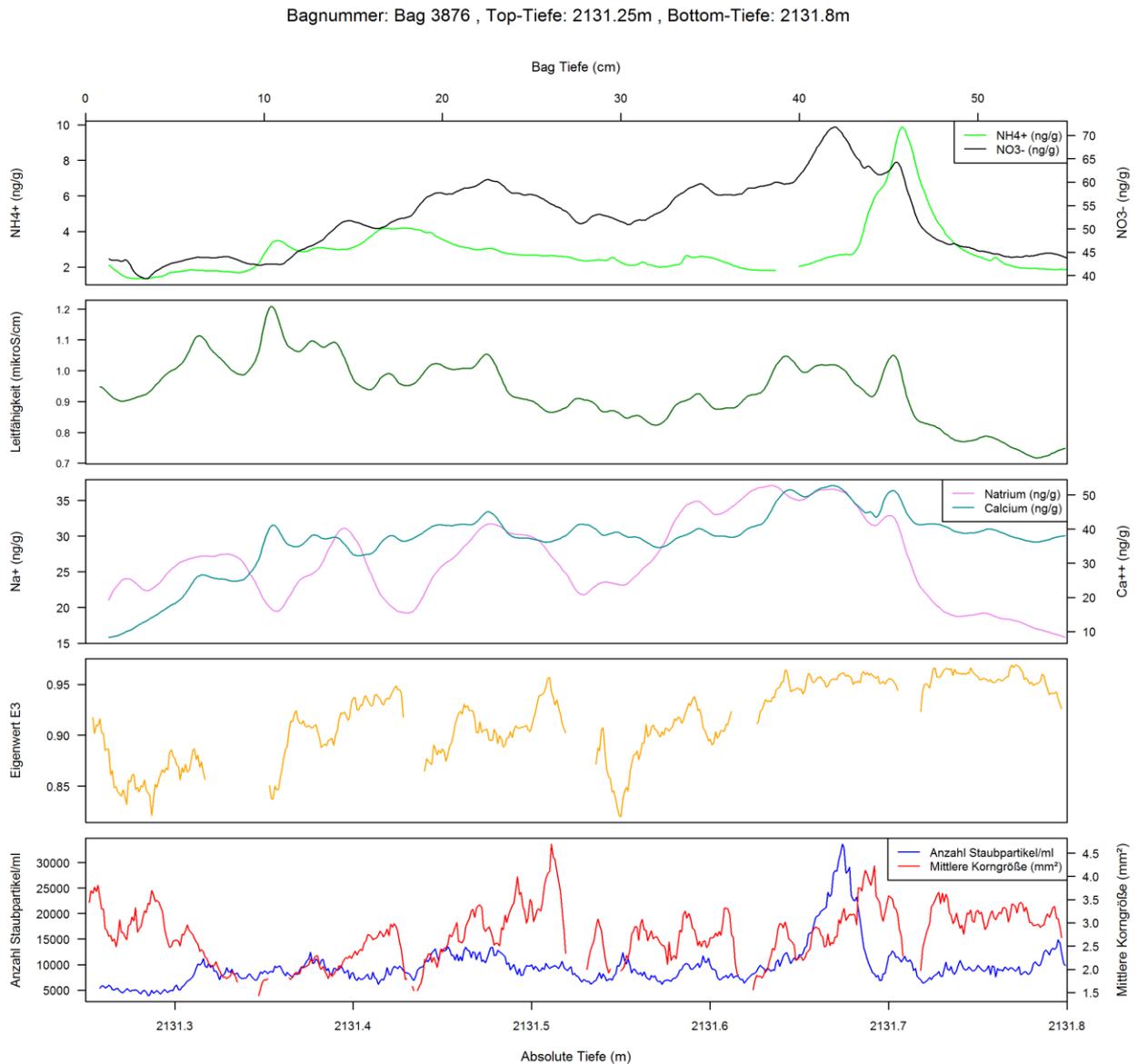


Abb. 17: Der Plot der einzelnen Parameter für den Bag 3876.

Tab. 2: Korrelationskoeffizienten nach Spearman berechnet für den Bag 3876.

Bag 3876	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,06	-0,46*	-0,12*	0,15*	0,08	0,09
Eigenwert E3	0,35	-0,29	0,03	0,48*	0,32	0,32

* signifikant bei einem Signifikanzniveau von 95 %

Der Linescan-Plot zeigte bereits, dass das Eis hier deutlich trüber ist und Abbildung 17 zeigt, dass die Konzentrationen der einzelnen Spurenstoffe im Allgemeinen geringere Schwankungen aufweisen.

Der mittlere Gehalt an Ammonium-Ionen beträgt hier 2,90 ng/g und schwankt im Wesentlichen zwischen 1,35 ng/g und 9,87 ng/g. Der Nitratgehalt ist auch hier deutlich höher als im Bag 3356, mit einem Maximum bei 2131,67 m (71,78 ng/g) und einem Minimum bei 2131,28 m (39,35 ng/g).

In diesem Bag weist die Kurve der Natrium-Ionen größere Schwankungen auf, als die der Kalzium-Ionen. Ebenso auffällig ist, dass die Leitfähigkeit ihr Maximum eher am Anfang bei 2131,35 m (1,21 mikroS/cm) hat. Die Kurven der Natrium- und Kalzium-Ionen erreichen aber erst im letzten Dritten ihre höchsten Werte. Dies lässt darauf, dass noch andere Ionen (z.B. Cl⁻ Ionen durch Meerwassereintrag) die Leitfähigkeit beeinflussen.

Der Natriumgehalt schwankt zwischen 15,85 ng/g und 37,09 ng/g, wobei der Ionen-Gehalt im Durchschnitt 26,63 ng/g beträgt. Die Calcium-Kurve hat ihr Maximum bei 2131,67 m (52,72 ng/g) und ihr Minimum gleich zu Beginn bei 2131,263 m (8,37 ng/g).

Der Eigenwert E3 schwankt hier etwas stärker und hat gemittelt über den ganzen Bag einen Wert von 0,91.

Zwischen der Anzahl der Spurenstoffe und der mittleren Korngröße kann hier augenscheinlich keine Korrelation beobachtet werden. Die mittlere Korngröße für das ganze Kernstück beträgt 2,77 mm². Die Anzahl der Spurenstoffe hat in den ersten zwei Dritteln des Kerns nur einen relativ kleinen Schwankungsbereich, erst bei 2131,67 m kommt es zu einem größeren Peak – die Anzahl steigt hier auf 33.599 Spurenstoffe pro ml.

Wird die mittleren Korngröße mit den Parametern der Chemie korreliert, können hier entgegen der Erwartung schon mehr signifikante Korrelationen identifiziert werden: Natrium und elektrische Leitfähigkeit korrelieren negativ, während das Kalzium einen positiven Korrelationskoeffizienten aufweist. Zusätzlich korreliert Kalzium (wiederum positiv) mit dem Eigenwert E3. Generell ist der Staubgehalt in diesem Kernstück etwas niedriger als im Bag 3356, dennoch treten signifikante Korrelationen mit dem Calcium auf.

5.2.4 Bag 3906

Dieser Bag stammt aus einer Tiefe von 2147,75 m bis 2148,3 m. Hier konnten nach Entfernen der Ausreißer 94,44 % der Daten für die mittlere Korngröße und 86,09 % der Daten für den Eigenwert E3 verwendet werden.

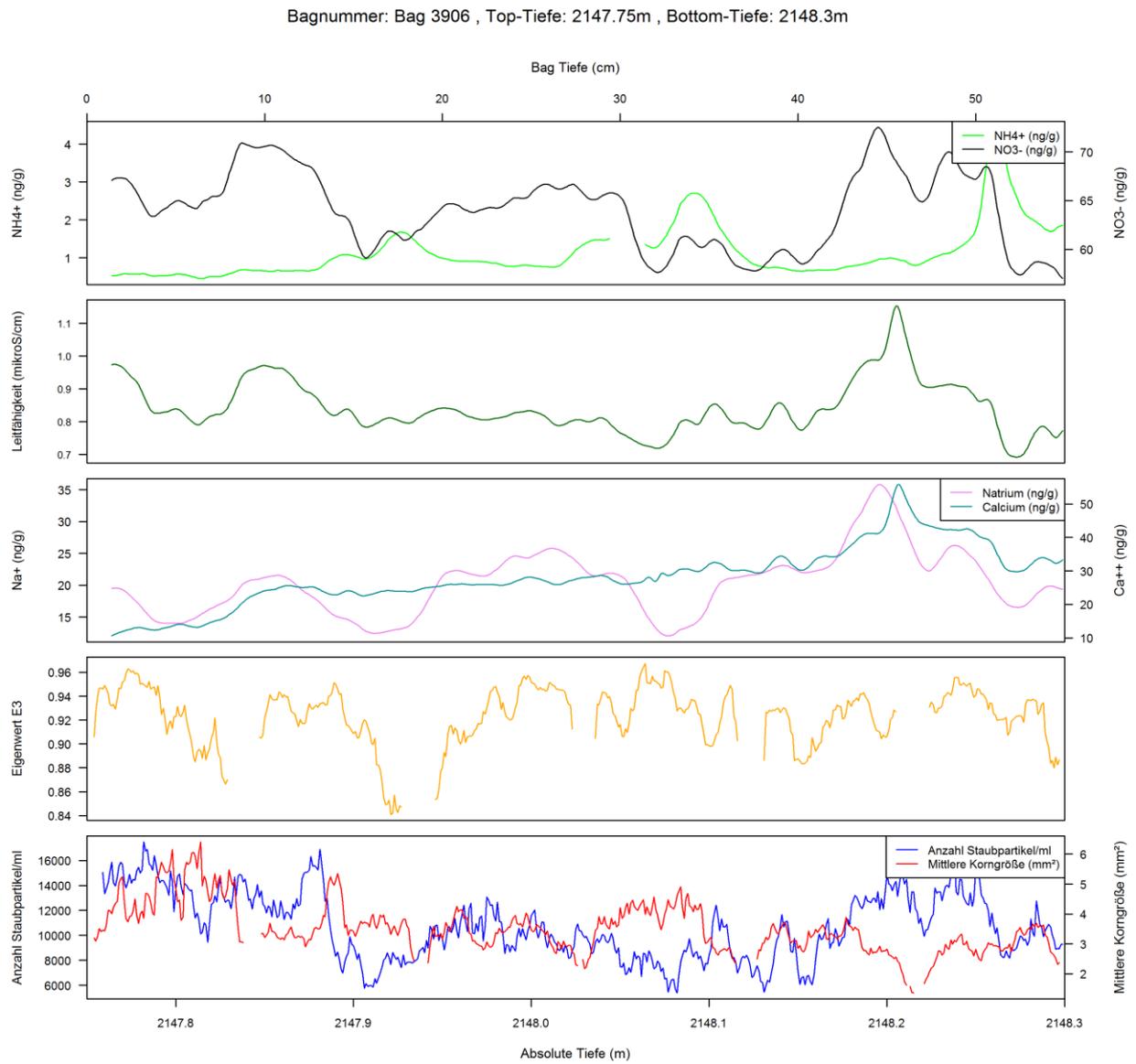


Abb. 18: Der Plot der einzelnen Parameter für den Bag 3906.

Tab. 3: Korrelationskoeffizienten nach Spearman berechnet für den Bag 3906.

Bag 3906	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	-0,02	-0,19	-0,56*	-0,62*	-0,35	-0,17*
Eigenwert E3	0,25	0,15*	0,17*	0,07	0,02	0,25

* signifikant bei einem Signifikanzniveau von 95 %

Für die Schwankungsbereiche der einzelnen Parameter bietet sich ein ähnliches Bild wie bei den vorhergehenden Bags: der mittlere Gehalt an Ammonium-Ionen beträgt 1,15 ng/g. Die Kurve hat ihr Minimum zu Beginn bei 2147,82 m (0,45 ng/g) und ihr Maximum am Ende des Bags bei 2148,26 m (4,44 ng/g). Der Nitratgehalt bewegt sich zwischen 57,00 ng/g und 72,52 ng/g.

Natrium- und Kalzium-Ionen zeigen durchgehend einen leichten Anstieg mit einem Maximum von 35,80 ng/g bzw. 55,76 ng/g im letzten Drittel des Bags, wobei Natrium jedoch stärker fluktuiert. Der mittlere Gehalt an Natrium-Ionen beträgt 20,32 ng/g, Kalzium tritt im Mittel mit einer Konzentration von 28,32 ng/g auf. Der Eigenwert schwankt hauptsächlich zwischen 0,9 und 0,95. Bei der Anzahl der Staubpartikel und der mittleren Korngröße lässt sich auch hier auf den ersten Blick kein Zusammenhang erkennen. Die Korngröße gemittelt über den ganzen Bag liegt bei 3,54 μm^2 , der mittlere Spurenstoffgehalt ist 10728 Partikel pro ml. Die Korrelationen der Korngröße mit Natrium, Calcium und auch Nitrat erweisen sich als signifikant. Dabei sind die Korrelationskoeffizienten von Natrium und Kalzium hier deutlich höher, als noch in den anderen Bags. Die Korrelation ist den Erwartungen entsprechend negativ, das heißt, je höher die Konzentration dieser Spurenstoffe, desto kleiner sind die auftretenden Korngrößen. Natrium sowie die Leitfähigkeit korrelieren im Gegensatz dazu positiv mit dem Eigenwert E3.

5.2.5 Bag 4006

Dieser Bag stammt aus einer Tiefe von 2202,75 m bis 2203,3 m. Es wurden 95,37 % der Daten für die mittlere Korngröße und 84,04 % der Daten für den Eigenwert E3 verwendet.

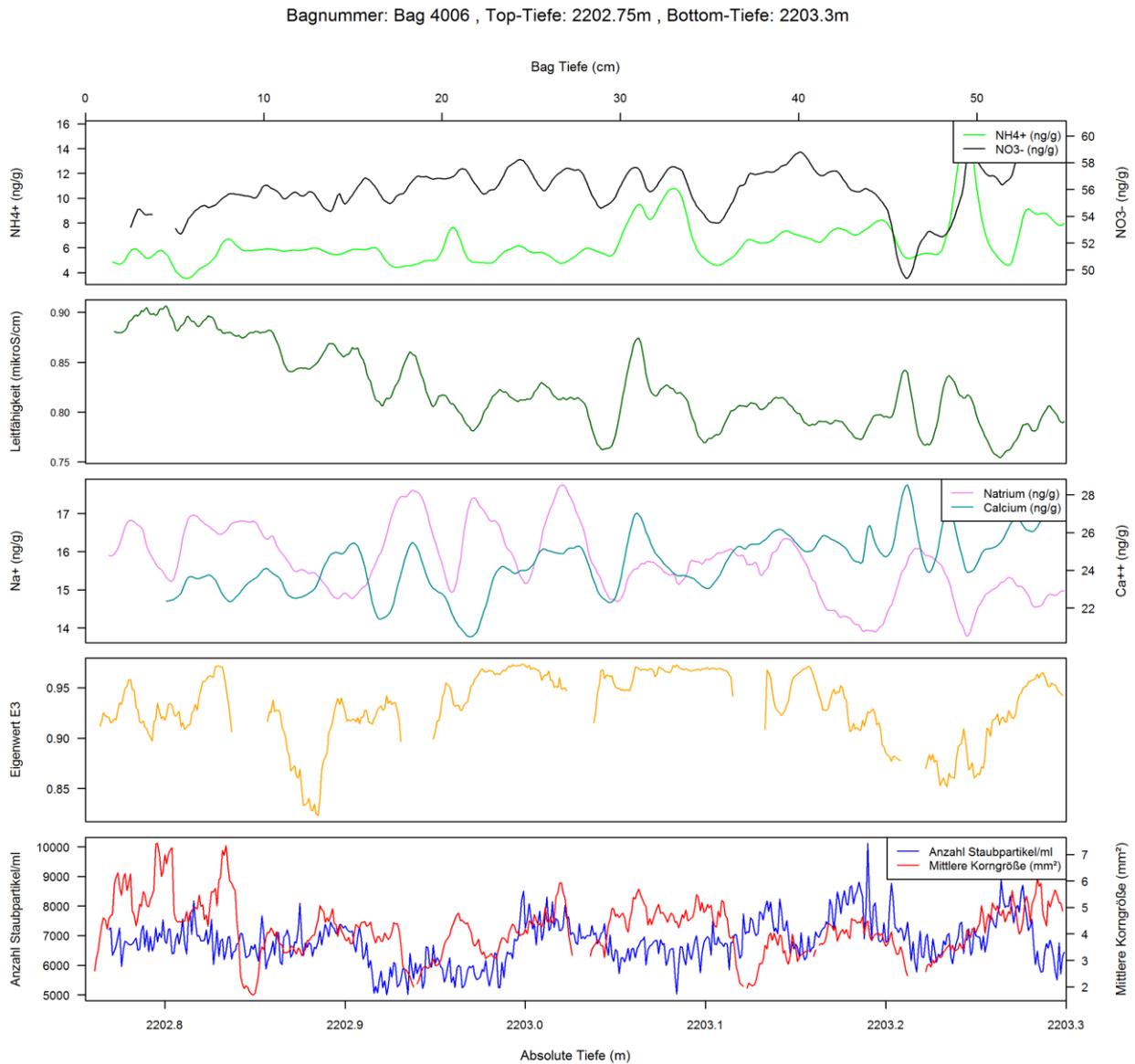


Abb. 19: Der Plot für die einzelnen Parameter für den Bag 4006.

Tab. 4: Korrelationskoeffizienten nach Spearman berechnet für den Bag 4006.

Bag 4006	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,12*	0,13*	-0,11*	0	0,01	0,06
Eigenwert E3	-0,17*	-0,13*	0,27	-0,04	0,01	0,32

* signifikant bei einem Signifikanzniveau von 95 %

Der Ammonium-Gehalt verzeichnet einen leichten Anstieg gegenüber den anderen Bags, er beträgt im Mittel 6,39 ng/g. Der Schwankungsbereich liegt bei 3,54 ng/g bis 15,76 ng/g. Nitrat fluktuiert besonders gegen Ende des Eisstückes stark: die Kurve erreicht ein Minimum bei 2203,21 m (49,37 ng/g) und kurz darauf ein Maximum bei 2203,29 m (60,68 ng/g).

Die Leitfähigkeit schwankt zwar relativ stark, sinkt aber im Allgemeinen ab. Den niedrigsten Wert erreicht sie bei 2203,26 m mit 0,75 mikroS/cm; der Mittelwert beträgt 0,82 mikroS/cm.

Der Gehalt an Natrium- und Kalzium-Ionen ist ebenfalls gesunken, er erreicht nur noch maximale Werte von 17,75 ng/g beim Natrium (Mittelwert: 15,73 ng/g) und 28,52 ng/g beim Kalzium (Mittelwert: 24,40 ng/g).

Der Eigenwert beträgt gemittelt 0,92 und verzeichnet ungeachtet der Ausreißer zwei Ausschläge der Kurve nach unten bei ca. 2202,87 m sowie bei 2203,22 m.

Die mittlere Korngröße ist gegenüber den anderen Bags leicht angestiegen und erreicht im Mittel einen Wert von 4,20 μm^2 . Die Anzahl der Spurenstoffe ist vergleichsweise gesunken, sie erreicht nur noch einen Höchstwert von 10.118 Partikeln pro ml bei einer Tiefe von 2203,93 m. Eine Korrelation kann auch hier auf den ersten Blick nicht beobachtet werden. Dennoch weisen hier der Staubgehalt und die Leitfähigkeit signifikant positive Korrelationen mit der mittleren Korngröße sowie negative Korrelationen mit dem Eigenwert E3 auf.

Im Linescan-Plot konnte bei den Bag 4006 nur eine relativ geringe Staubkonzentration erkannt werden, zusätzlich wird in Abbildung 19 deutlich, dass die Anzahl der Staubpartikel wesentlich größeren Schwankungen ausgesetzt ist als die mittlere Korngröße. Natrium korreliert wieder negativ mit der mittleren Korngröße.

5.3 Korrelation der mittleren Korngröße mit den chemischen Parametern

Die Korrelationsberechnungen dienen dazu, einen möglichen Einfluss der Spurenstoffe auf die Entwicklung der Mikrostruktur abschätzen zu können. Es wurde in mehreren Eiskernen beobachtet, dass an Stellen hoher Spurenstoffkonzentration kleinere Korngrößen auftreten, es wäre also eine negative Korrelation zu erwarten gewesen.

Um eventuell augenscheinliche Korrelationen identifizieren zu können, wurden zuvor sogenannte Scatterplots angefertigt, d.h. es wurden jeweils zwei Parameter gegeneinander geplottet. Wie beispielhaft am Bag 3876 gezeigt (siehe Abbildung 20), ließen die Punktwolken jedoch keinen nennenswerten Zusammenhang erkennen. Dies spiegelte sich später auch in den Korrelationskoeffizienten wider.

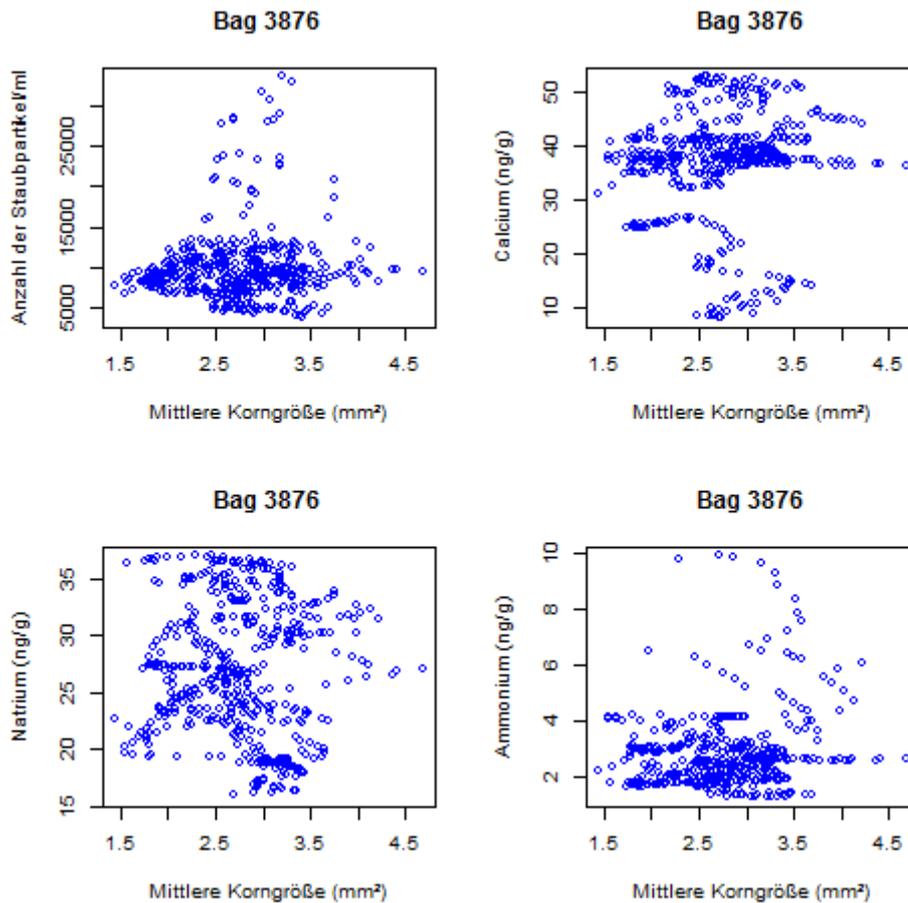


Abb. 20: Die Scatterplots dienen dazu, augenscheinliche Korrelationen zu identifizieren (hier einige ausgewählte Beispiele für den Bag 3876).

Es wurden zwei Korrelationsmethoden angewendet. Die Methode nach Spearman lieferte die zuverlässigeren Ergebnisse, da die Daten nicht normalverteilt sind (siehe Kapitel 4.5.2). Dennoch muss erwähnt werden, dass bei der Methode nach Pearson deutlich mehr signifikante Korrelationen auftraten.

Nach beiden Methoden konnte bei nahezu allen Bags jedoch eine signifikante (negative) Korrelation zwischen Natrium bzw. der Leitfähigkeit und der mittleren Korngröße festgestellt werden. Dies überrascht, da auch in anderen Veröffentlichungen in erster Linie der Staubgehalt und somit das Kalzium im Vordergrund standen (siehe z. B. RUTH ET AL. (2002)).

Tab. 5: Korrelationskoeffizienten der mittleren Korngröße mit den chemischen Parametern berechnet nach Pearson für alle Bags.

Korrelationskoeffizienten (mittlere Korngröße)	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
Bag 3356	-0,08	-0,19	-0,11*	-0,08	-0,19*	-0,06
Bag3876	0,07	-0,45*	-0,06	0,07	0,15*	0,11*
Bag 3906	0,07	-0,25	-0,55*	-0,70*	-0,23	-0,10*
Bag 4006	0,12*	0,22	-0,12*	-0,02	0,04	0,12*

* signifikant bei einem Signifikanzniveau von 95 %

Tab. 6: Korrelationskoeffizienten der mittleren Korngröße mit den chemischen Parametern berechnet nach Spearman für alle Bags.

Korrelationskoeffizienten (mittlere Korngröße)	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
Bag 3356	-0,06	-0,21	-0,14*	-0,09	-0,26	-0,05
Bag3876	0,06	-0,46*	-0,12*	0,15*	0,08	0,09
Bag 3906	-0,02	-0,19	-0,56*	-0,62*	-0,35	-0,17*
Bag 4006	0,12*	0,13*	-0,11*	0	0,01	0,06

* signifikant bei einem Signifikanzniveau von 95 %

Bei den Korrelationskoeffizienten nach Pearson scheint zudem die Korrelation der mittleren Korngröße mit Nitrat von Bedeutung zu sein. Dieses Ergebnis konnte jedoch bei der Berechnung nach Spearman nicht bestätigt werden.

Bei den übrigen Komponenten lässt sich kein durchgehendes Muster erkennen, was mitunter mit einer fehlerhaften Tiefenzuordnung zusammenhängen kann.

Generell kann man jedoch feststellen, dass nach den Berechnungen beider Methoden deutlich weniger signifikante Korrelationen im Bag 3356 auftreten, was durchaus damit zusammenhängen kann, dass dieses Kernstück aus einer geringeren Tiefe stammt.

5.4 Korrelation des Eigenwertes E3 mit den chemischen Parametern

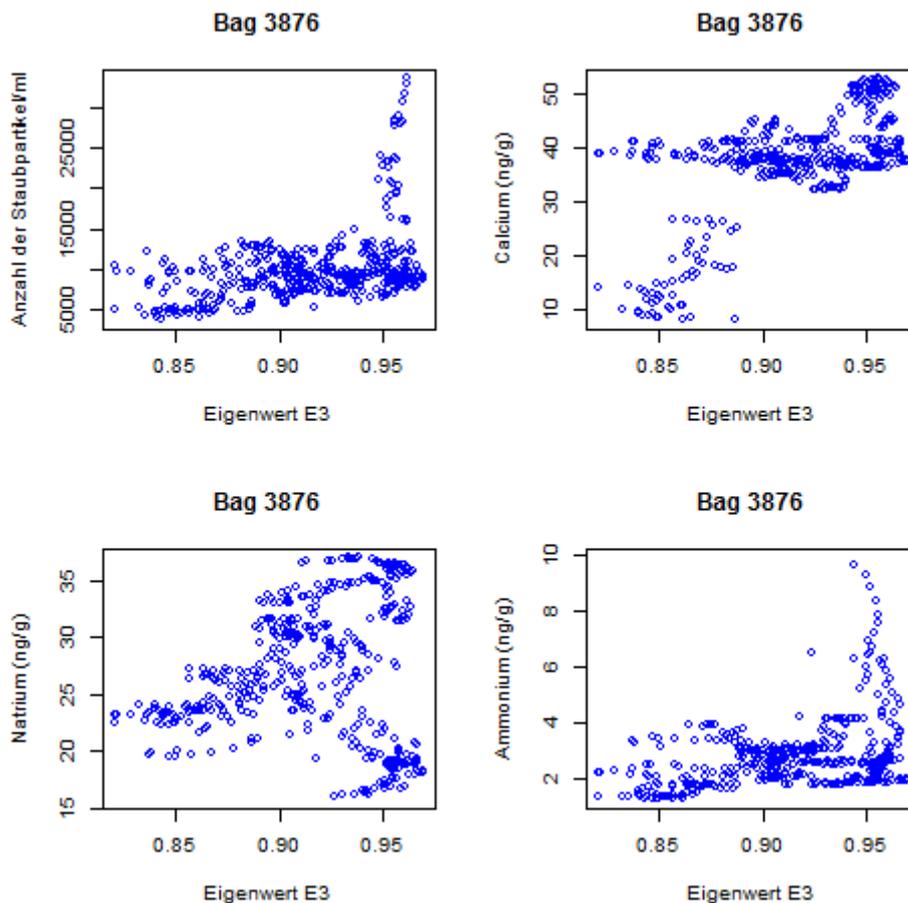


Abb. 21: Die Scatterplots dienen dazu, augenscheinliche Korrelationen zu identifizieren (hier einige ausgewählte Beispiele für den Bag 3876).

Auch hier zeigten die Scatterplots (Abbildung 21: wieder am Beispiel von Bag 3876) keinen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Eigenwert E3 und den chemischen Parametern. Es ist also davon auszugehen, dass die Korrelationskoeffizienten ähnlich denen der mittleren Korngröße ausfallen.

Tab. 7: Korrelationskoeffizienten des Eigenwertes E3 mit den chemischen Parametern berechnet nach Pearson für alle Bags.

Korrelationskoeffizienten (Eigenwert E3)	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
Bag 3356	-0,02	0,01	-0,04	-0,07	0,10*	0,04
Bag3876	0,04*	-0,32	0,11*	0,63*	0,36	0,36
Bag 3906	0,27	0,14*	0,17*	0,10*	-0,01	0,22
Bag 4006	-0,12*	-0,12*	0,27	-0,01	-0,07	0,35

* signifikant bei einem Signifikanzniveau von 95 %

Tab. 8: Korrelationskoeffizienten des Eigenwertes E3 mit den chemischen Parametern berechnet nach Spearman für alle Bags.

Korrelationskoeffizienten (Eigenwert E3)	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
Bag 3356	-0,05	0	0,01	0,01	0,07	0,06
Bag 3876	0,35	-0,29	0,03	0,48*	0,32	0,32
Bag 3906	0,25	0,15*	0,17*	0,07	0,02	0,25
Bag 4006	-0,17*	-0,13*	0,27	-0,04	0,01	0,32

* signifikant bei einem Signifikanzniveau von 95 %

Nach der Berechnung konnten bei beiden Methoden für einige Bags signifikante Korrelationen mit der Leitfähigkeit und dem Natrium ausgemacht werden. Es lässt sich jedoch hier ebenfalls kein durchgehendes Muster erkennen.

Einerseits kann aufgrund der Ergebnisse davon ausgegangen werden, dass keine Korrelationen mit dem Eigenwert bestehen, andererseits kann der Einfluss möglicher Fehlerquellen aber

auch zu groß sein, so dass Korrelationen dadurch verschleiert werden. Beispielsweise kann eine millimeterweise Verschiebung der Tiefenachse die Koeffizienten schon wesentlich beeinträchtigen.

Fehler oder Ungenauigkeiten können auch entstehen, da die Eigenwerte bei der Erstellung der Körnerstatistik gemittelt werden müssen und somit Informationen verloren gehen.

Die Bewertung und Diskussion der Fehlerquellen erfolgt in Kapitel 6.

5.5 Faktorenanalyse

Die Faktorenanalyse ist ein multivariates Verfahren, welches in der Statistik unter anderem zur Datenreduktion eingesetzt wird. Es dient dazu, Hintergrundvariablen (Faktoren) bzw. mögliche Zusammenhänge von abhängigen und unabhängigen Variablen aufzudecken (<http://www.uni-due.de/imperia/md/content/soziologie/stein/faktorenanalyse.pdf/>).

Um die Korrelationswerte erneut zu prüfen und um evtl. unwichtige Variablen auszuschließen, wurde hier für jeden Bag eine Faktorenanalyse berechnet. Dabei werden die Rohdaten zunächst mittels z-Transformation standardisiert, sodass die Daten jeder Komponente jeweils den Mittelwert $\bar{x}=0$ und die Standardabweichung $S=1$ aufweisen. Mittels einer reduzierten Korrelationsmatrix können schließlich die Faktorladungen berechnet werden; die Faktoren sind hypothetische Größen und werden mit den Variablen korreliert. Das Ergebnis wird dann als Faktorladung bezeichnet. Anschließend müssen die Ladungen noch rotiert werden. In dieser Arbeit wurde die Rotation „varimax“ verwendet, wobei die Varianz der Faktorladungen maximiert wird und die Faktoren unabhängig (orthogonal) sind (SCHÖNWIESE (2006); <http://www.uni-due.de/imperia/md/content/soziologie/stein/faktorenanalyse.pdf/>).

Tab. 9: Faktorwerte (rotierte Faktorladungen) am Beispiel des Bags 3356.

Bag 3356	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
Leitfähigkeit	0,48	0,78	-0,10
Natrium	0,48	0,52	-0,29
Kalzium	0,34	-0,02	-0,61
Anzahl der Spuren- stoffe	0,77	0,09	-0,18
Ammonium	0,32	0,61	0,72
Nitrat	0,95	0,22	0,22
mittlere Korngröße	0,01	-0,30	-0,01
Eigenwert E3	0,01	-0,03	0,16

Beispielhaft werden in Tabelle 9 die Ergebnisse der Faktorenanalyse für den Bag 3356 dargestellt, die Ergebnisse der anderen Bags können im Anhang eingesehen werden.

Für diese Arbeit wurden drei Faktoren extrahiert, die einzelnen Ladungen sind in Tabelle 9 angegeben. Dabei zeigt sich, dass vor allem die chemischen Parameter mit den Faktoren korrelieren, wobei die Faktorladungen der mittleren Korngröße und des Eigenwertes E3 meist vernachlässigbar gering sind. Lediglich im Bag 3906 treten mit dem Faktor 2 höhere Ladungen mit Kalzium und der mittleren Korngröße auf, was sich auch mit der im vorherigen Kapitel berechneten Korrelation nach Pearson deckt (Korrelationskoeffizient -0,70).

Auffällig ist beispielsweise, dass im Bag 3356 eine hohe Faktorladung beim Nitrat berechnet wurde. Dies findet sich jedoch nicht in den Korrelationskoeffizienten nach Pearson oder Spearman wieder. Dieser Zusammenhang tritt auch im Bag 3906 bei der Korrelation mit dem ersten Faktor auf. Ferner scheinen die Nitrat-Ionen auch die Leitfähigkeit maßgeblich zu beeinflussen.

Des Weiteren lässt sich im Bag 3876 eine Beziehung zwischen Natrium und Nitrat feststellen, was vermutlich auf einen gleichen Ursprung der Ionen zurückzuführen ist.

Fokus dieser Arbeit ist es jedoch, die mittlere Korngröße und den Eigenwert E3 mit den chemischen Parametern zu korrelieren. Unter diesem Aspekt betrachtet, konnte die Faktorenanalyse im Wesentlichen keine bedeutenden Zusammenhänge aufdecken.

5.6 Fallstudie 3356

Da vor allem im Bag 3356 durchaus einzelne Abschnitte auszumachen sind, in denen sowohl positive als auch negative Korrelationen augenscheinlich möglich sind, wurde hierzu eine Fallstudie angefertigt. Betrachtet man das Linescan-Bild (Abbildung 15), sind die Lagen im Bag 3356 besonders gut unterscheidbar, da sie relativ weit auseinander liegen; außerdem ist die Spurenstoffkonzentration im Vergleich zu den anderen Bags vergleichsweise hoch. Konkret wurde für den Bereich des zweiten Dünnschnittes (1845,34 m bis 1845,43 m) ein Plot erstellt, sowie Korrelationsberechnungen durchgeführt. Die Einstellungen für das Running-Mean-Programm, die entfernten Ausreißer und die Korrelationsmethode entsprechen denen der bereits analysierten Bags. Die minimale Anzahl von Körnern beträgt hier pro Frame 97 Stück.

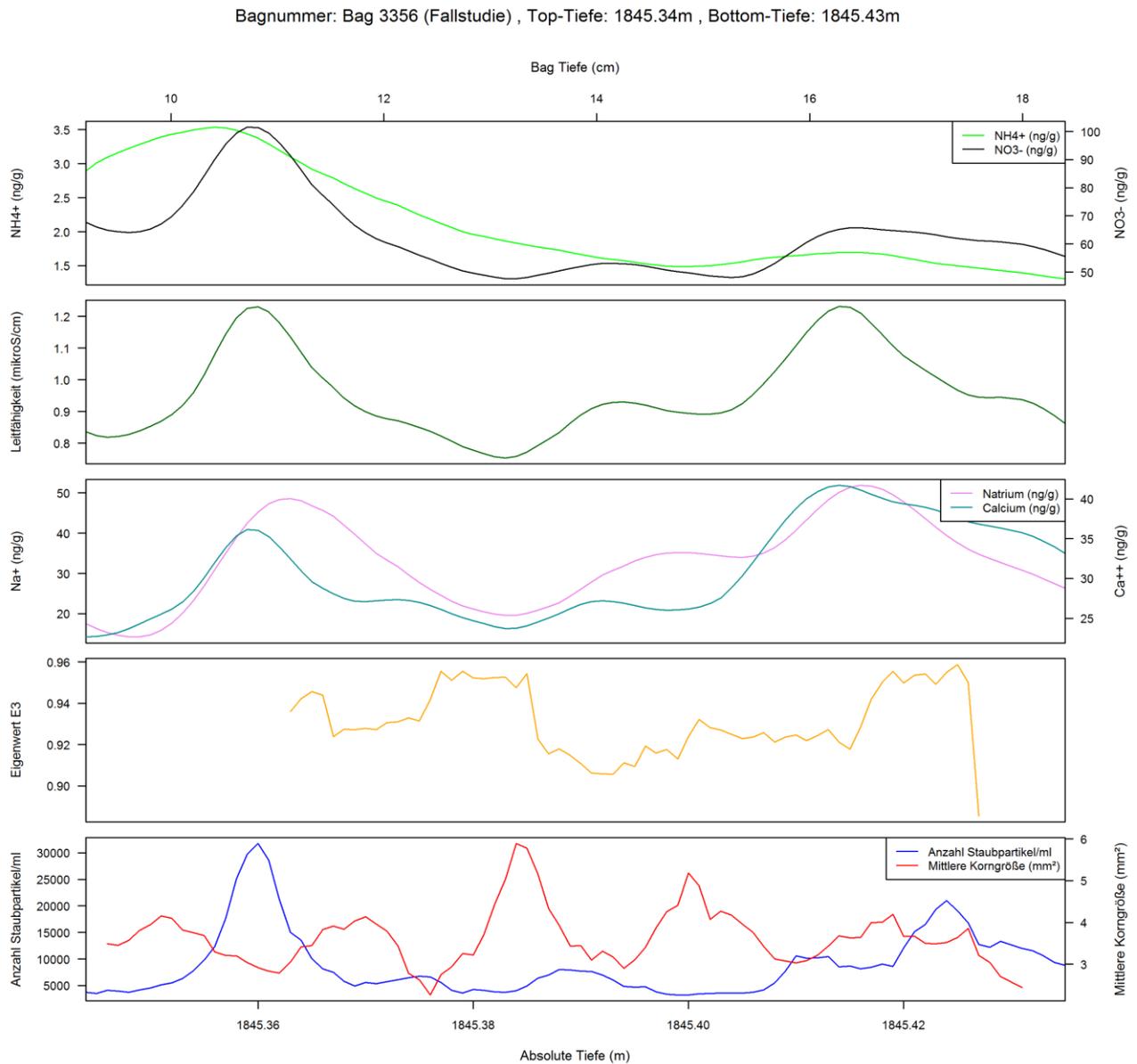


Abb. 22: Der Plot der einzelnen Parameter für einen ausgewählten Abschnitt des Bags 3356 (Fallstudie).

Tab. 10: Korrelationskoeffizienten nach Spearman berechnet für die Fallstudie des Bags 3356 (Dünnschnittnummer 201).

Bag 3356 Fallstudie	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	-0,48	-0,32*	-0,12	-0,31*	-0,07	-0,28*
Eigenwert E3	0,17	-0,12	0,06	0,04	0,30*	0,14

* signifikant bei einem Signifikanzniveau von 95 %

In diesem Stück des Bags 3356 scheinen zumindest die Ionen-Gehalte ähnliche Kurvenverläufe haben. Der Gehalt an Ammonium beträgt im Mittel 2,27 ng/g, Nitrat liegt bei 68,65 ng/g. Kalzium (25,96 ng/g) und Natrium (26,64 ng/g) weisen hier annähernd gleiche Mittelwerte auf. Die Leitfähigkeit schwankt zwischen 0,75 mikroS/cm und 1,23 mikroS/cm.

Der Eigenwert E3 beträgt hier durchschnittlich 0,91. Die Anzahl der Spurenstoffe bewegt sich zwischen 3.215 und 31.741 Partikel pro ml. Die Korngröße für dieses Stück gemittelt liegt bei 3,58 mm².

Betrachtet man die Graphen, scheint es zwischen der Spurenstoffkonzentration und der mittleren Korngröße auf den ersten Blick eine negative Korrelation zu geben. Für die Methode nach Pearson sind hier die Korrelationskoeffizienten des Staubgehaltes, der Leitfähigkeit, des Kalziums sowie des Nitrats mit der mittleren Korngröße signifikant, Natrium ist hier entgegen der Erwartung nicht dabei. Zusätzlich korreliert der Staubgehalt positiv mit dem Eigenwert E3.

Bei der Berechnung nach Spearman erwiesen sich lediglich noch die Korrelationen von Leitfähigkeit, Kalzium und Nitrat mit der mittleren Korngröße als signifikant. Wie auch bei der Methode nach Pearson sind alle Korrelationen negativ. Zusätzlich ist hier noch eine signifikant positive Korrelation zwischen dem Eigenwert E3 und Ammonium aufgetreten.

Da die Korrelationskoeffizienten nur sehr gering sind bzw. annähernd 0 betragen, lässt sich somit auch in den Scatterplots kein eindeutiges Muster erkennen (siehe Abbildung 23).

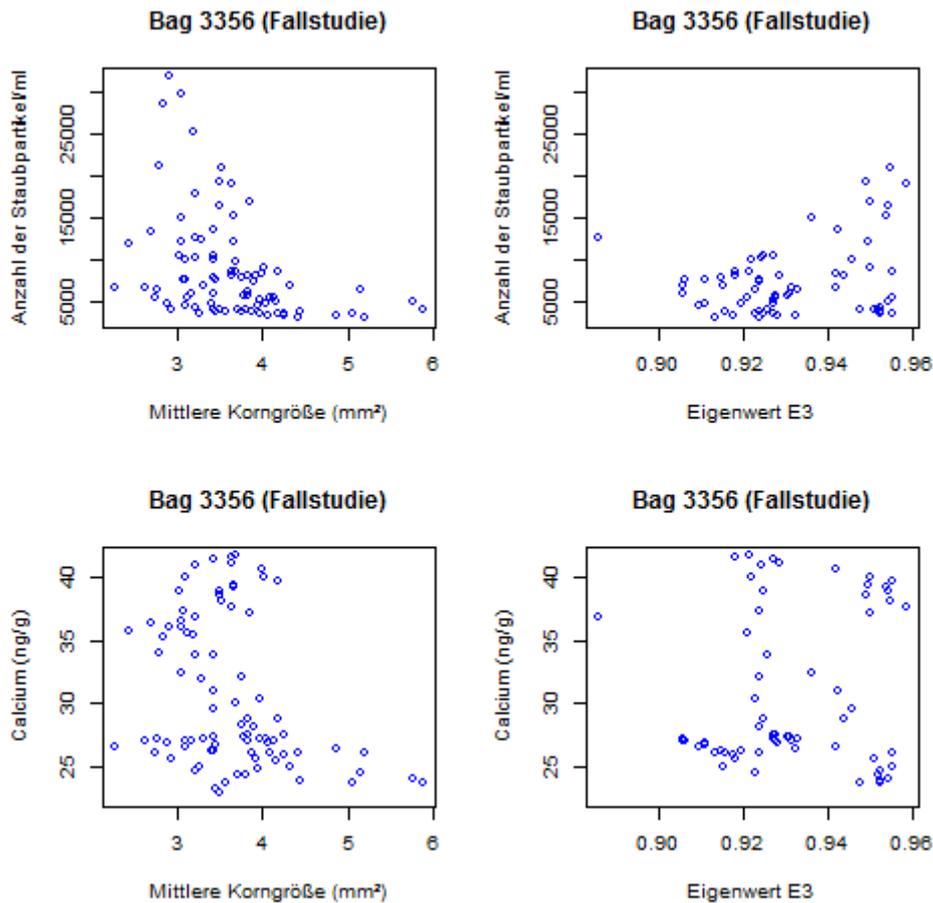


Abb. 23: Ausgewählte Scatterplots für die Fallstudie des Bags 3356.

Insgesamt bietet sich hier ein ähnliches Bild wie bei den anderen Bags. Es treten nicht wesentlich mehr signifikante Korrelationen zwischen den Parametern auf.

Bei der Faktorenanalyse konnten nur bei den chemischen Parametern hohe Faktorladungen berechnet werden, was darauf schließen lässt, dass keine Zusammenhänge mit der mittleren Korngröße bzw. dem Eigenwert E3 bestehen.

Tab. 11: Faktorwerte (rotierte Faktorladungen) für die Fallstudie des Bags 3356.

Bag 3356 (Fallstudie)	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
Leitfähigkeit	0,96	0,272	-0,01
Natrium	0,89	-0,04	-0,09
Kalzium	0,91	-0,16	0,08
Anzahl der Spuren- stoffe	0,64	0,20	0,74
Ammonium	-0,14	0,97	0,17
Nitrat	0,47	0,78	0,37
mittlere Korngröße	-0,32	-0,15	-0,21
Eigenwert E3	-0,10	0,12	0,45

Aufgrund dessen wurden auch für die anderen Abschnitte des Bags 3356 einzeln Korrelationsberechnungen durchgeführt (siehe Anhang). Auffällig war hier, dass fast alle Abschnitte signifikante (negative) Korrelationen zwischen der mittleren Korngröße und Ammonium aufwiesen, während Natrium fast vollständig in den Hintergrund tritt. Dies könnte vor allem auf eine fehlerhafte Tiefenzuordnung hindeuten, was im folgenden Kapitel ausführlicher erläutert wird.

6 Diskussion

Im Allgemeinen wurden für den Bag 3356 die höchsten Korrelationskoeffizienten erwartet, da sich die Bereiche hoher Spurenstoffkonzentrationen sehr deutlich von den Bereichen geringerer Konzentration unterscheiden. Auch sind die Schichten größtenteils gerade, was sich günstig auf die statistische Analyse auswirkt. Werden jedoch die Korrelationskoeffizienten be-

trachtet, die nach der Methode nach Spearman berechnet wurden, fällt auf, dass lediglich zwischen der mittleren Korngröße und dem Gehalt an Natrium-Ionen eine signifikante (negative) Korrelation auftritt. Es liegt hier die Vermutung nahe, dass die Tiefenzuordnung nicht korrekt ist.

Für die Bags 3876 und 3906 scheinen die schräge Lage der Schichten eine der Hauptfehlerquellen zu sein. Bei der Messung bzw. der Berechnung der Statistik werden die Bilder millimeterweise analysiert. Weisen die Schichten aber nun eine starke Schräglage auf, kommen in den Bereichen von 1 mm aber bereits mehrere Schichten vor, was einen starken Einfluss auf die Korrelationskoeffizienten haben dürfte. Auch bei dem Bag 4006 entsprechen die positiven Korrelationen nicht den Erwartungen, sodass hier ebenfalls durch den Schnittplan bedingte Fehler oder eine nicht korrekte Tiefenzuordnung die Ursachen sein können.

Generell wurden wesentlich weniger signifikante Korrelationen festgestellt als erwartet. Da aber bei der Korngröße und dem Staubgehalt bei genauerer Betrachtung des Kerns zumindest augenscheinlich Korrelationen auftreten (kleine Körner gehen mit hohem Staubgehalt einher), sollen im Folgenden mögliche Fehlerquellen diskutiert werden. Des Weiteren wird versucht, mit leicht abgewandelten Methoden diese Fehler zu minimieren.

6.1 Lücken in den Datensätzen

Zunächst einmal können die Lücken in den Datensätzen die Ergebnisse beeinflussen.

Einerseits wurden natürlich durch das Entfernen der Ausreißer aus den RunningMean-Datensätzen Lücken geschaffen, andererseits waren solche aber auch schon vorhanden, beispielsweise durch den Verschnitt beim Sägen des Kerns und durch das Säubern der Enden vor der CFA-Analyse. Zusätzlich trat im Bag 3356 ein Bruch auf. Da die Bruchkante meist relativ schräg verläuft, muss hier beim Säubern umso mehr Material abgetragen werden, um eine gerade Fläche zu schaffen, damit der Kern bei der CFA-Analyse nicht in der Schiene stecken bleibt. Dies führt zu einer zusätzlichen Vergrößerung der Lücke. Bleibt der Kern dennoch stecken, kann dies ebenfalls zu Messfehlern führen, da dann mitunter Luft in die Geräte gelangen kann. Das wäre z. B. eine mögliche Ursache für die kleinen Lücken in den Daten von Ammonium in den Bags 3876 und 3906. Ebenso können undichte Schläuche für Luftblasen im Schmelzwasser sorgen. Durch die fehlenden Daten kommen dementsprechend weniger Wertepaare für die Korrelationsberechnung in Frage, was sich auf die Signifikanz der statistischen Berechnungen auswirkt.

6.2 Schnittplan

Eine weitere Ursache für die niedrigen Korrelationskoeffizienten könnte mit dem Sägen des Kerns bzw. mit dem Schnittplan zusammenhängen. Da die Messgeräte für die chemischen und physikalischen Parameter verschieden große Eisstücke erfordern, handelt es sich bei den gemessenen Proben nie um die gleichen Stücke.

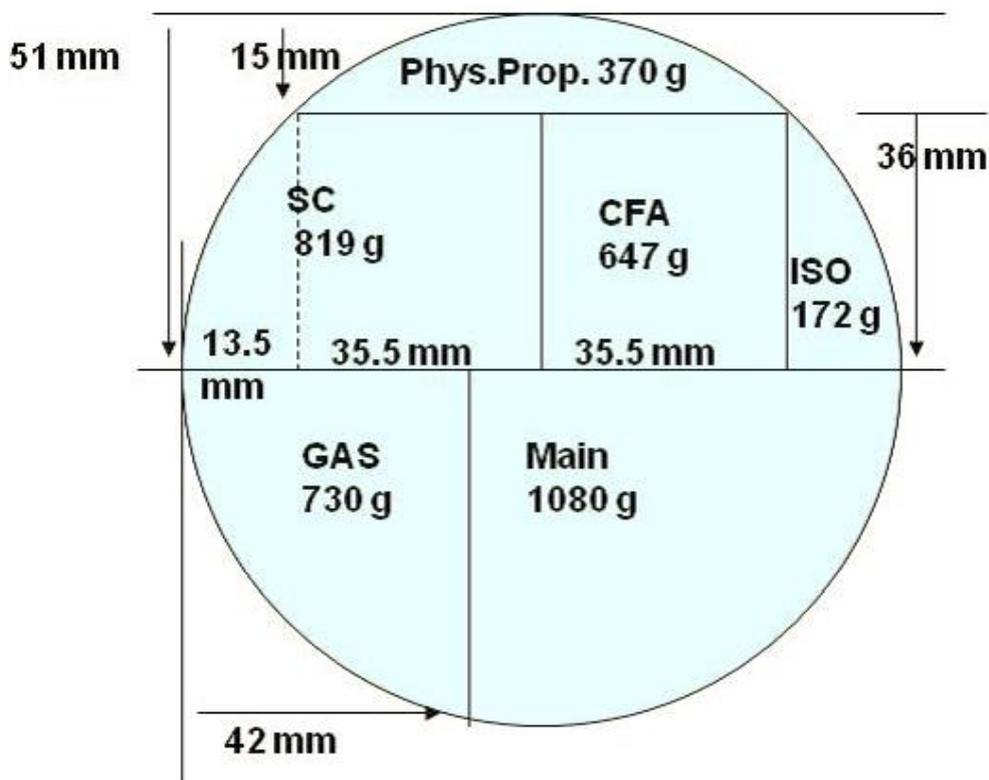


Abb. 24: Schnittplan für ein Eiskernstück (NEEM Field Season (2010: 13)).

Der Kern hat insgesamt einen Durchmesser von ca. 10 cm. Um so viele Informationen wie möglich aus diesem Eisstück zu bekommen, wird der Kern nach einem Schnittplan (Abbildung 24) aufgeteilt.

Die Probe für die Mikrostrukturanalyse stammt aus dem Randbereich des Kerns und ist demzufolge schmäler als der Kerndurchmesser (Abbildung 24: Phys.Prop. 370g). Die Dünnschnitte, die für die Messung der mittleren Korngröße und der c-Achsenorientierung benötigt werden, messen bei einer Dicke von ungefähr 300 μm ca. 9 cm*7 cm. Länge und Breite können variieren, da beispielsweise bei großen Unebenheiten oder Verunreinigungen auf der Oberflä-

che öfter mikrotomiert werden muss. Das Stück, welches bei der CFA-Messung verwendet wird, hat annähernd die Maße 100 cm*3,5 cm*3,5 cm. Es ist also wesentlich schmaler, sodass die Messwerte demzufolge auch nur einen kleineren Bereich repräsentieren (Abbildung 24: CFA 647g). Um eine Dekontaminierung zu vermeiden, wird hier außerdem nur das Schmelzwasser für die Messung verwendet, welches sich im inneren Ring des Schmelzkopfes sammelt, was den Bereich noch weiter dezimiert. Die beiden verwendeten Stücke liegen zwar im Kern nebeneinander, dennoch können sich die Messwerte auch in dem kleinen Bereich beträchtlich ändern bzw. gänzlich andere Bedingungen widerspiegeln, wenn beispielsweise Faltungen oder Verwerfungen in der Struktur des Eises existieren. Dies würde sich dann in einer geringen Anzahl signifikanter Korrelationen zeigen.

Leider ist es technisch noch nicht möglich, die beiden Verfahren zu kombinieren.

6.3 Tiefenzuordnung

Die größeren Probleme scheint es jedoch bei der Tiefenzuordnung zu geben. Da die Daten in einer Auflösung von 1 mm vorliegen, können schon kleine Verschiebungen das Ergebnis maßgeblich beeinflussen.

Als Fehlerquelle kommt hier zum einen die Tiefenberechnung beim CFA in Frage. Die Berechnung erfolgt unter anderem über die Schmelzgeschwindigkeit, die jedoch teilweise kleinen Schwankungen unterliegt. Die Schmelzgeschwindigkeit beträgt im Mittel 3,05 cm/min, schwankt aber im Verlauf zwischen 1,71 und 5,37 cm/min.

Des Weiteren gibt es den bereits erwähnten Verschnitt in den RunningMean-Daten. Insgesamt fehlen gegenüber den CFA-Daten zehn Werte. Einerseits treten beim Sägen pro Dünnschnitt ca. 2-3 mm Verschnitt auf, andererseits können die fehlenden Werte auf Ungenauigkeiten der RunningMean-Methode zurückgeführt werden. Um die Daten in R plotten und korrelieren zu können, müssen jedoch beide Datensätze gleich viele Werte enthalten, sodass jeweils an den Grenzen der Dünnschnitte NaN's eingesetzt wurden. Hier trat das Problem auf, dass für die zehn NaN's nach dem Aneinanderreihen der Dünnschnitte sieben Positionen möglich waren, wobei hier versucht wurde, sie möglichst gleichmäßig zu verteilen.

Ob diese als NaN's eingesetzten „Daten“ wirklich, wie angenommen, gleichmäßig verteilt sind, bleibt fraglich. Es wäre unter anderem denkbar, dass jeweils an den Enden oder auch im Bereich des Bruches im Bag 3356 durch das Sägen etwas mehr Material fehlt.

Insgesamt kann mit einer Verschiebung der Tiefenachse von mehr als 1cm gerechnet werden. Die 10 fehlenden Werte im RunningMean-Datensatz entsprechen 1 cm (da die Daten mit einer Auflösung von 1 mm vorliegen); zusätzlich müssen Fehler in der Tiefenzuordnung bei der CFA-Messung sowie die verschiedenen Stücke (siehe Schnittplan Abbildung 24) in Betracht gezogen werden.

Um den Einfluss einer fehlerhaften Tiefenzuordnung abschätzen zu können, wurde eine Kreuzkorrelation durchgeführt, bei der die Datensätze in 1 mm-Schritten gegeneinander verschoben wurden.

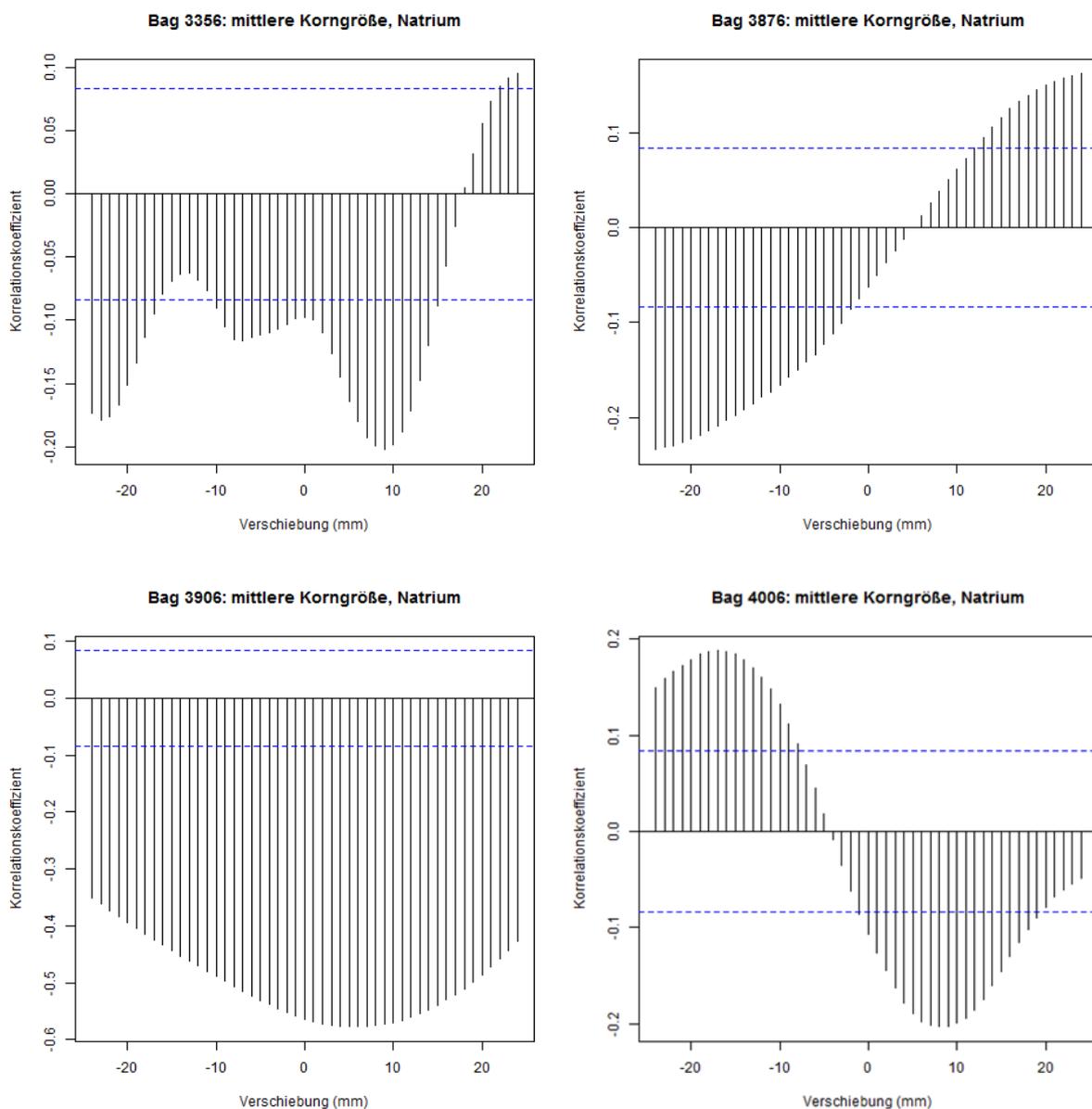


Abb. 25: Ausgewählte Beispiele für die Plot der Kreuzkorrelation der mittleren Korngröße und Natrium.

Beispielhaft werden hier die Plots der Kreuzkorrelation der mittleren Korngröße mit Natrium dargestellt, die übrigen sind im Anhang einzusehen.

Nach den Korrelationsberechnungen traten bei Natrium, bei der Leitfähigkeit sowie beim Nitrat die meisten signifikanten Korrelationen auf. Zwar kann die Kreuzkorrelation in R nur nach der Pearson-Methode durchgeführt werden, dennoch müsste sich bei korrelierenden Parametern eine ähnliche Frequenz in der Höhe der Korrelationskoeffizienten zeigen. Das hier gezeigte Beispiel macht deutlich, dass dies nicht immer so ist. Des Weiteren müssten zumindest innerhalb eines Bags die höchsten Korrelationskoeffizienten bei der gleichen Verschiebung auftreten, doch auch das ist nicht immer der Fall.

Ein gutes Beispiel ist die Korrelation zwischen der mittleren Korngröße und Natrium im Bag 4006; hier beträgt die Verschiebung für den maximalen Korrelationskoeffizienten ca. 8 mm. Dies scheint ein realistischer Wert zu sein, zumal diese Verschiebung auch in Kreuzkorrelationen mit anderen Spurenstoffen zu beobachten ist. Teilweise treten aber auch Verschiebungen von knapp 2 cm auf; da in den meisten Fällen jedoch zusätzlich keine regelmäßigen Frequenzen vorliegen, wird diesen Plots keine weitere Bedeutung zugemessen.

Bei der Fallstudie fällt bei den Korrelationen mit der mittleren Korngröße auf, dass oftmals gar keine oder nur eine sehr geringe Verschiebung (ca. 1 mm) nötig ist, um maximale Korrelationskoeffizienten zu erreichen. Dies macht deutlich, dass hier abgesehen von der Tiefenordnung mehrere Fehlerquellen die Ergebnisse beeinflussen.

6.4 Schichtung

Eine weitere Fehlerquelle könnte die durch die Deformation entstandene Schräglage der einzelnen Schichten sein. Bei den Messungen wird der Kern von den Geräten bzw. bei der statistischen Auswertung aber exakt in Linien senkrecht zur Kernachse analysiert, d.h. es können also auf einer Linie mehrere Schichten auftreten. Um diesen Effekt zu minimieren, wurden mittels RunningMean-Programm die Ränder des zu analysierenden Bereiches bei einem erneuten Durchlauf so eingestellt, dass nur die Daten für ein 3cm breites und 55cm langes Stück des Kerns berechnet wurden. Dies entspricht auch der Breite eines Stückes, welches für die CFA-Messung verwendet wird, sodass es durchaus zu einer Verbesserung der Korrelationsergebnisse führen kann.

Da der Einfluss der Ausreißer durch die abgeschnittenen Ränder hier wesentlich geringer war, wurden nur die Ausreißer der Eigenwerte nach bewährter Methode entfernt.

Es stellte sich jedoch heraus, dass nach dieser Berechnung sogar noch weniger signifikante Korrelationen auftraten (siehe Anhang). Das lässt entweder darauf schließen, dass der Effekt der Schrägschichtung vernachlässigbar gering ist oder dass die Schichtung derart fein ist und demzufolge mit den bisherigen Mess- und Analysemethoden nicht korrekt nachgewiesen werden kann. Es ist auch möglich, dass die Schrägschichtung in einer anderen Ebene liegt und die Mikrostrukturprobe somit eine andere Lage zeigt als die Daten aus der CFA.

6.5 Einfluss der Spurenstoffe

Des Weiteren gibt es in Verbindung mit der Korngröße die Theorie, dass die Spurenstoffe das Wandern der Korngrenzen verlangsamen, sofern es den Korngrenzen nicht gelingt, den *pinning*-Effekt zu überwinden (ALLEY ET AL. (1986)). Das bedeutet, dass somit auch das Wachstum der Körner gehemmt wird und demzufolge auch die Bildung neuer Körner mit günstiger Orientierung für das Gleiten der basalen Ebenen. Wäre der Einfluss der Spurenstoffe groß genug, würde dies also dazu führen, dass die c-Achsen weniger gut eingeregelt wären. Dies ist aber in den hier behandelten Kernstücken nicht der Fall: die Trendbilder (siehe Anhang) der Dünnschnitte zeigen ein relativ gleichmäßig rotes und somit gut eingeregelt „Muster“, welches demzufolge durch Deformation entstanden sein muss.

Ein weiterer Aspekt ist die Lage der Spurenstoffe im Eis: wenn z. B. der Großteil der Stoffe im Kristallgitter eingebaut wurde, können die Stoffe nur wesentlich schwerer nachgewiesen werden. Abgesehen davon können nur sehr kleine Ionen eingebaut werden und es ist unwahrscheinlich, dass diese dann auf die Orientierung des gesamten Korns Einfluss nehmen können (PATERSON (1994)).

Es sollte eventuell zwischen löslichen und unlöslichen Komponenten unterschieden werden: während lösliche Spurenstoffe meist in Ionenform vorliegen (und somit eher klein sind), können unlösliche Staubpartikel auch im Bereich der Korngrenzen zu einer gewissen Spannung im System führen (ALLEY ET AL. (1986)). Dies könnte wiederum die Bildung von Subkorngrenzen beeinflussen. Spaltet sich ein Teil des Korns dann letztlich ab bzw. wird durch eine Korngrenze getrennt, könnte dieses Korn mitunter auch eine günstigere Orientierung in Bezug auf den Partikel aufweisen und somit die Spannung reduzieren. Um diesen Einfluss statistisch zu erfassen, ist die Zahl und Größe der Partikel aber wohl zu gering.

Zudem ist zu bedenken, dass die hier verwendeten Proben aus dem letzten Glazial stammen. Wie bereits erwähnt, sind die Spurenstoff bzw. Staubgehalte in Kaltzeiten generell höher (FI-

SCHER ET AL. (2007); STEFFENSEN (1997)), sodass ein Einfluss unwahrscheinlich ist. Die Frequenzen der Korrelationskoeffizienten bei der Kreuzkorrelation unterstützen dieses Ergebnis. Dennoch wäre es beispielsweise ein Ansatz, mehrdimensionale Korrelationen zu berechnen, um den Einfluss anderer Komponenten einbeziehen zu können. In Frage kämen unter anderem weitere, chemische Parameter, wie z. B. Chlorid-Ionen als zusätzliche Vertreter des Meersalzes oder Sulfat oder aber auch die Anzahl der Körner.

Im Allgemeinen zeigt diese Arbeit jedoch, dass Korrelationen der mittleren Korngröße mit den chemischen Parametern durchaus vorhanden sind, wobei hier der Einfluss der Fehlerquellen stark ist und somit Korrelationen verdeckt werden könnten.

Dennoch ist abzuwägen, ob Korrelationsberechnungen hier die angemessene Methode darstellen, da die Zusammenhänge zwischen Korngröße, c-Achsenorientierung und Spurenstoffen bzw. die Fehlerquellen sehr komplex sind.

Nichtsdestotrotz erscheint es lohnenswert, die Beziehungen zwischen Natrium bzw. Nitrat und der Korngröße weiterzuverfolgen. Üblicherweise steht bei Berechnungen dieser Art das Kalzium im Vordergrund, hier jedoch zeigte es kaum nennenswerte Korrelationen, während Natrium und Nitrat trotz der Fehlerquellen signifikante Korrelationen aufwiesen.

Bis dato wurde in anderen Eiskernen in erster Linie Kalzium mit der mittleren Korngröße bzw. der Wachstumsrate der Körner korreliert; es steht die Theorie dahinter, man könne die Korngrößen als „Paläothermometer“ nutzen (PETIT ET AL. (1987)), wobei in den Kaltzeiten kleinere Körner auftreten, da die obersten Schneeschichten nicht antauen und die Kristalle demzufolge nicht so stark zu großen Körnern verschmelzen und da durch den erhöhten Spurenstoffeintrag (hauptsächlich Staub und somit auch Calcium) das Wachstum der Körner gehemmt ist.

Vor allem das Natrium könnte diese Theorie unterstützen: wie bereits im Kapitel 2.4.2 erläutert, wird es über die Gischt des Meeres durch den Wind nach Grönland getragen (FISCHER ET AL. (2007)). Des Weiteren handelt es sich um ein Signal, welches im Winter bzw. zeitigem Frühjahr noch vor dem Kalzium ein Maximum aufweist, da die Stürme im Winter erheblich stärker sind. Zusätzlich können Natrium-Ionen zu kleinen Teilen auch mit dem Staub nach Grönland gelangen (KURAMOTO ET AL. (2001)).

Dies zeigt, dass auch Natrium als Parameter die Korngröße beeinflussen könnte und somit die Theorie der Korngrößen als Temperaturindikatoren stützt.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Eis spielt in der Klimaforschung eine zentrale Rolle: Spurenstoffe, wie Staub und Ionen können Aufschluss über früheren Zirkulationsmuster der Atmosphäre geben, c-Achsenorientierungen verraten etwas über das Fließverhalten und die Bewegungsrichtung von Eiskörpern. Dabei ist es auch denkbar, dass Spurenstoffe im Eis die Korngrößen und Deformationsprozesse sowie die c-Achsenorientierungen beeinflussen.

Ebendiese Zusammenhänge sollten in der vorliegenden Arbeit näher untersucht werden. Dazu wurden vier Kernstücke des in Grönland erbohrten NEEM-Eiskerns aus einer Tiefe von ca. 1845 m bis 2202 m analysiert. Aus CFA-Messungen wurden Datensätze zu den Spurenstoffen entnommen, während die physikalischen Parameter mittels Dünnschnitten gemessen wurden. Hierbei lag der Fokus vor allem auf der mittleren Korngröße und auf dem Eigenwert E3, der repräsentativ für die c-Achsenorientierung einbezogen wurde.

Ziel dieser Arbeit war es, mögliche Zusammenhänge zwischen den Korngrößen sowie c-Achsenorientierungen und den chemischen Parametern im Eis statistisch zu belegen bzw. aufzudecken. Nach dem Entfernen der Ausreißer wurden die Datensätze zunächst mit den Methoden nach Pearson und Spearman korreliert und auf ihre Signifikanz geprüft. Während der Bearbeitung traten diverse mögliche Fehlerquellen in den Vordergrund und es wurde versucht, deren Einfluss mit leicht abgewandelten Methoden zu reduzieren. So wurde beispielsweise eine Kreuzkorrelation berechnet, um Fehler in der Tiefenzuordnung abschätzen und korrigieren zu können. Des Weiteren wurde für die Erstellung der c-Achsen-Statistik nur ein kleinerer Bereich im Inneren der Kernstücke ausgewählt. Dies sollte verhindern, dass die in den Kernen erkennbaren schrägen Schichten die Korrelationsberechnungen zu stark beeinflussen.

Nach Anwendung dieser Methoden konnten dennoch nur relativ wenige signifikante Korrelationen festgestellt werden. Es wird vermutet, dass gerade zwischen der mittleren Korngröße und den Ionengehalten sowie dem Staubgehalt Korrelationen bestehen, da dies bereits in anderen Kernen beobachtet werden konnte. Offensichtlich ist jedoch der Einfluss der Fehlerquellen zu groß, sodass die Korrelationen verdeckt werden. Dass dennoch Korrelationen möglich sind, zeigen die Beispiele von Natrium und Nitrat, die in fast allen Bags zumindest schwache Korrelationen aufweisen. Somit können diese Ionen zusätzlich zum Kalzium in künftige Untersuchungen im Zusammenhang mit der Korngröße miteinbezogen werden.

Signifikante Korrelationen zum Eigenwert E3 konnten nur vereinzelt nachgewiesen werden, es wird also darauf geschlossen, dass kein Zusammenhang zwischen der

c-Achsenorientierung und den Spurenstoffen besteht bzw. dass er mit den hier verwendeten Methoden und dem derzeitigen technischen Stand nicht nachgewiesen werden kann.

Um also weitere Beziehungen zwischen den physikalischen und chemischen Parametern aufzeigen zu können, bedarf es zunächst methodischer Verbesserungen und Weiterentwicklungen.

8 Literaturverzeichnis

ALLEY, R. B.; PEREPEZKO, J. H.; BENTLEY, C. R. (1986): Grain growth in polar ice: I. Theory. - Journal of Glaciology, 32: 415-425

ALLEY, R. B. (1992): Flow-law hypothesis for ice-sheet modeling. - Journal of Glaciology 38: 245-256

ALLEY, R. B. & WOODS, G. A. (1996): Impurity influence on normal grain growth in the GISP2 ice core, Greenland. - Journal of Glaciology, 42: 255-260

ARNAUD, L.; GAY, M.; BARNOLA, J.-M.; DUVAL, P. (2000): Physical modeling of the densification of snow/firn and ice in the upper part of Polar ice sheets. – In: HONDOH, T. (ed.): Physics of Ice Core Records: 263-268, Hokkaido University Press

BARRIE, L. A. (1985): Atmospheric particles: Their physical and chemical characteristics and deposition processes relevant to the chemical composition of glaciers. - Annals of Glaciology, 7: 100-108

BLACKFORD, J. R. (2007): Sintering and Microstructure of ice: a review. - Journal of Physics D: Applied Physics, 40: R355-R385. DOI:10.1088/0022-3727/40/21/R02

BORY, A. J.-M.; P. E. BISCAYE; A. M. PIOTROWSKI ET AL. (2003): Regional variability of ice core dust composition and provenance in Greenland. - Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 4, 1107, DOI:10.1029/2003GC000627, 12

BURT, J. E.; BARBER, G. M. (1996): Elementary Statistics for Geographers, 2.Ausgabe. - 383-412; New York (The Guilford Press)

CUFFEY, K. M. & PATERSON, W. S. B. (2010): The Physics of Glaciers, 4. Ausgabe. - 11-27; Elsevier

DAVIDSON, I. C.; BERING, M.H.; KUHNS, H. D. (1996): The deposition of particles and gases to ice sheets. - In: BALES, R.C. (ed.): Chemical exchange between the atmosphere and polar snow, NATO ASI Series I, 43: 275-306; Springer-Verlag Berlin Heidelberg

DUVAL, P. & MONTAGNAT, M. (2000): Rate controlling processes in the creep of polar ice, influence of grain boundary migration associated with recrystallization. - Earth and Planetary Science Letters, 183: 179-186

DUVAL, P. & CASTELNAU, O. (1995): Dynamic Recrystallization of Ice in Polar Ice Sheets. - Journal de Physique IV, 5: 197-205

EICHLER, J. (2013): C-Axis Analysis of the NEEM ice core. An approach based on digital image processing. - 12-53; Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven

EISEN, O. (2007): Direct evidence for continuous radar reflector originating from changes in crystal-orientation fabric. - The Cryosphere, 1: 1-10

FARIA, S. H.; FREITAG, J., KIPFSTUHL, S. (2010): Polar ice structure and the integrity of ice-core paleoclimate records. - Quaternary Science Reviews, 29: 338-351

FISCHER, H.; WAGENBACH, D. (1996): Large-scale spatial trends in recent firn chemistry along an east-west transect through central Greenland. - Atmospheric Environment, 30: 3227-3238

FISCHER, H. (1998); Wagenbach, D.; Kipfstuhl, J.: Sulfate and nitrate firn concentrations on the Greenland ice sheet, 1. Large-scale geographical deposition changes. - Journal of Geophysical Research, 103: 21,927-21,934

FISCHER, H. (2001): Imprint of large-scale atmospheric transport patterns on sea-salt records in northern Greenland ice cores. - Journal of Geophysical Research, 106: 1-8

FISCHER, H.; SIGGAARD-ANDERSEN, M.-L.; RUTH, U. ET AL. (2007): Glacial/Interglacial changes in mineral dust and sea-salt records in polar ice cores: sources, transport, and deposition. – Reviews of Geophysics, 45: RG1002

FOSSEN, H. (2011): Structural Geology, 3. Auflage. – 203-216; Cambridge (Cambridge University Press)

HOOKE, R. LEB. (1998): Principles of Glacier Mechanics. - 13-64; Upper Saddle River/New Jersey (Prentice Hall)

HÖRHOLD, M. W.; LAEPPELE, T.; FREITAG, J. ET AL. (2012): On the impact of impurities on the densification of polar firn. - Earth and Planetary Science Letters 325-326: 93-99

HUA, L. (1999): An integrated wind erosion modeling system with emphasis on dust emission and transport. - 1-49; University of New South Wales (Dissertation)

HUTTERLI, M. A.; CRUEGER, T.; FISCHER, H. ET AL. (2006): The influence of regional circulation patterns on wet and dry mineral dust and sea salt deposition over Greenland. - Climate Dynamics, 28: 635-647

ICE AND CLIMATE GROUP, NBI (2010): Field season 2010. North Greenland Eemian Ice drilling (NEEM 2007-2012): NEEM 2nd season of deep ice core drilling and core processing, 13

JACKA, T. H. & JUN, L. (2000): Flow rates and crystal orientation fabrics in compression of polycrystalline ice at low temperatures and stresses. – In: HONDOH, T. (ed.): Physics of Ice Core Records: 83-102, Hokkaido University Press

KAUFMANN, P. R.; FEDERER, U.; HUTTERLI, M. A. ET AL. (2008): An improved Continuous Flow Analysis System for High-Resolution Field Measurements on Ice Cores. - Environment, Science and Technology, 42: 8044-8050

Kipfstuhl, S.; Hamann, I.; Lambrecht, A. et al. (2006): Microstructure mapping: a new method for imaging deformation-induced microstructural features of ice on the grain scale. – Journal of Glaciology, 52: 398-406

KURAMOTO, T.; GOTO-AZUMA, K.; HIRABAYASHI, M. ET AL. (2011): Seasonal variations of snow chemistry at NEEM, Greenland. - Annals of Glaciology, 52: 193-200

MÜLLER, G. & RAITH, M. (1993): Methoden der Dünnschliffmikroskopie, 4. Auflage. - 37-92; Clausthaler Tektonische Hefte Nr. 14

OHNO, H.; IGARASHI, M.; HONDOH, T. (2005): Salt inclusions in polar ice core: Location and chemical form of water-soluble impurities. - *Earth and Planetary Science Letters*, 232: 171-178

PATERSON, W. S. B. (1994): *The Physics of Glaciers*, 3. Ausgabe. - 8-409; Elsevier

PETERNELL, M.; KOHLMANN, F.; WILSON, C. J. L. ET AL. (2009): A new approach to crystallographic orientation for apatite fission track analysis: Effect of crystal morphology and implications by automation. - *Chemical Geology*, 265: 529-533

PETIT, J. R.; DUVAL, P.; LORUS, C. (1987): Long-term climatic changes indicated by crystal growth in polar ice. – *Nature*, 326: 62-64

PETRENKO, V. F. & WHITWORTH, R. W. (1999): *Physics of Ice*. - 10-222; Oxford (Oxford University Press)

RUTH, U. (2002): Concentration and Size Distribution of Microparticles in the NGRIP Ice Core (Central Greenland) during the Last Glacial Period. - 7-13; Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg (Dissertation)

RUTH, U.; WAGENBACH, D.; BIGLER, M. ET AL. (2002): High-resolution microparticle profiles at NorthGRIP Greenland: case studies of the calcium-dust relationship. – *Annals of Glaciology*, 35: 237-242

RUTH, U.; WAGENBACH, D.; STEFFENSEN, J. P. ET AL. (2003): Continuous record of microparticle concentration and size distribution in the central Greenland NGRIP ice core during the last glacial period. - *Journal of Geophysical Research*, 108: 4098

RUTH, U.; BARBANTE, C.; BIGLER, M. ET AL. (2008): Proxies and Measurement Techniques for Mineral Dust in Antarctic Ice Cores. - *Environment, Science and Technology*, 42: 5675-5681

SCHÖNWIESE, C.-D. (2006): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler, 4.Auflage. - 119-223; Stuttgart (Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung)

SCHULSON, E. M. & DUVAL, P. (2009): Creep and Fracture of Ice. - 15-90, Cambridge (Cambridge University Press)

STEFFENSEN, J. P. (1997): The size distribution of microparticles from selected segments of the Greenland Ice Core Project ice core representing different climate periods. - Journal of Geophysical Research, 102: 26,755-26,763

SURMA, J. (2011): Die Orientierung der C-Achsen im NEEM-Eiskern (Grönland). - 8-15; Institut für Geologie und Mineralogie, Universität zu Köln

SVENSSON, A.; NIELSEN, S. W.; KIPFSTUHL, S. ET AL. (2005): Visual stratigraphy of the North Greenland Ice Core Project (NorthGRIP) ice core during the last glacial period. - Journal of Geophysical Research, 110: D02108

TAMMEN, A. (2012): Mikrostruktur im Eis: Hochaufgelöste Korngrößen- und c-Achsenanalyse im NEEM-Kern (Grönland). - 11-25; Johannes Gutenberg-Universität Mainz

THORSTEINSSON, T.; KIPFSTUHL, J.; EICKEN, H. ET AL. (1995): Crystal size variations in Eemian age ice from the GRIP ice core, Central Greenland. - Earth and Planetary Science Letters, 131: 381-394

THORSTEINSSON, T. (1996): Textures and Fabrics in the GRIP ice core, in relation to climate history and ice deformation. - 17-45; Berichte der Polarforschung: 205, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung Bremerhaven (Dissertation)

WALLBRECHER, E. (1986): Tektonische und Gefügeanalytische Arbeitsweisen. - 140-184; Stuttgart (Ferdinand Enke Verlag)

WEIKUSAT, I.; DE WINTER, D. A. M.; PENNOCK, G. M ET AL. (2010): Cryogenic EBSD on ice: preserving a stable surface in a low pressure SEM. - Journal of Microscopy, 242: 295-310

WEIKUSAT, I.; MIYAMOTO, A.; FARIA, S. H. ET AL. (2011): Subgrain boundaries in Antarctic ice quantified by X-ray Laue diffraction. - Journal of Glaciology, 57: 85-94

WEIBBACH, S. (2011): Saisonaler Eintrag von Spurenstoffen in das grönländische Eis und deren Auswirkung auf die Verdichtung von Firn: Fallstudie an einem ausgewählten Firnkernstück aus Nordgrönland. - 10-18; Technische Universität Bergakademie Freiberg

WILSON, C. J. L.; RUSSEL-HEAD, D. S.; KUNZE, K. ET AL. (2007): The analysis of quartz c-axis fabrics using a modified optical microscope. - Journal of Microscopy, 227: 30-41

Internetquellen

HAIN, J.: Verteilungsanalyse

<http://www.uni->

[wuerzburg.de/fileadmin/10040800/user_upload/hain/R/Verteilungsanalyse.pdf/](http://www.uni-wuerzburg.de/fileadmin/10040800/user_upload/hain/R/Verteilungsanalyse.pdf/)

(Stand: 12.04.2013)

HANDL, ANDREAS: Eine kleine Einführung in R

<http://www.wiwi.uni-bielefeld.de/~frohn/Mitarbeiter/Handl/einfuehrunginr.pdf/>

(Stand: 14.01.2013)

NOACK, M.: Faktorenanalyse

<http://www.uni-due.de/imperia/md/content/soziologie/stein/faktorenanalyse.pdf/>

(Stand: 31.05.2013)

http://neem.dk/about_neem/ (Stand: 10.04.2013)

KIPFSTUHL, J. (2010): Visual Stratigraphy of the NEEM ice core with a line scanner, Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, unveröffentlichter Datensatz #743062 (Stand: 04.03.2013)

WEIKUSAT, I.; KIPFSTUHL, J. (2010): Crystal c-axes (fabric) of ice core samples collected from the NEEM ice core, Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, unveröffentlichter Datensatz #744004 (Stand: 04.03.2013)

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Die Kristallstruktur von Eis Ih (SCHULSON & DUVAL (2006: Fig. 2.3)).....	9
Abb. 2: Die Verdichtung von Schnee zu Eis (BLACKFORD (2007: 12); ursprünglich aus ARNAUD ET AL. (2000: Fig. 4)).....	10
Abb. 3: Schweres und leichtes Gleiten in monokristallinem Eis (THORSTEINSSON(1995: Fig. 2.12)).	12
Abb. 4: Dislokationen im Eis (HOOKE (1995: Fig. 4.3)).....	13
Abb. 5: Die c-Achsenverteilung in einer Eisscheide (nach ALLEY (1992: Fig. 2.22))	15
Abb. 6: Schematische Darstellung der Transportmechanismen (RUTH (2002: Fig 2.1), ursprünglich aus HUA (1999: Fig. 1.1)).	17
Abb. 7: Saisonalität der Leitfähigkeit sowie Spurenstoffkonzentrationen (KURAMOTOT ET AL. (2011: 4)).....	19
Abb. 8: Lokation der NEEM-Bohrung (http://neem.dk/about_neem/).....	22
Abb. 9: Mikrotom.....	23
Abb. 10: Dünnschnitt und Trendlegende (WEIKUSAT & KIPFSTUHL (2010)).	25
Abb. 11: CFA	26
Abb. 12: Plot des vorläufiges Ergebnisses	34
Abb. 13: Total Area.....	35
Abb. 14: Trend-Bilder für den Bag 3906 (WEIKUSAT & KIPFSTUHL (2010))	36
Abb. 15: Linescan-Plot (Linescan-Bilder aus KIPFSTUHL 2010).	37
Abb. 16: Bag 3356.	39
Abb. 17: Bag 3876.	41
Abb. 18: Bag 3906.	43
Abb. 19: Bag 4006.	45
Abb. 20: Die Scatterplots der Korrelation mit der mittleren Korngröße für den Bag 3876.....	47
Abb. 21: Die Scatterplots der Korrelation mit dem Eigenwert E3 für den Bag 3876.....	49
Abb. 22: Bags 3356 (Fallstudie).	54
Abb. 23: Scatterplots für die Fallstudie des Bags 3356.	56
Abb. 24: Schnittplan für ein Eiskernstück (NEEM Field Season (2010: 13)).	59
Abb. 25: Kreuzkorrelation.....	61

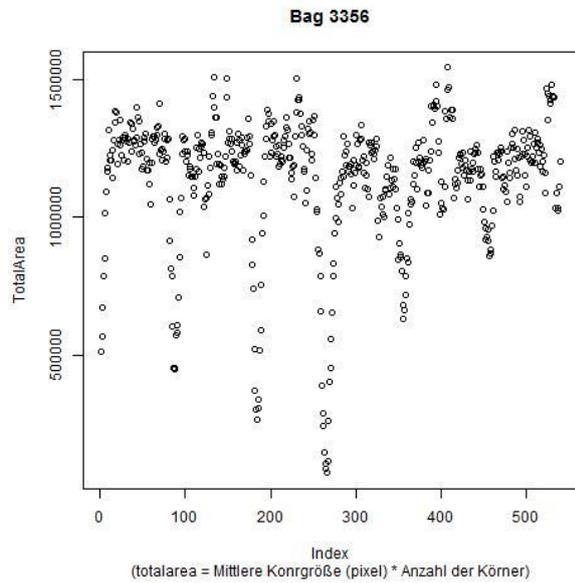
Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Korrelationskoeffizienten nach Spearman für den Bag 3356	39
Tab. 2: Korrelationskoeffizienten nach Spearman für den Bag 3876	41
Tab. 3: Korrelationskoeffizienten nach Spearman für den Bag 3906	43
Tab. 4: Korrelationskoeffizienten nach Spearman für den Bag 4006	45
Tab. 5: Korrelationskoeffizienten der mittleren Korngröße nach Pearson	48
Tab. 6: Korrelationskoeffizienten der mittleren Korngröße nach Spearman	48
Tab. 7: Korrelationskoeffizienten des Eigenwertes E3 nach Pearson.....	50
Tab. 8: Korrelationskoeffizienten des Eigenwertes E3 nach Spearman	50
Tab. 9: Faktorwerte des Bags 3356.....	52
Tab. 10: Korrelationskoeffizienten nach Spearman für die Fallstudie des Bags 3356	54
Tab. 11: Faktorwerte für die Fallstudie des Bags 3356.....	57

10 Anhang

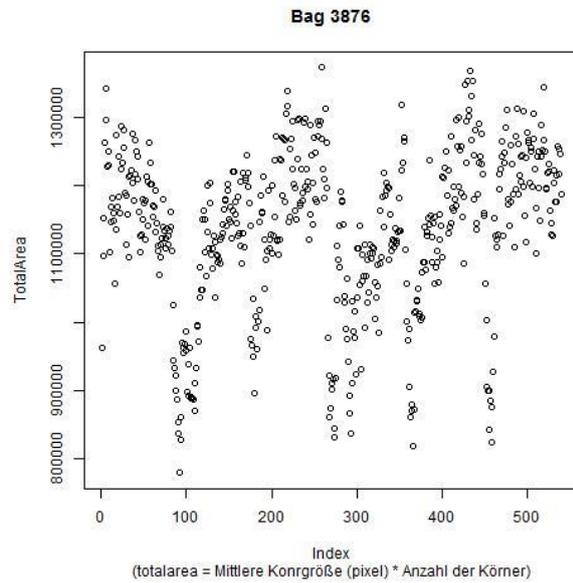
10.1 Plots der Total Area

Test auf Vorhandensein der Ausreißer mittels *Total Area*:



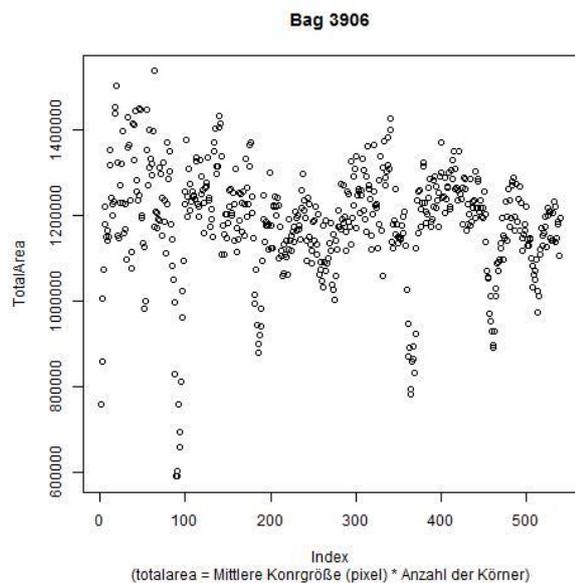
Grenze, unterhalb derer die Ausreißer der mittleren Korngröße entfernt wurden:

900.000 Pixel



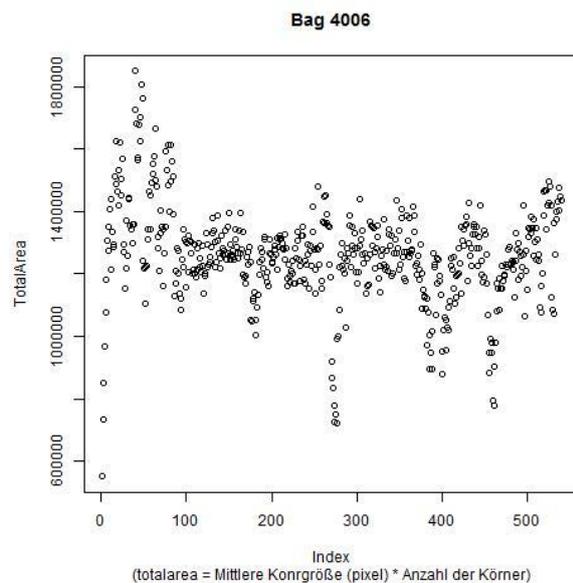
Grenze, unterhalb derer die Ausreißer der mittleren Korngröße entfernt wurden:

950.000 Pixel



Grenze, unterhalb derer die Ausreißer der mittleren Korngröße entfernt wurden:

950.000 Pixel



Grenze, unterhalb derer die Ausreißer der mittleren Korngröße entfernt wurden:

1.000.000 Pixel

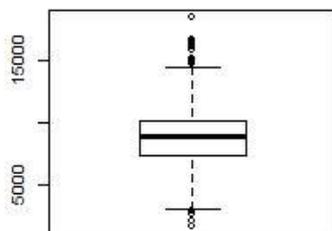
10.2 Tests auf Normalverteilung

Test der Verteilung mittels Shapiro-Wilk-Test. Angegeben sind jeweils die p-Werte für die mittlere Korngröße und den Eigenwert E3:

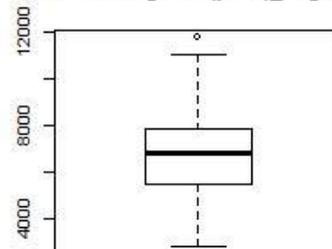
Mittlere Korngröße	Eigenwert E3
$0,12 \cdot 10^{-3}$	$0,12 \cdot 10^{-32}$
$0,62 \cdot 10^{-3}$	$0,29 \cdot 10^{-17}$
$0,46 \cdot 10^{-7}$	$0,16 \cdot 10^{-24}$
$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,22 \cdot 10^{-23}$

Test der Verteilung mittels Boxplot und Histogrammen:

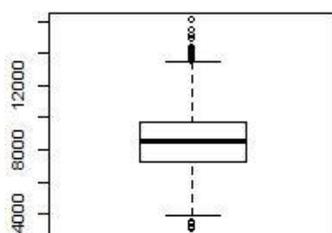
Mittlere Korngröße (pixel)_Bag 3356



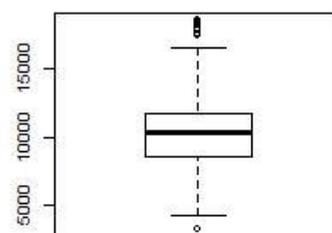
Mittlere Korngröße (pixel)_Bag 3876

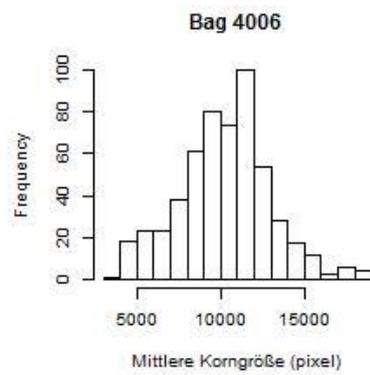
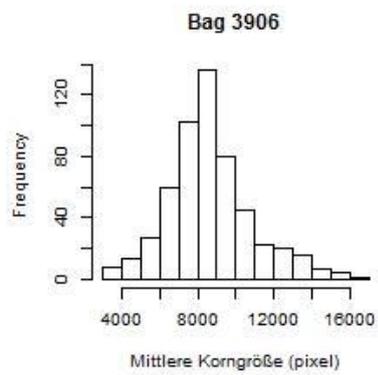
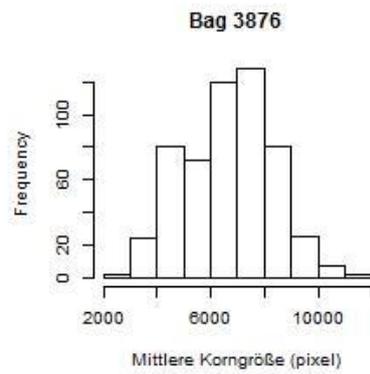
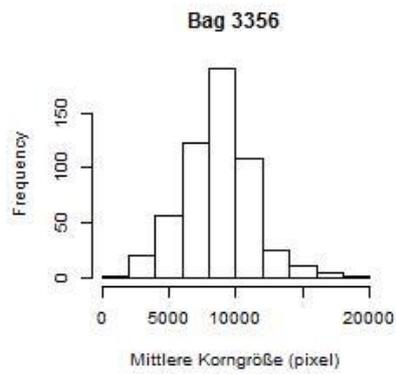
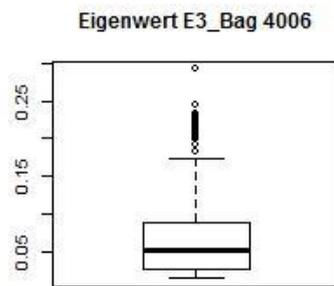
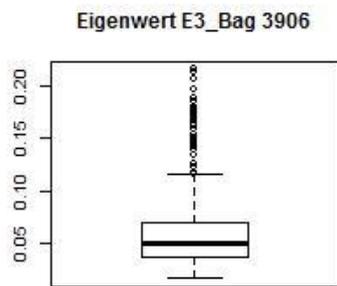
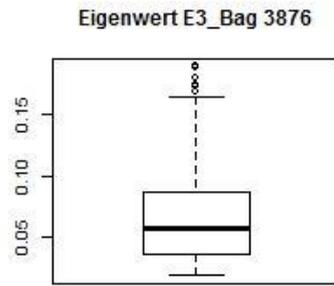
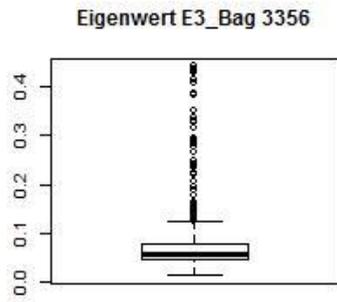


Mittlere Korngröße (pixel)_Bag 3906

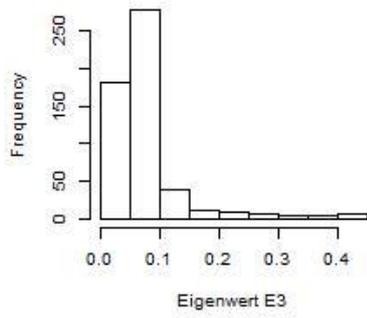


Mittlere Korngröße (pixel)_Bag 4006

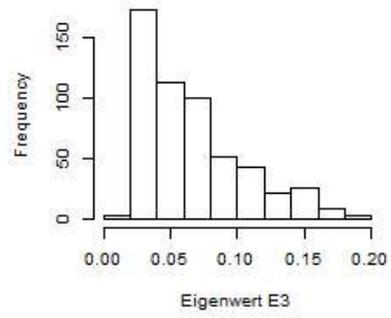




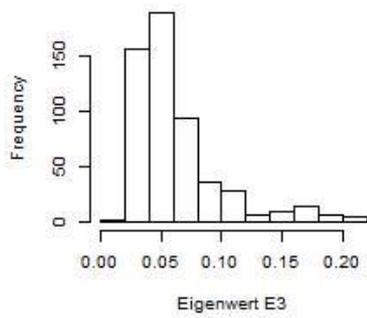
Bag 3356



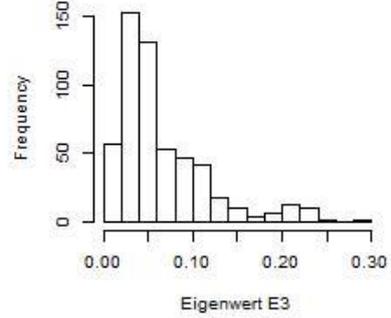
Bag 3876



Bag 3906

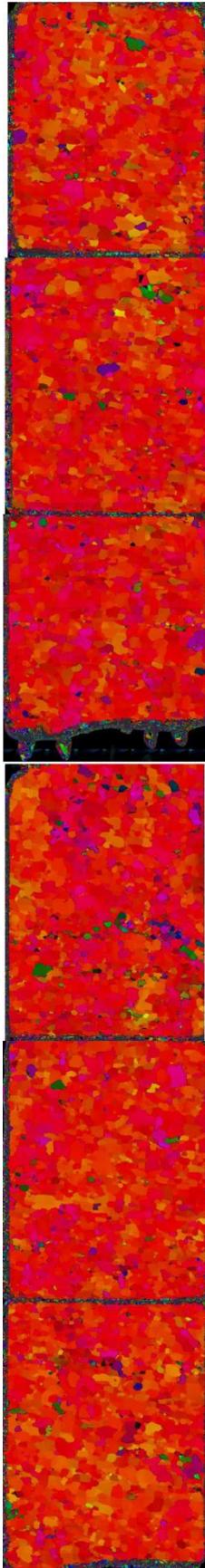


Bag 4006

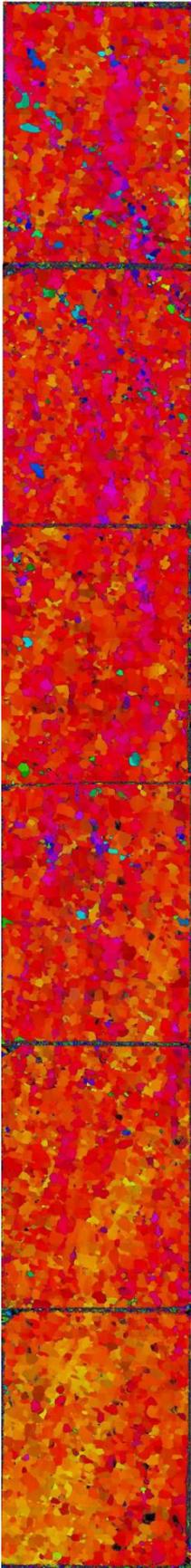


10.3 Trend-Bilder

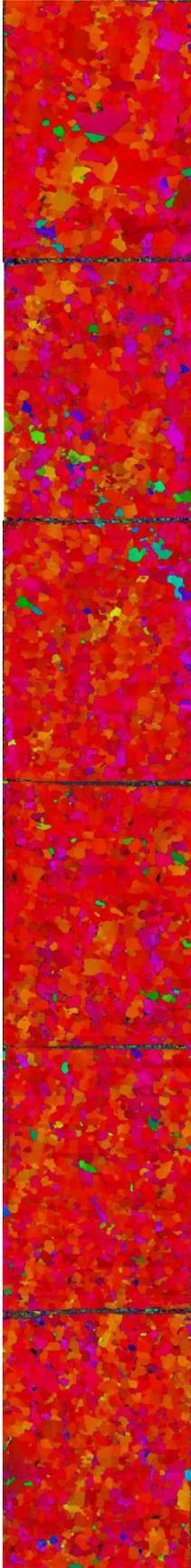
Bag 3356



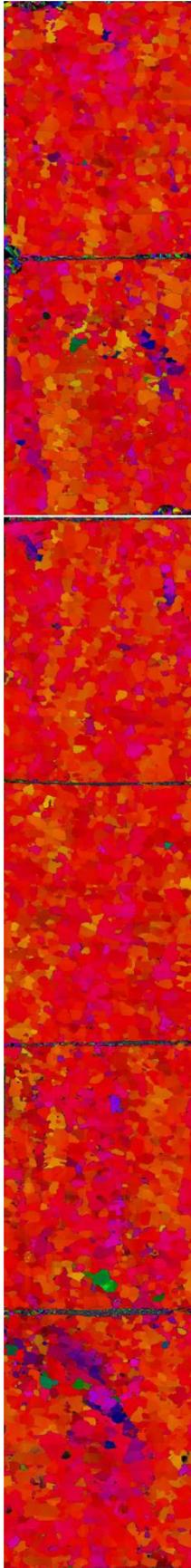
Bag 3876



Bag 3906



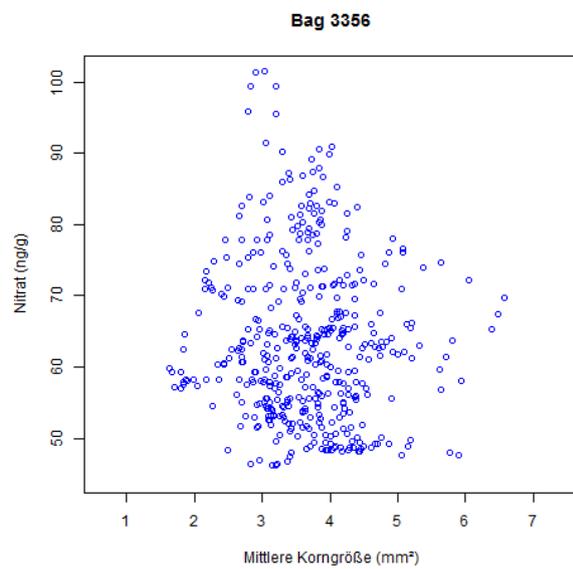
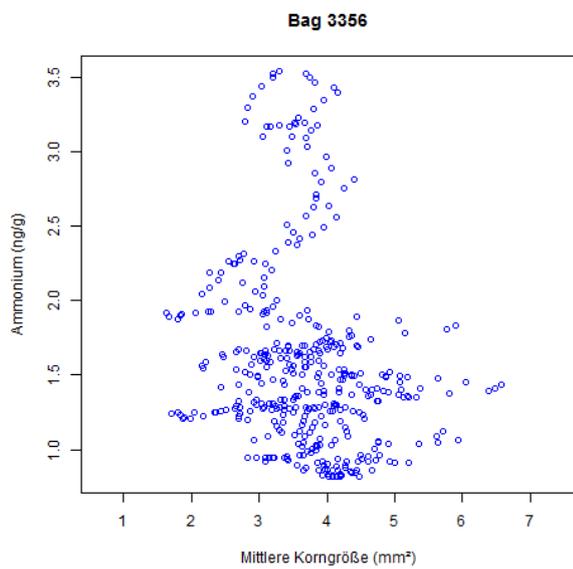
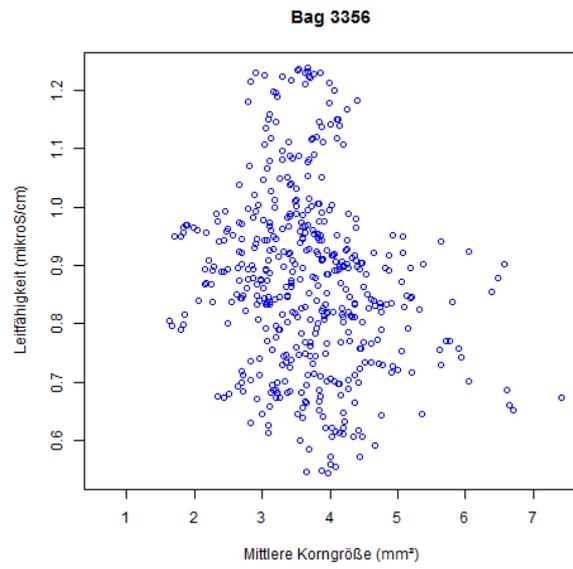
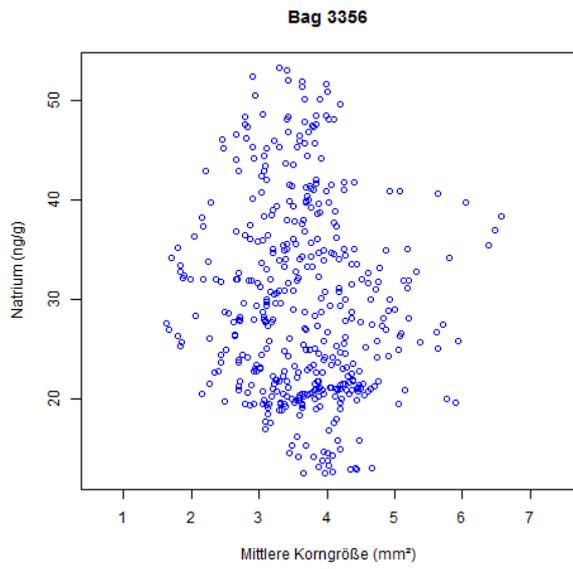
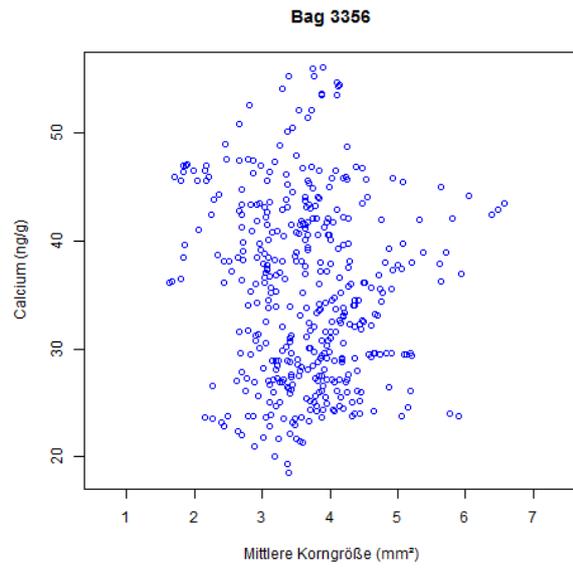
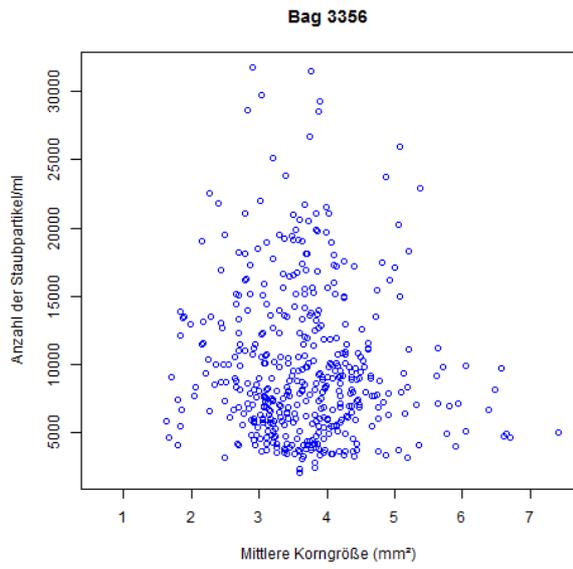
Bag 4006

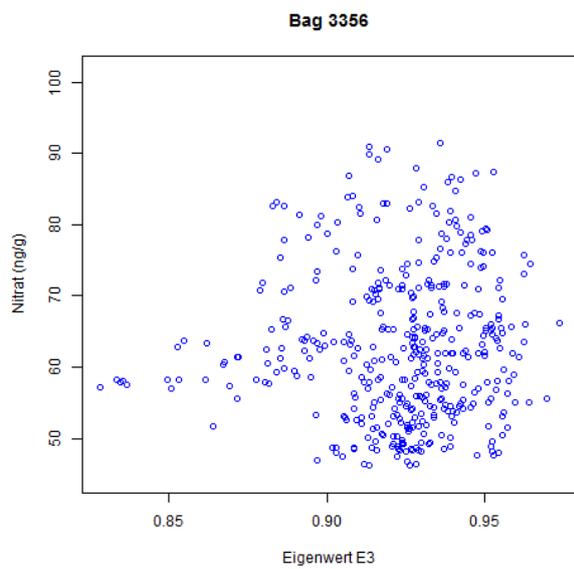
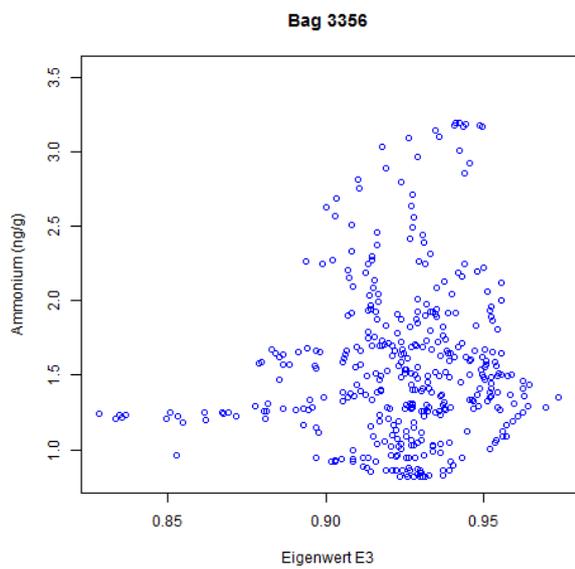
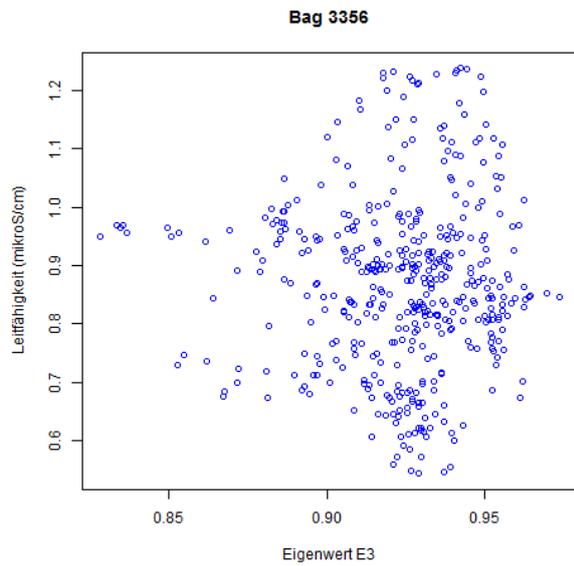
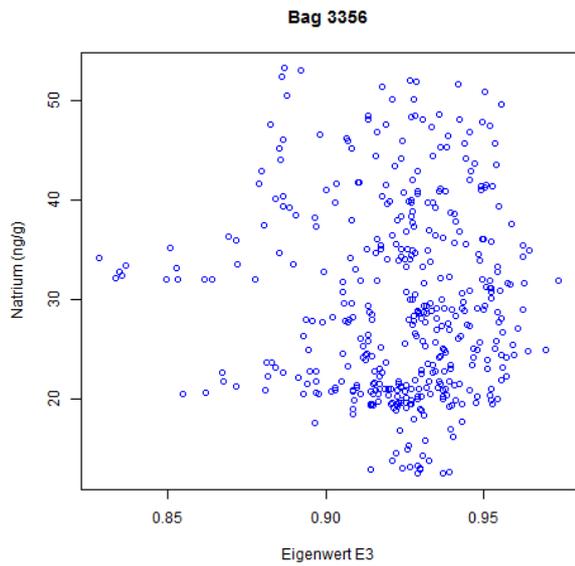
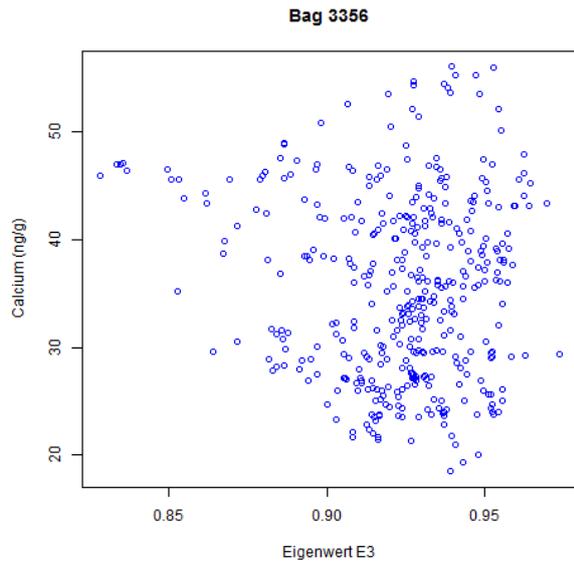
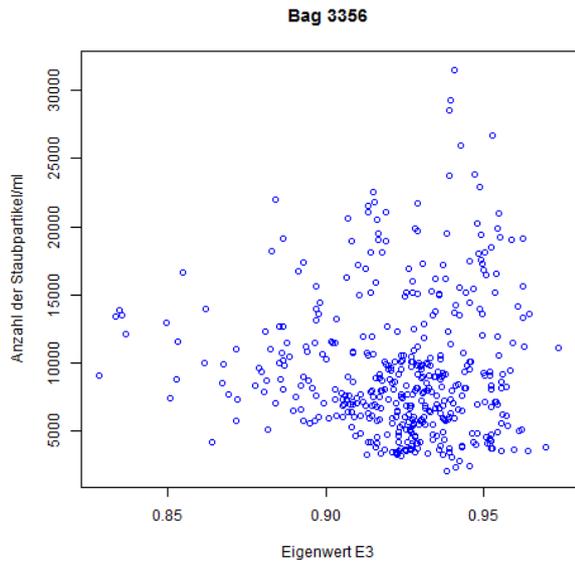


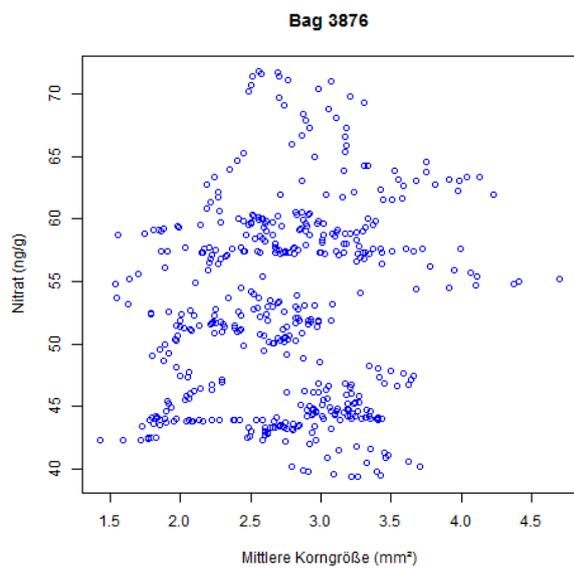
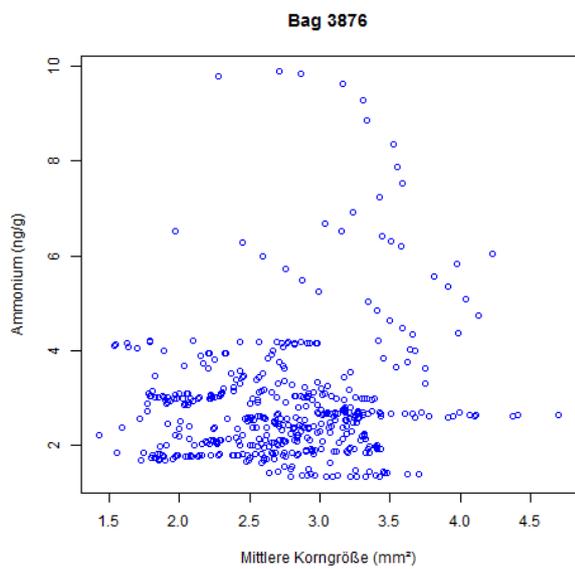
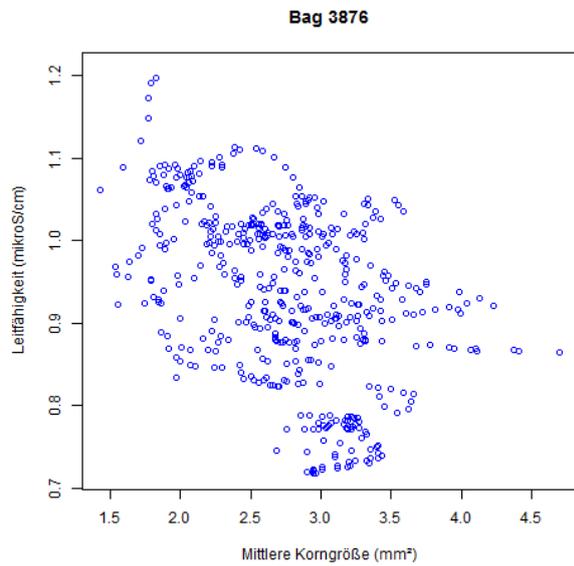
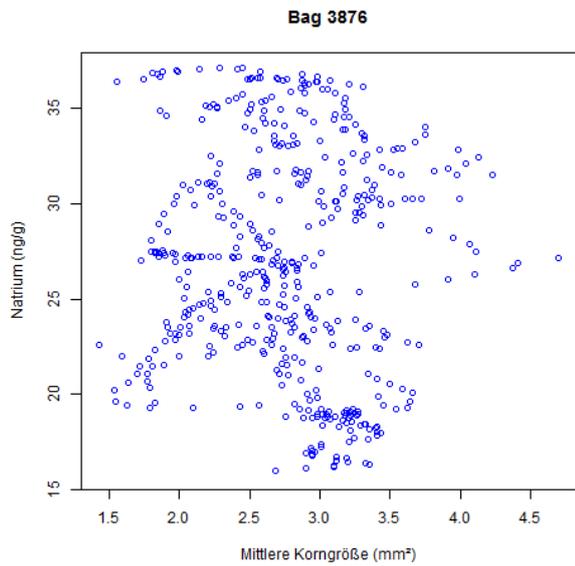
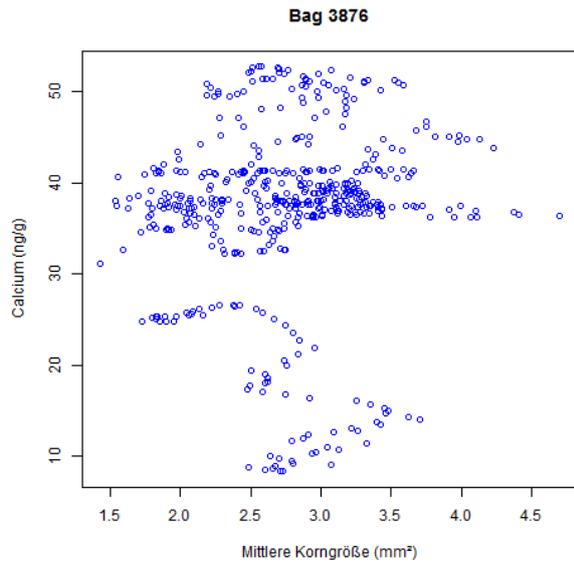
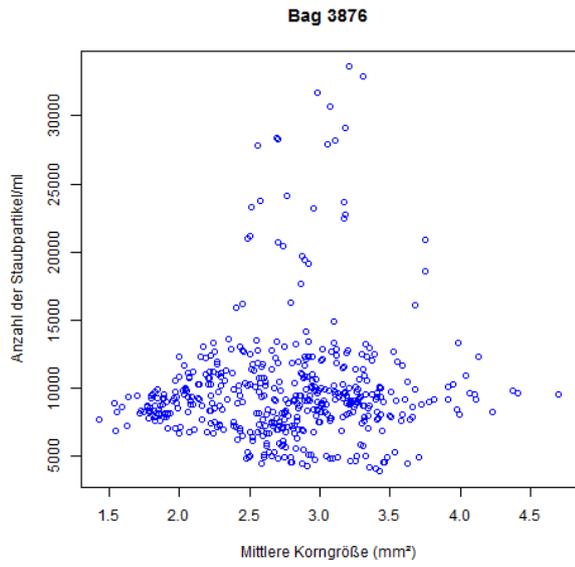
Top

Bottom

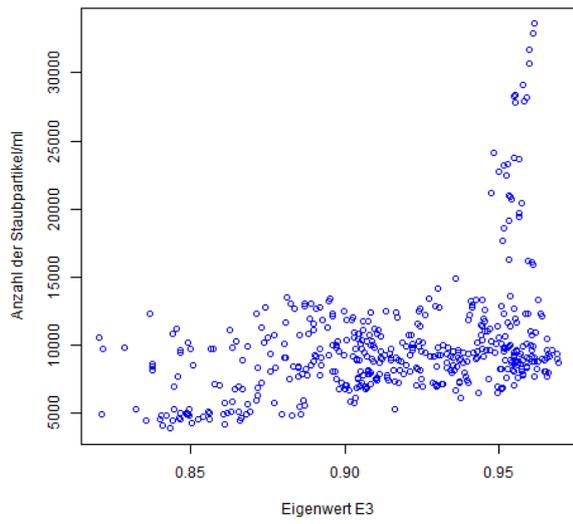
10.4 Scatterplots



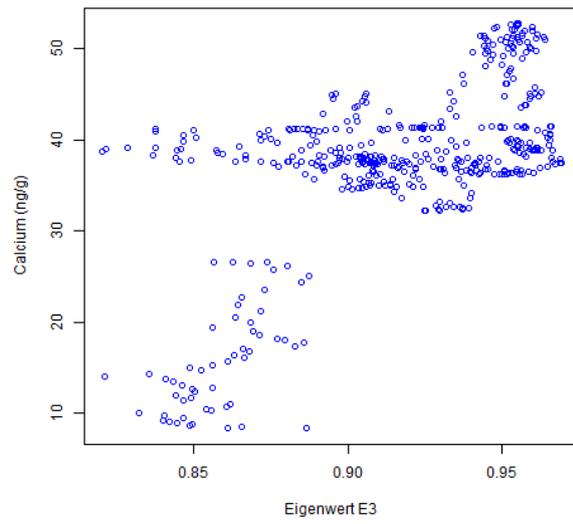




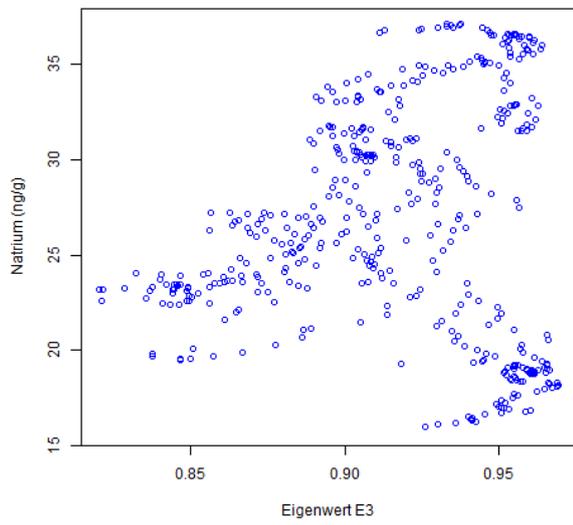
Bag 3876



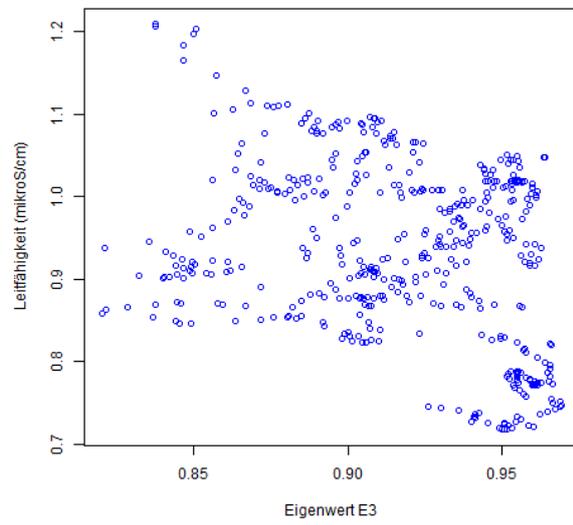
Bag 3876



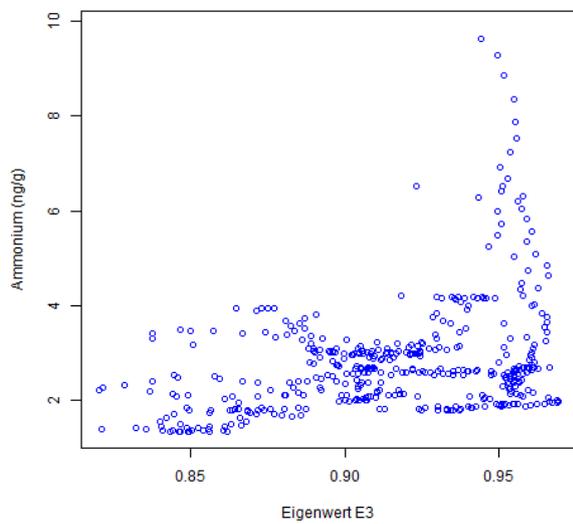
Bag 3876



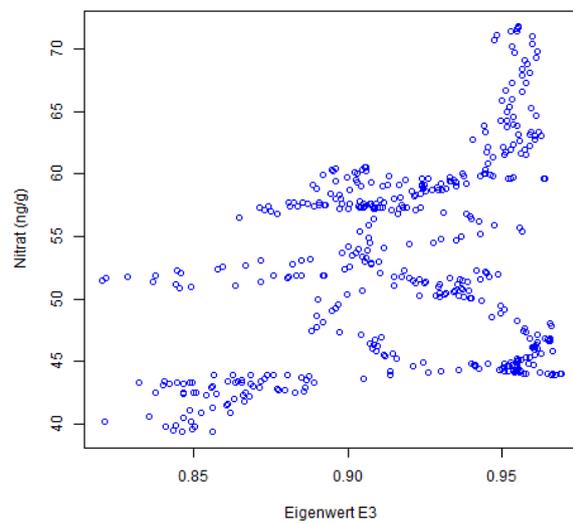
Bag 3876

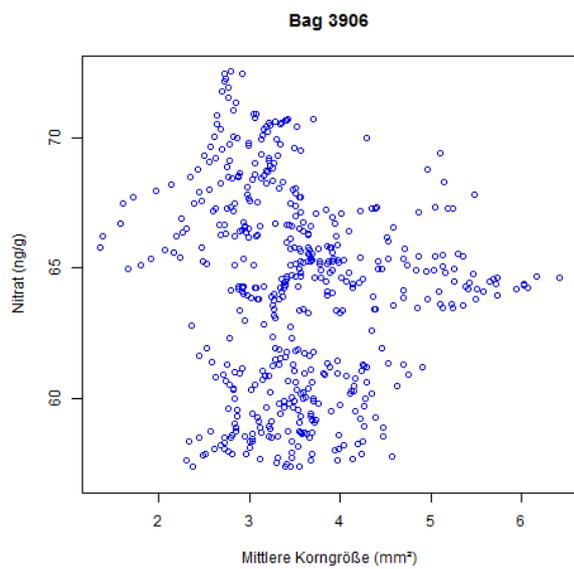
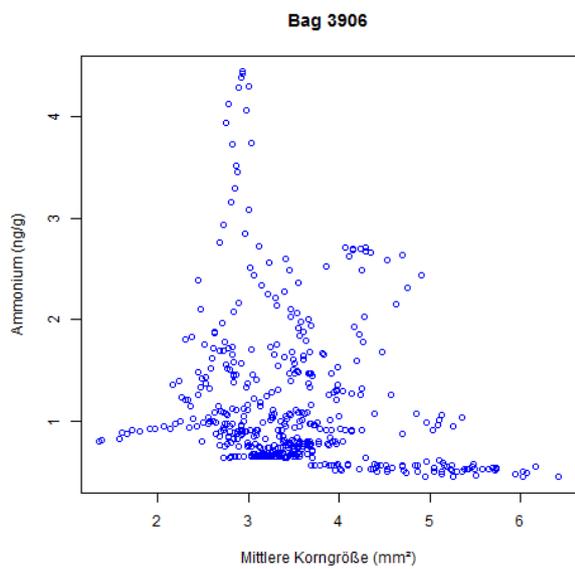
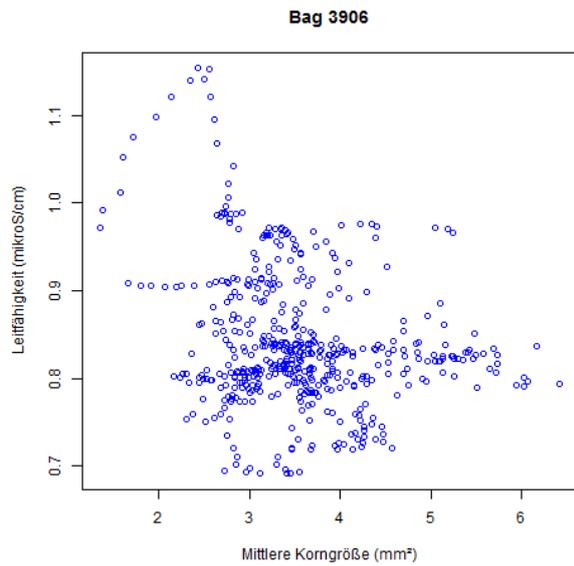
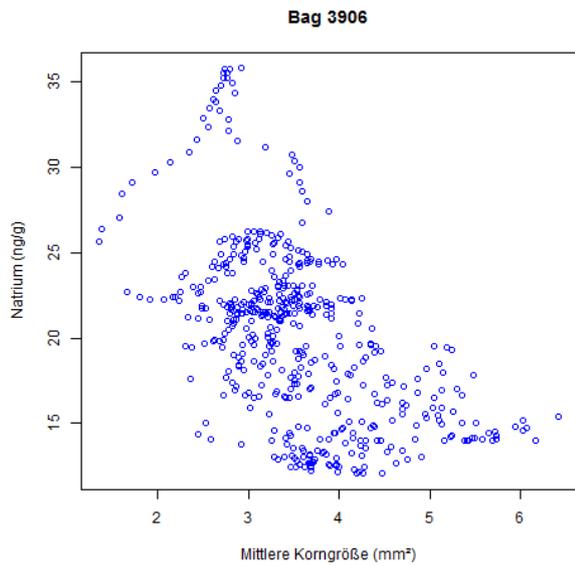
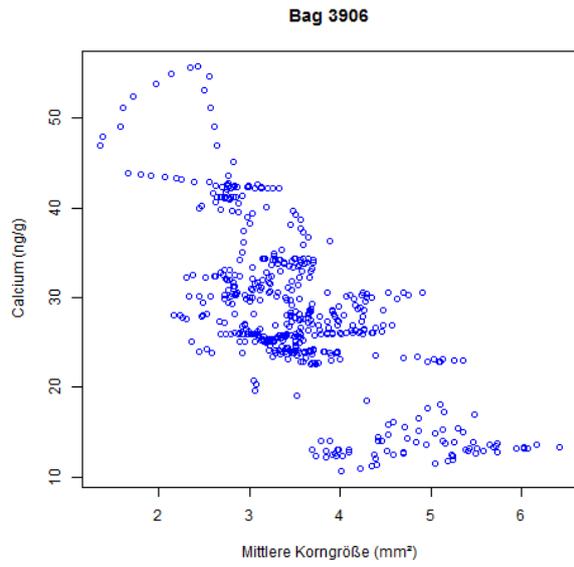
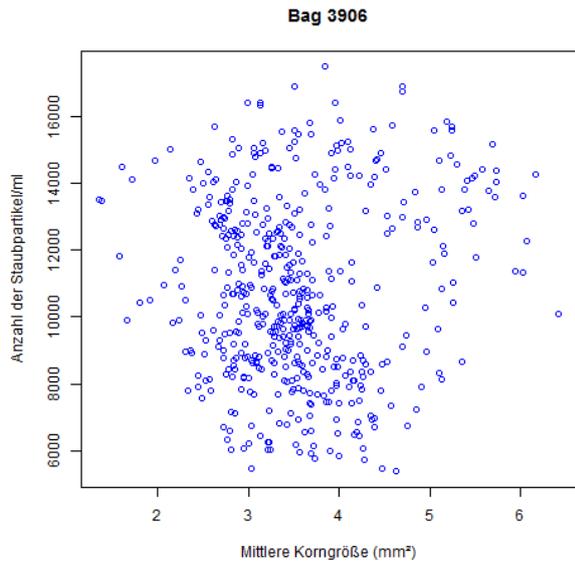


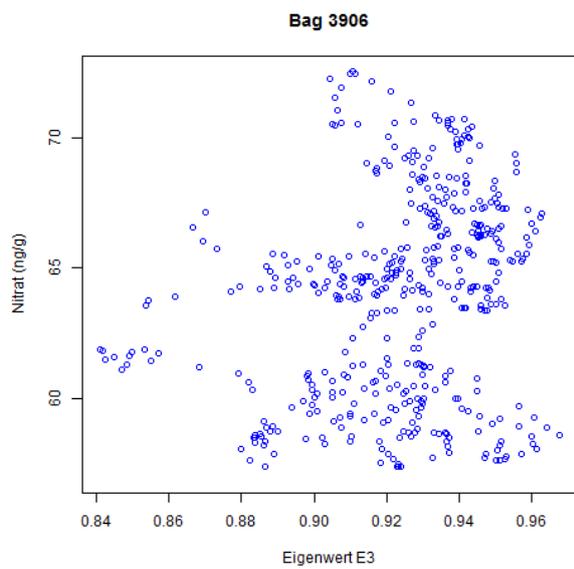
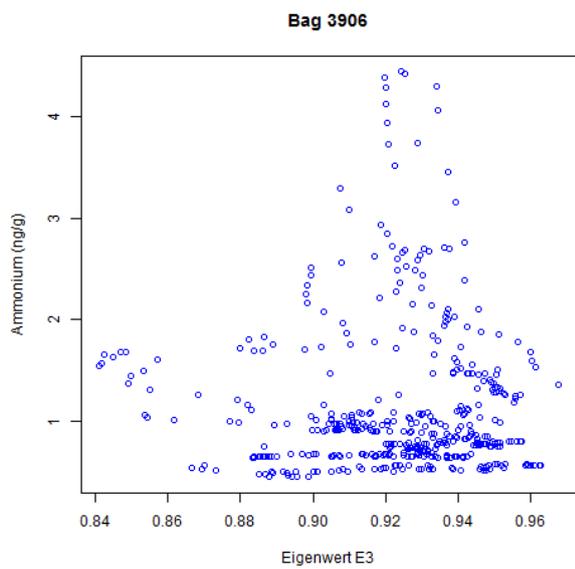
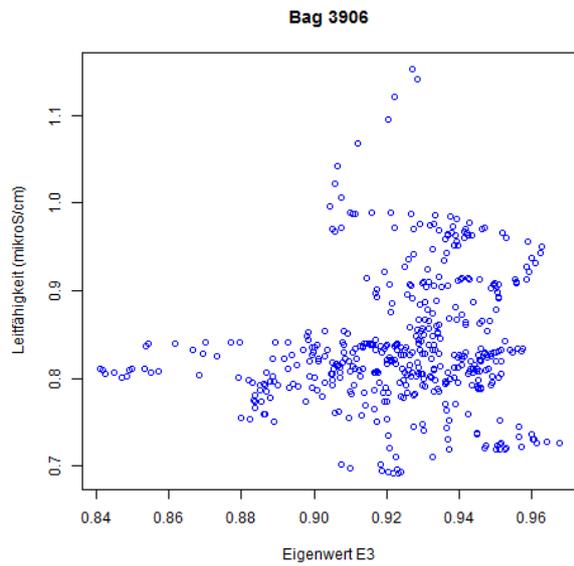
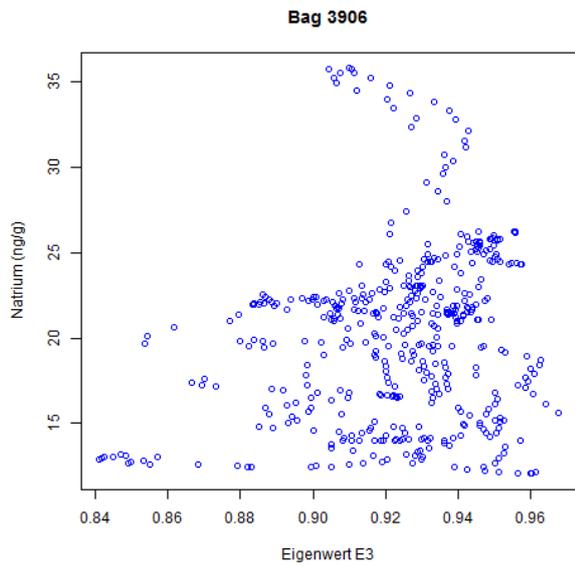
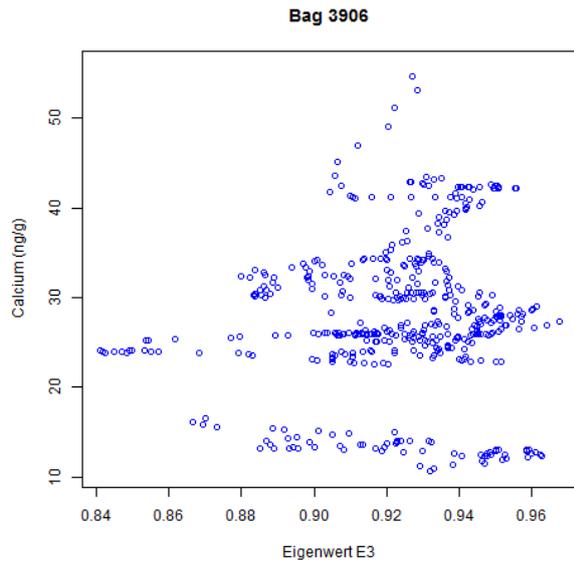
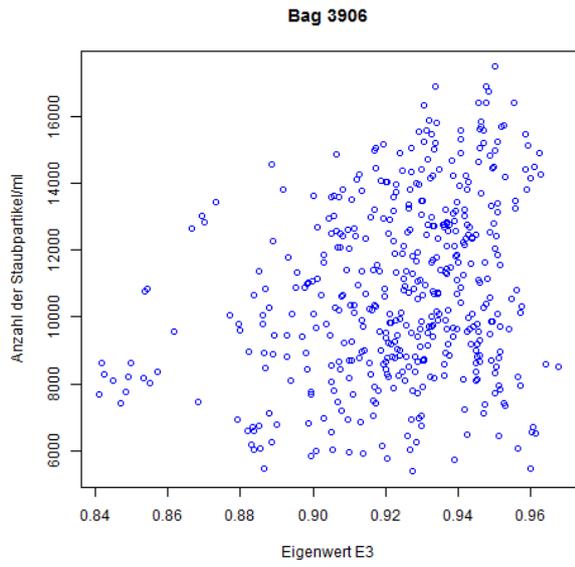
Bag 3876

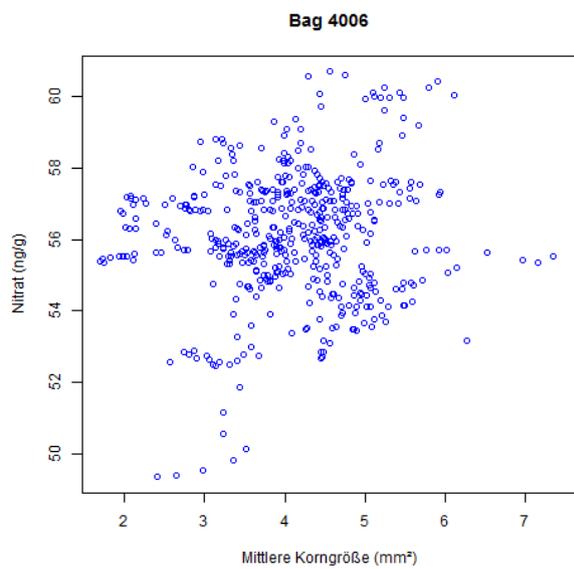
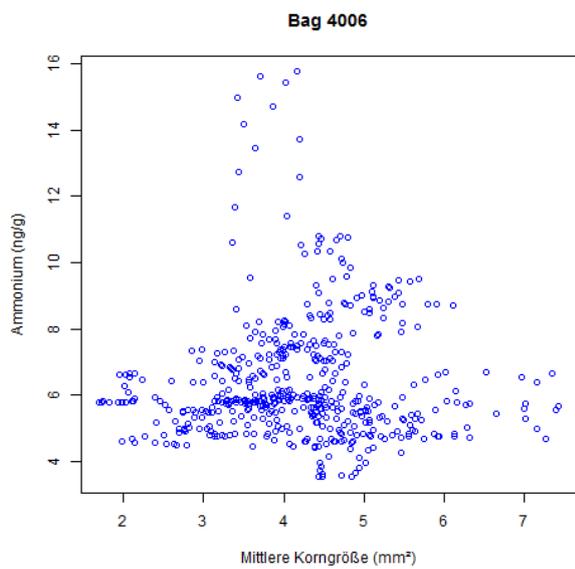
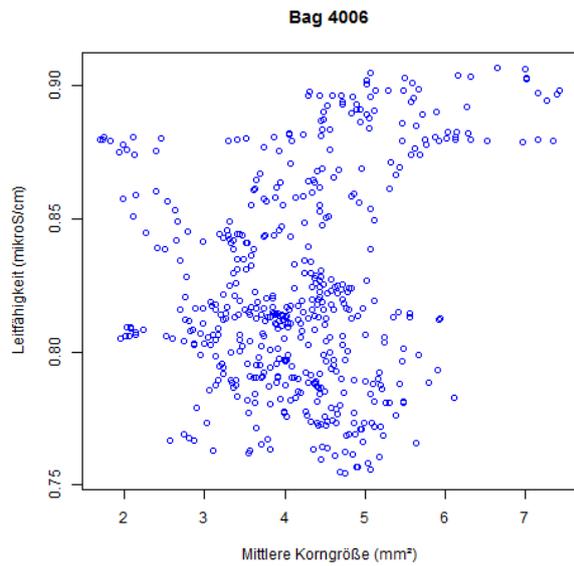
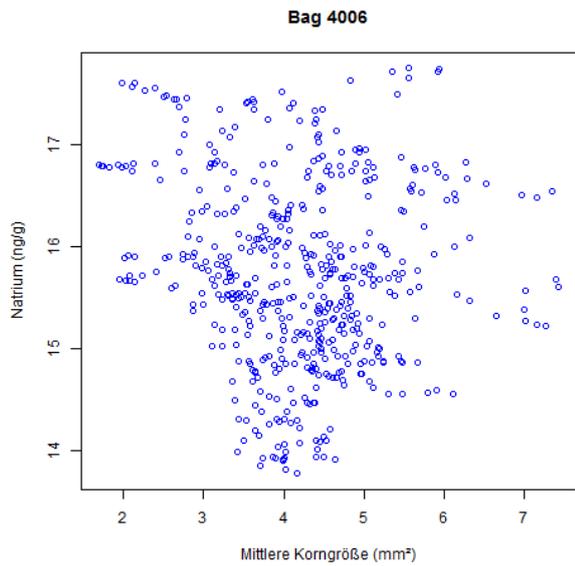
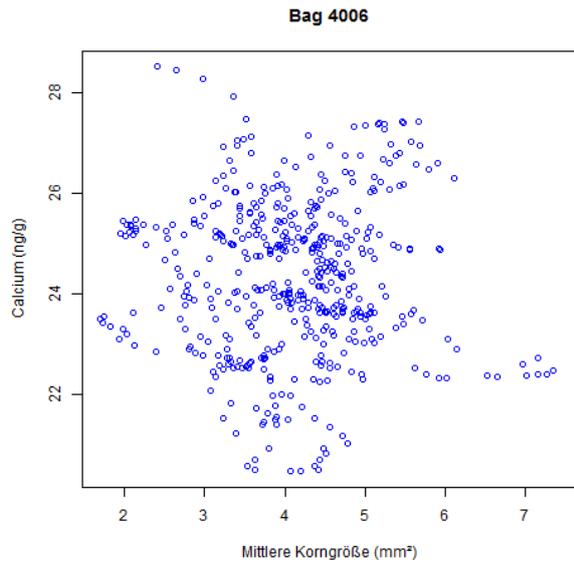
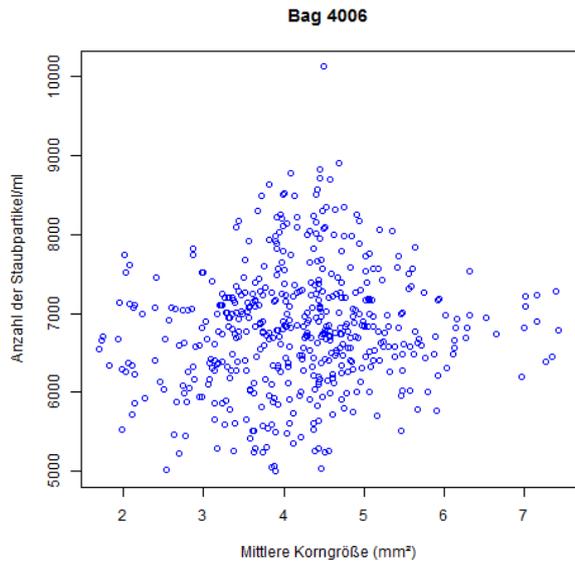


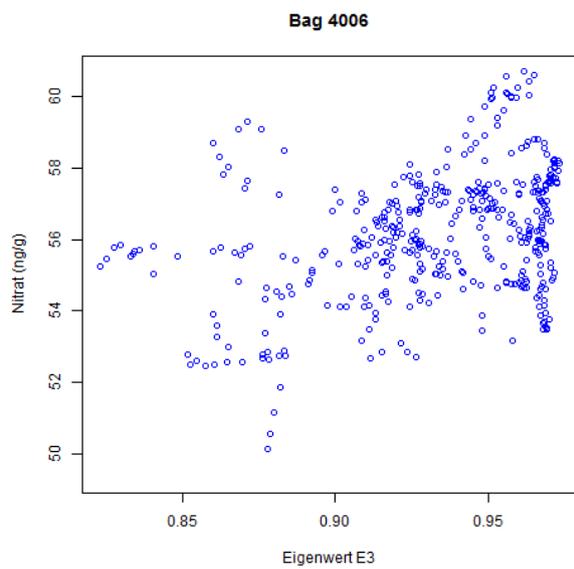
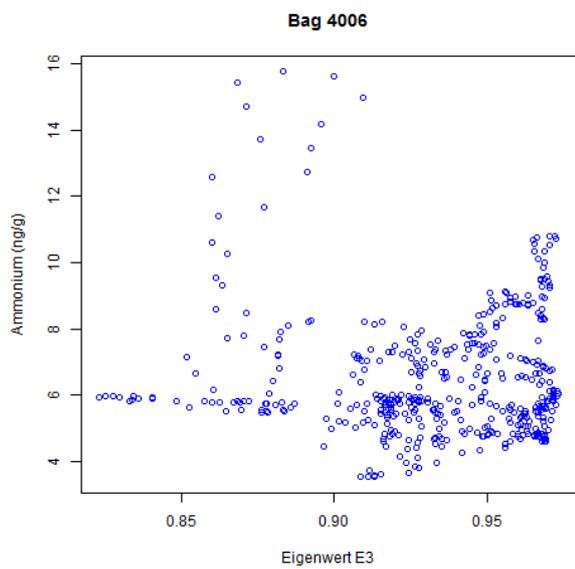
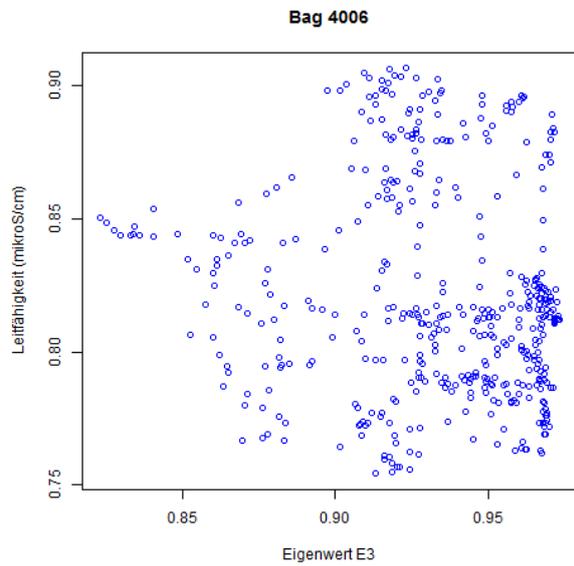
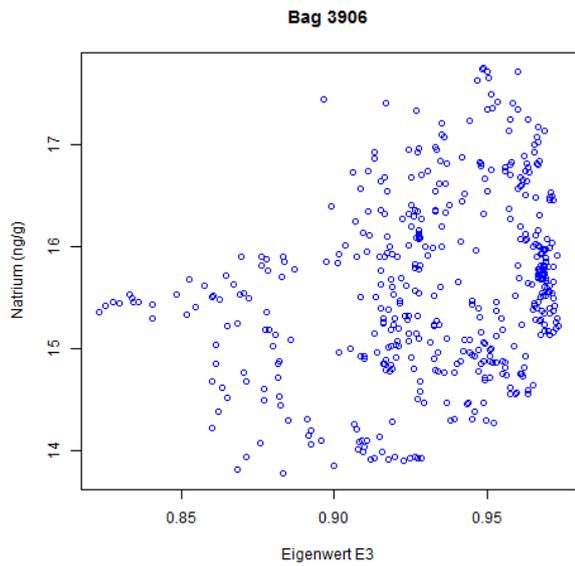
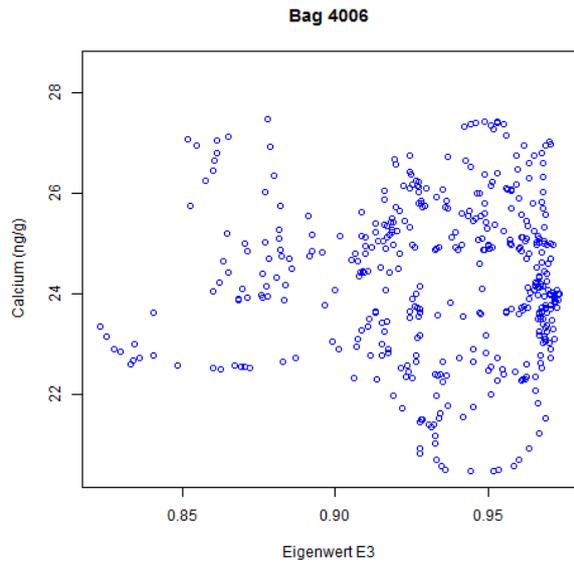
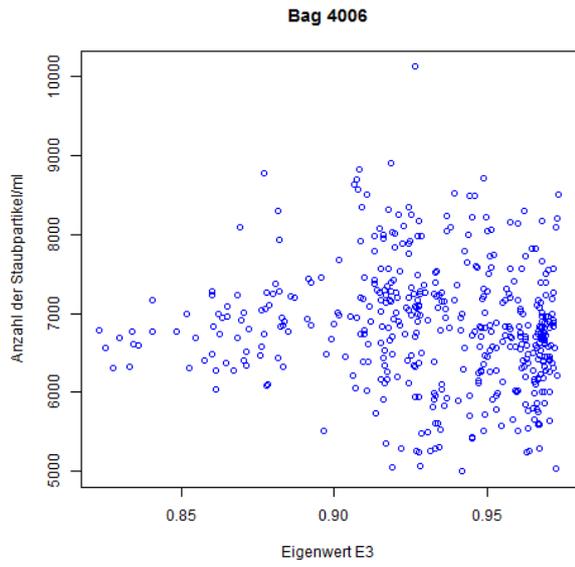
Bag 3876

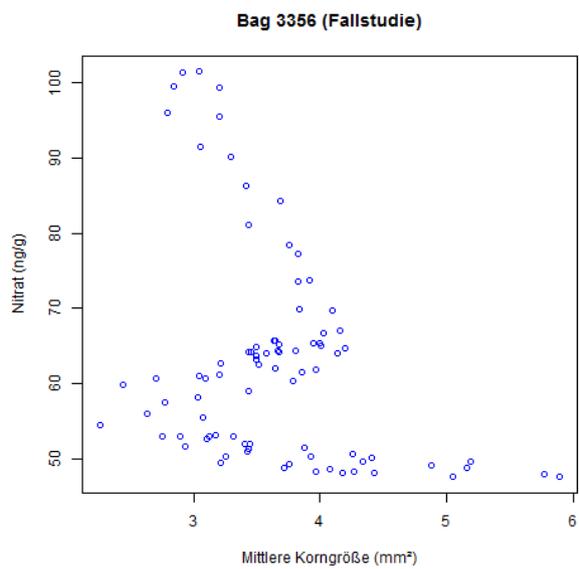
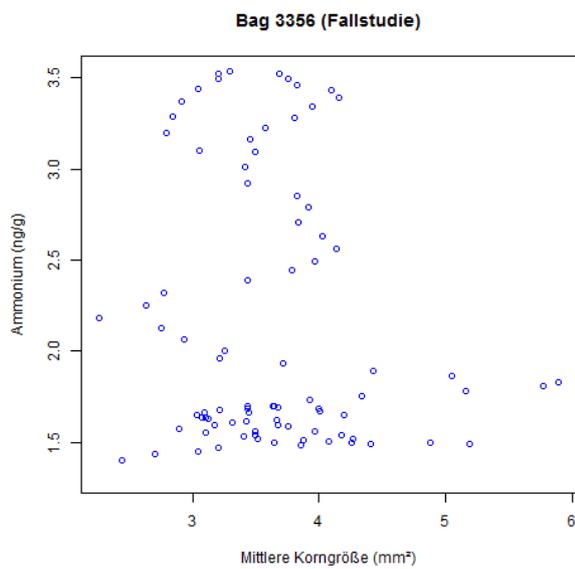
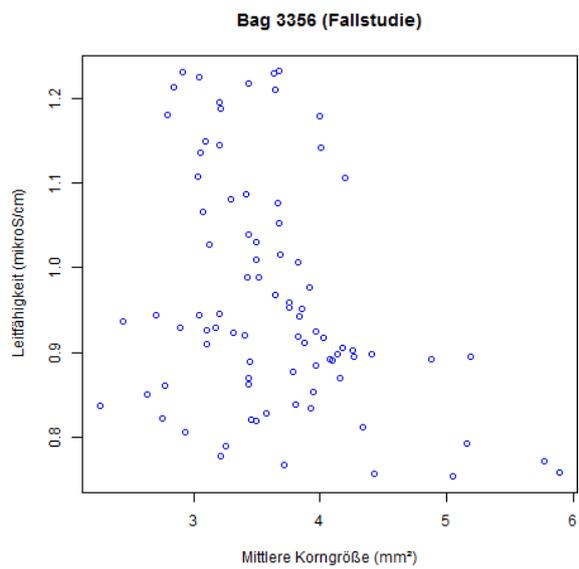
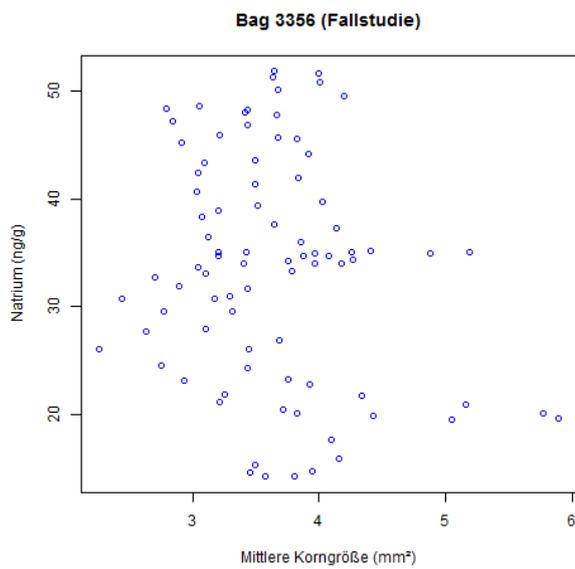
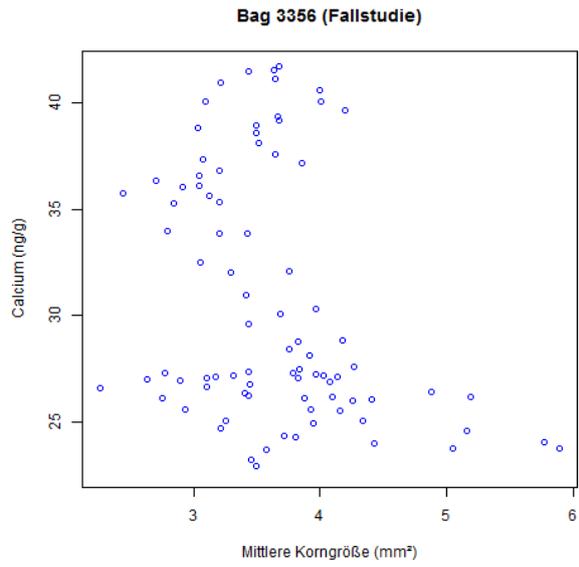
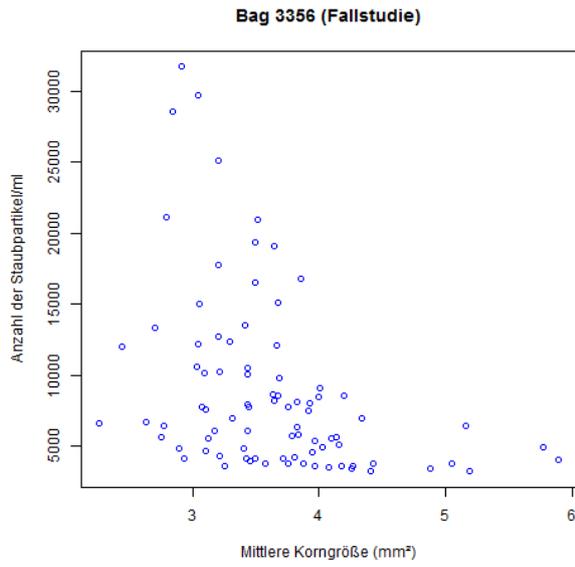




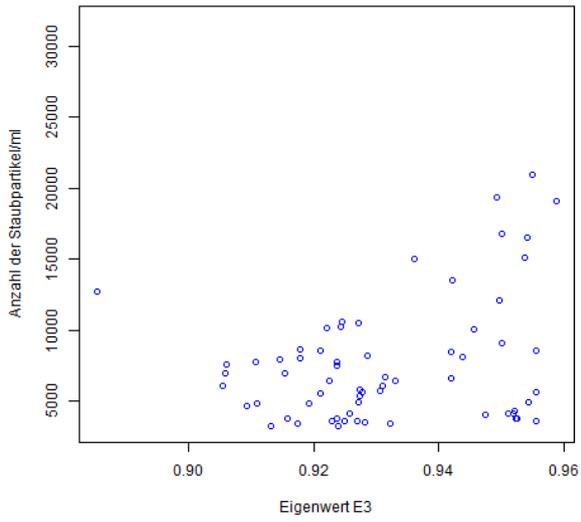




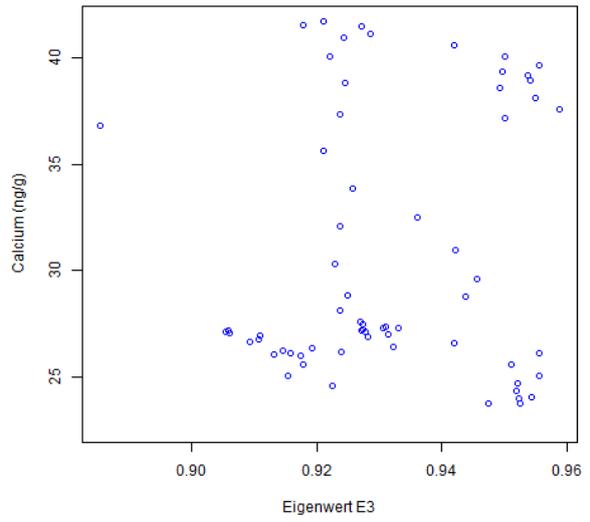




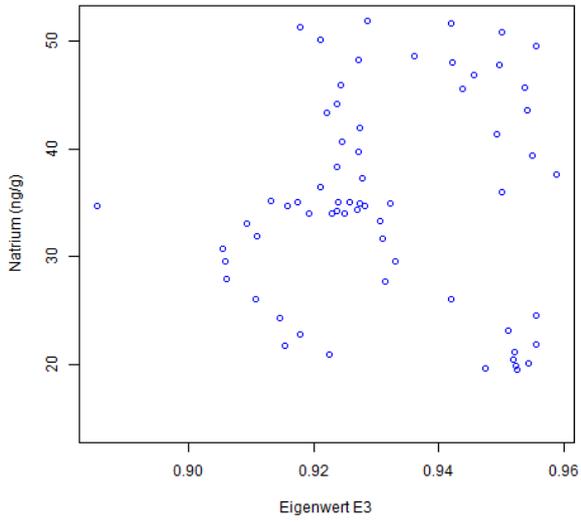
Bag 3356 (Fallstudie)



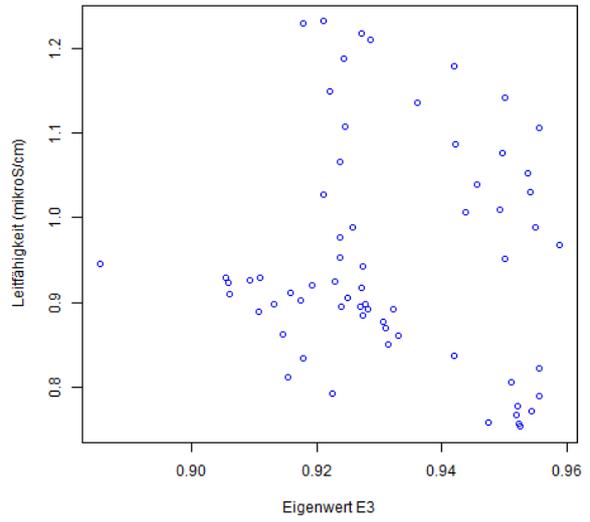
Bag 3356 (Fallstudie)



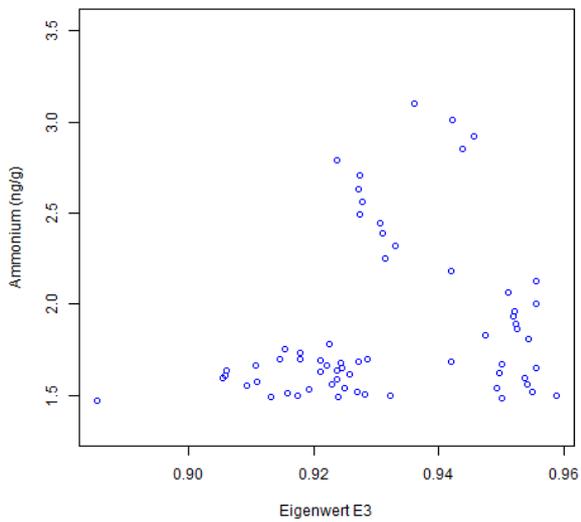
Bag 3356 (Fallstudie)



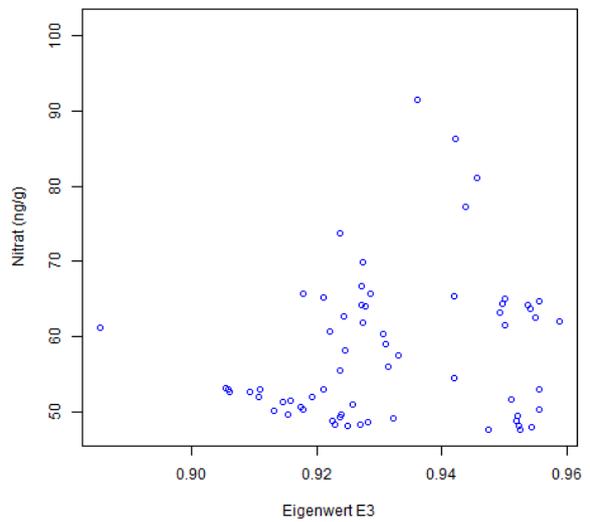
Bag 3356 (Fallstudie)



Bag 3356 (Fallstudie)

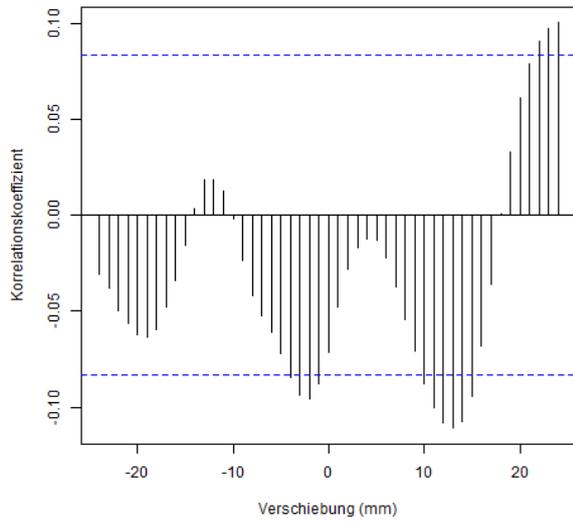


Bag 3356 (Fallstudie)

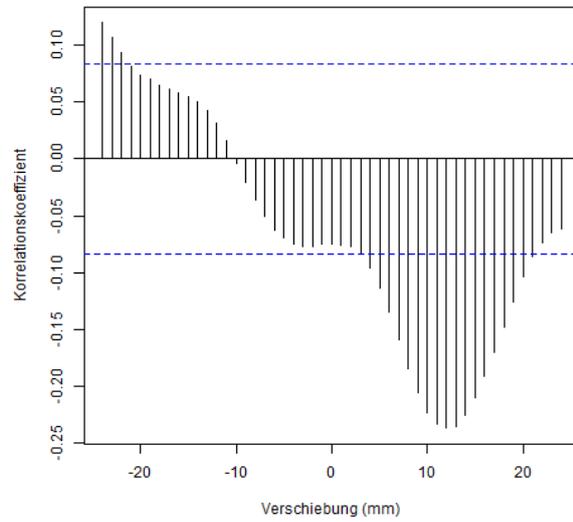


10.5 Plots der Kreuzkorrelation

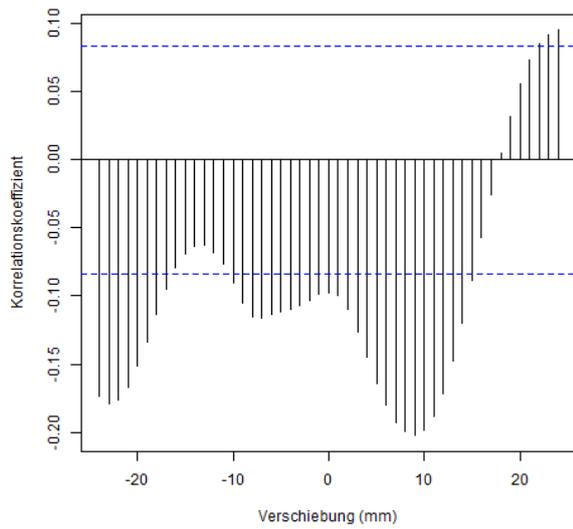
Bag 3356: mittlere Korngröße, Anzahl der Staubpartikel



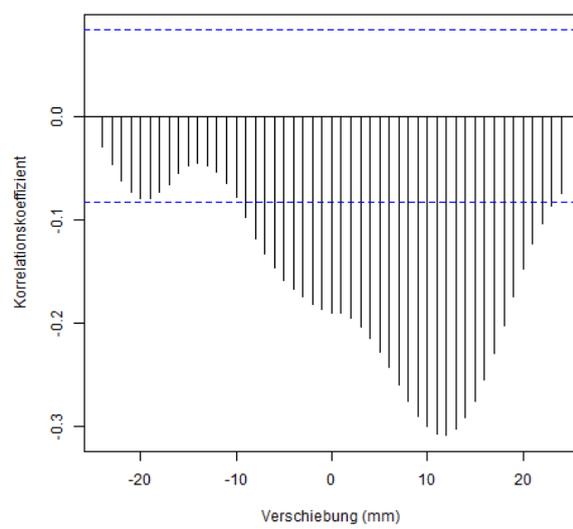
Bag 3356: mittlere Korngröße, Calcium



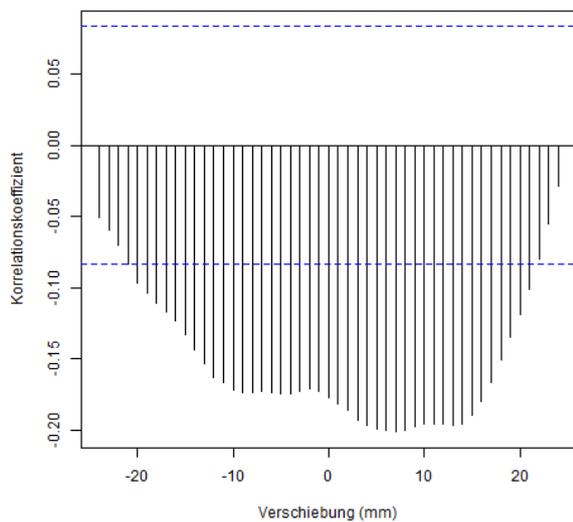
Bag 3356: mittlere Korngröße, Natrium



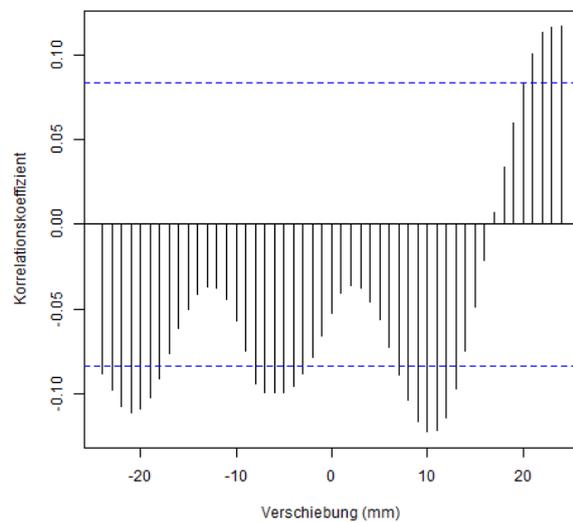
Bag 3356: mittlere Korngröße, Leitfähigkeit



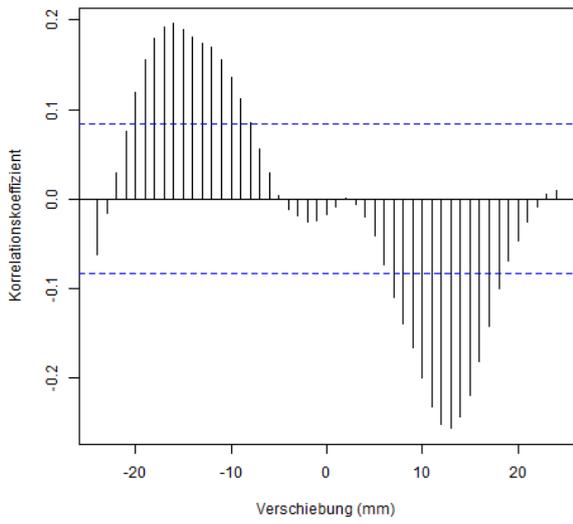
Bag 3356: mittlere Korngröße, Ammonium



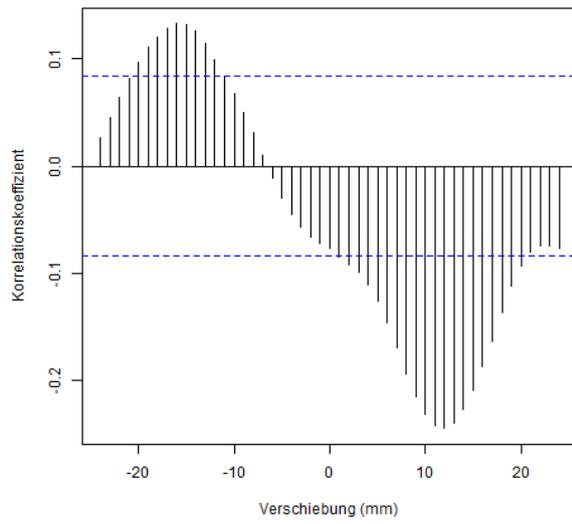
Bag 3356: mittlere Korngröße, Nitrat



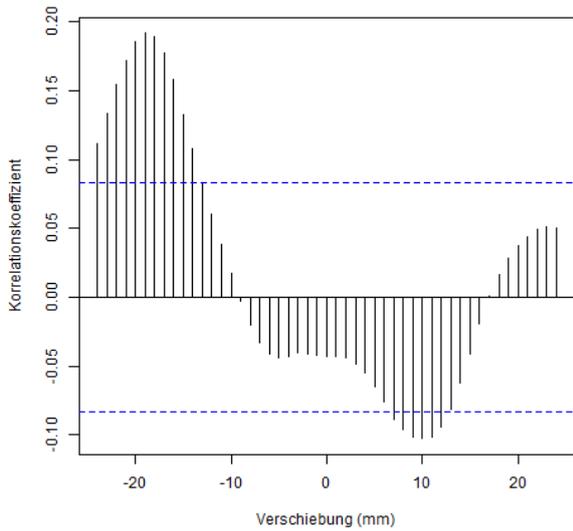
Bag 3356: Eigenwert E3, Anzahl der Staubpartikel



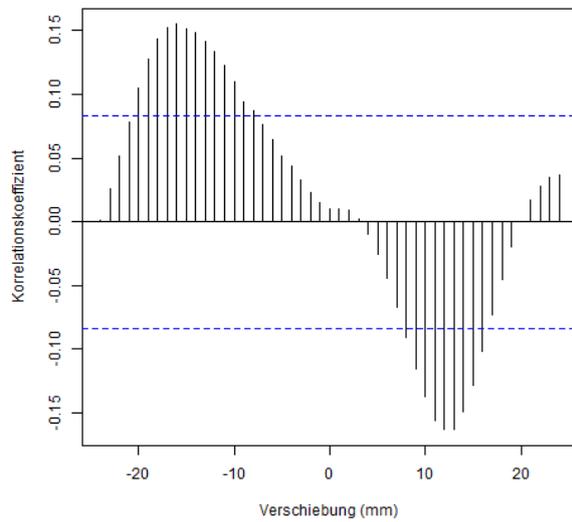
Bag 3356: Eigenwert E3, Calcium



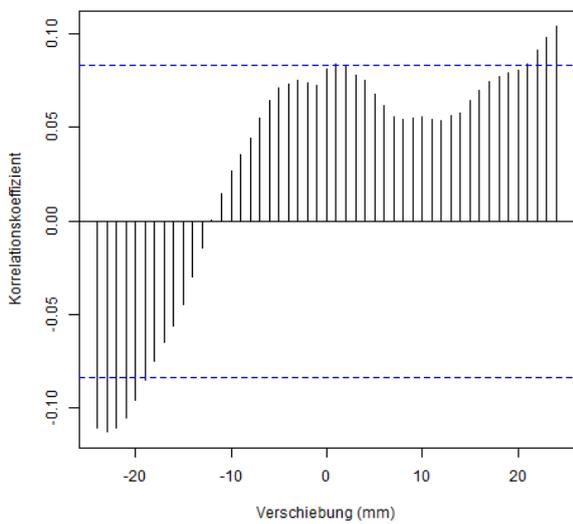
Bag 3356: Eigenwert E3, Natrium



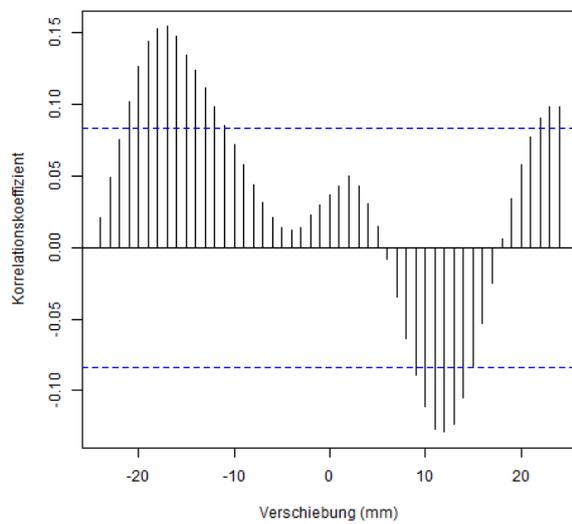
Bag 3356: Eigenwert E3, Leitfähigkeit



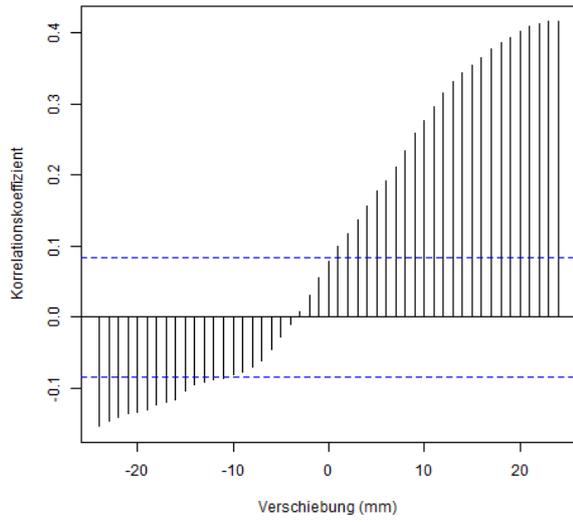
Bag 3356: Eigenwert E3, Ammonium



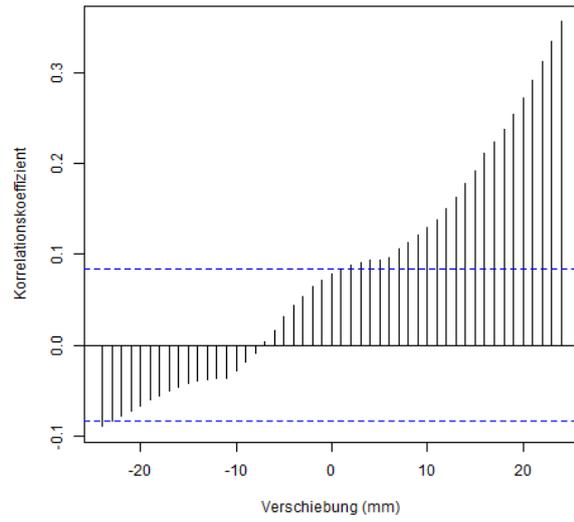
Bag 3356: Eigenwert E3, Nitrat



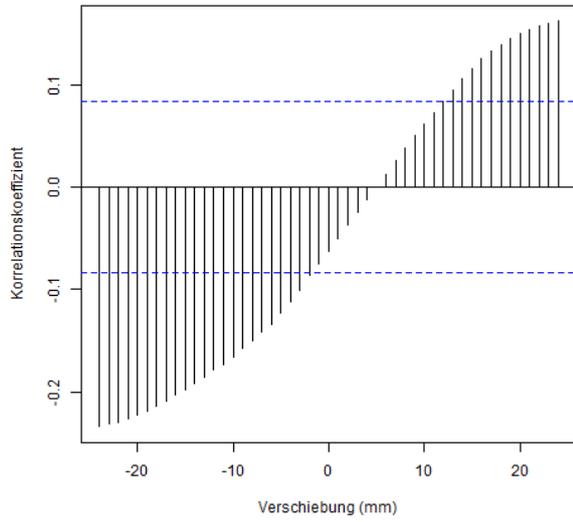
Bag 3876: mittlere Korngröße, Anzahl der Staubpartikel



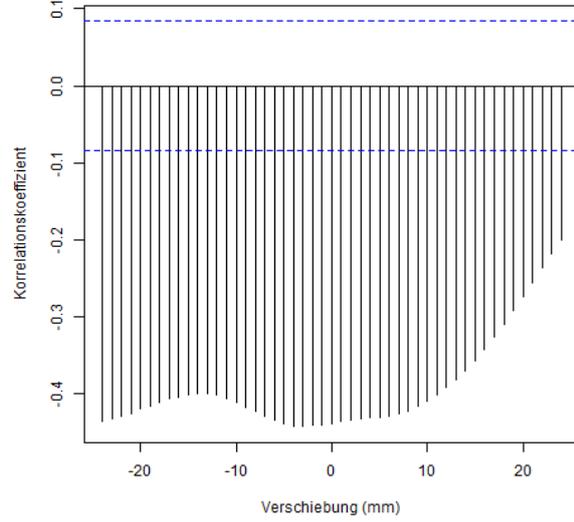
Bag 3876: mittlere Korngröße, Calcium



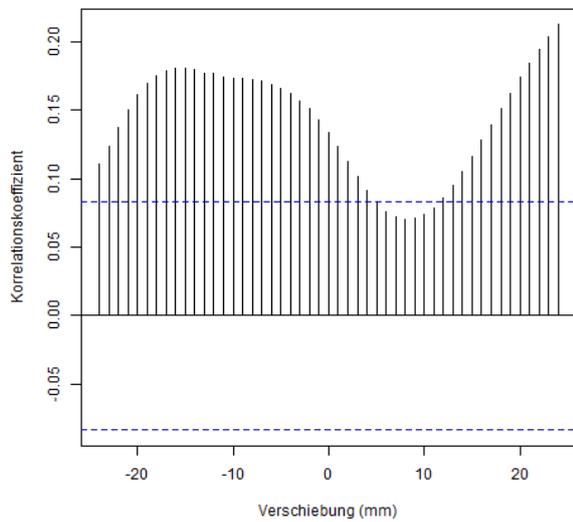
Bag 3876: mittlere Korngröße, Natrium



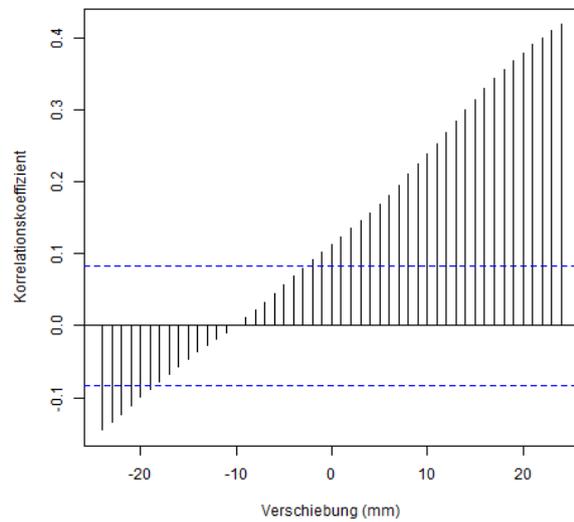
Bag 3876: mittlere Korngröße, Leitfähigkeit



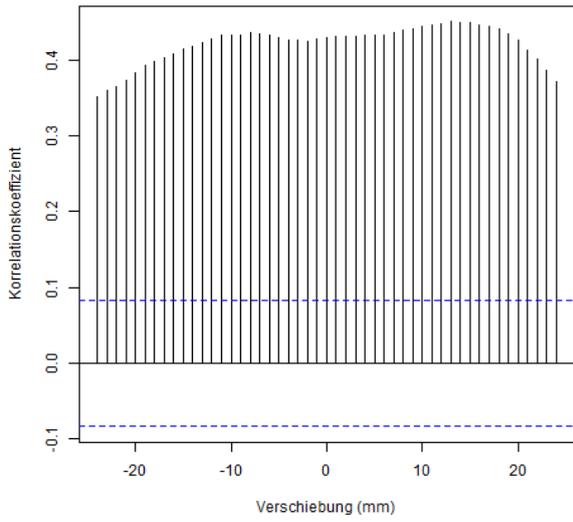
Bag 3876: mittlere Korngröße, Ammonium



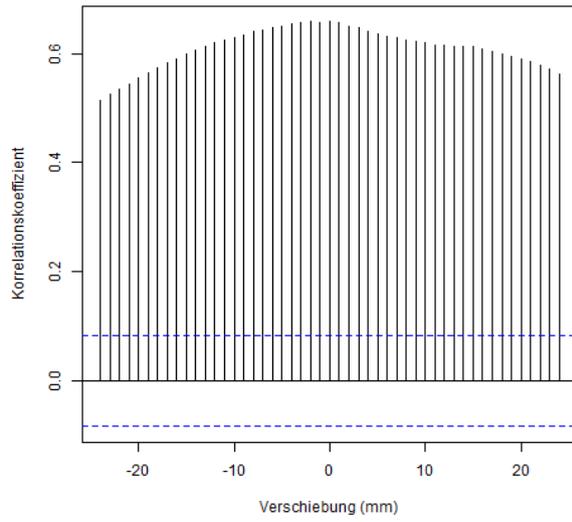
Bag 3876: mittlere Korngröße, Nitrat



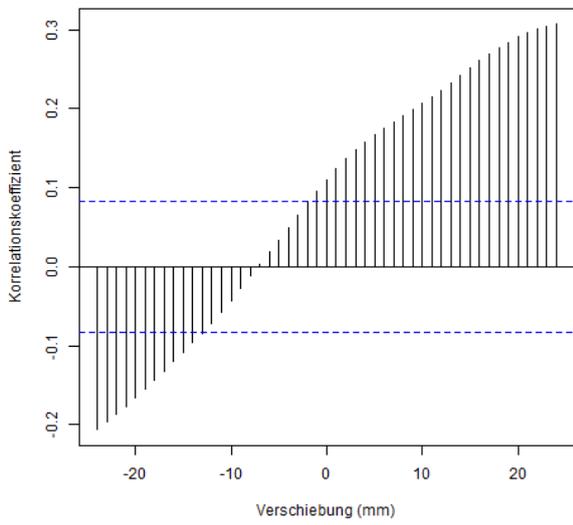
Bag 3876: Eigenwert E3, Anzahl der Staubpartikel



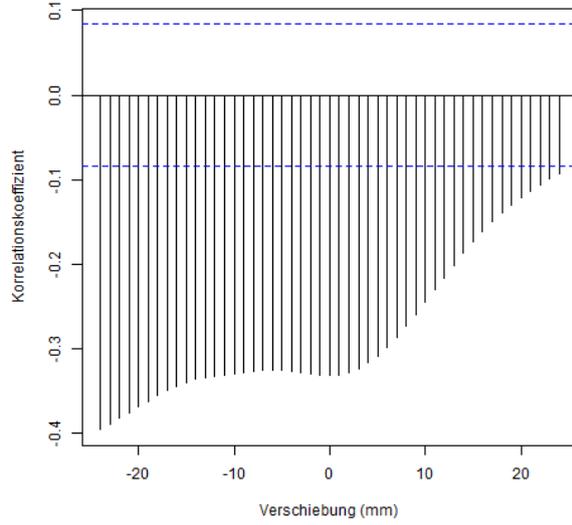
Bag 3876: Eigenwert E3, Calcium



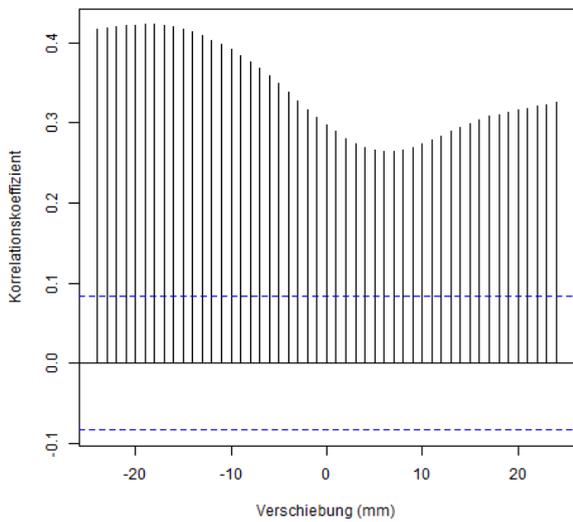
Bag 3876: Eigenwert E3, Natrium



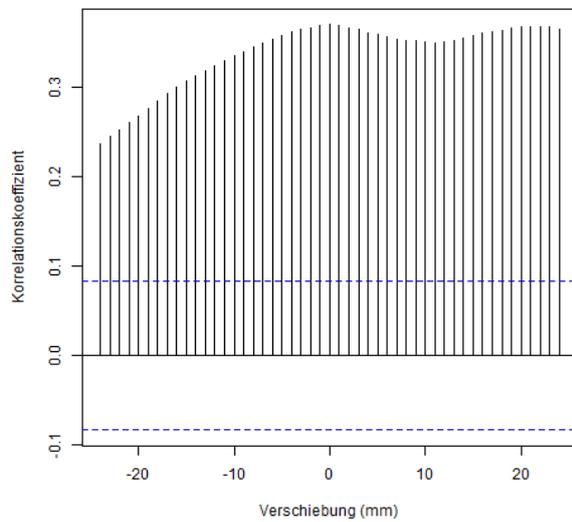
Bag 3876: Eigenwert E3, Leitfähigkeit



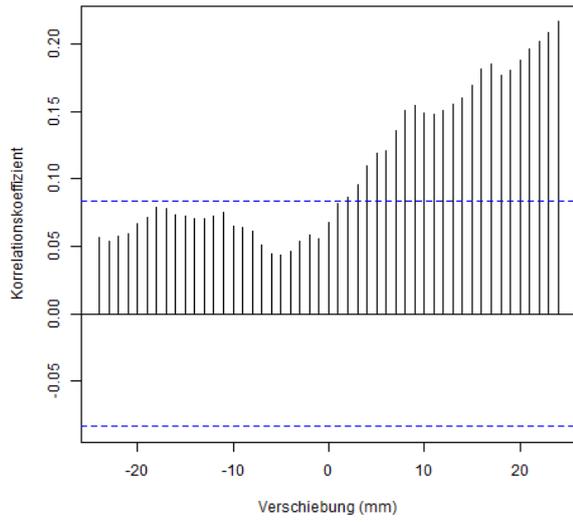
Bag 3876: Eigenwert E3, Ammonium



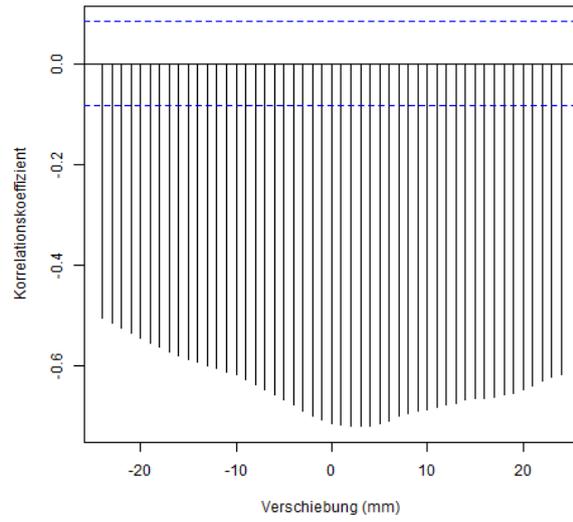
Bag 3876: Eigenwert E3, Nitrat



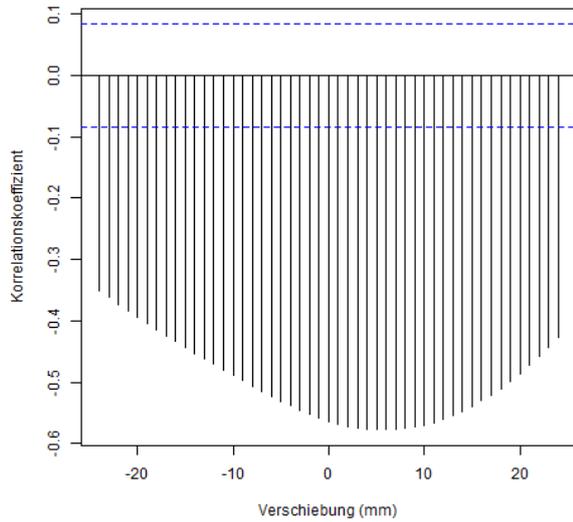
Bag 3906: mittlere Korngröße, Anzahl der Staubpartikel



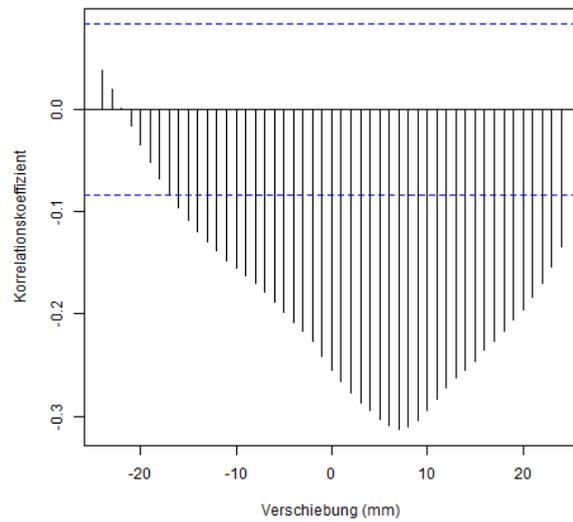
Bag 3906: mittlere Korngröße, Calcium



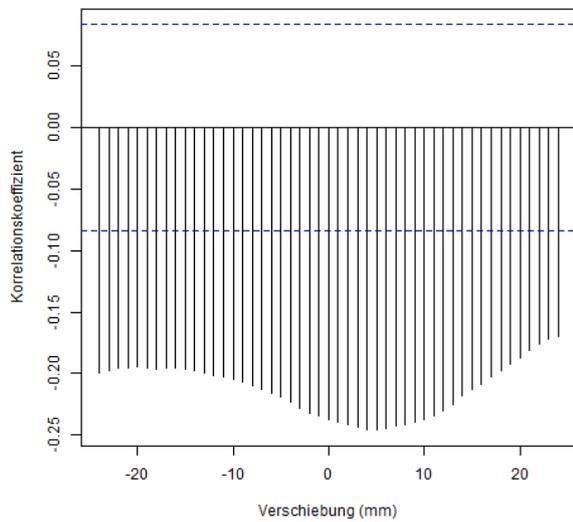
Bag 3906: mittlere Korngröße, Natrium



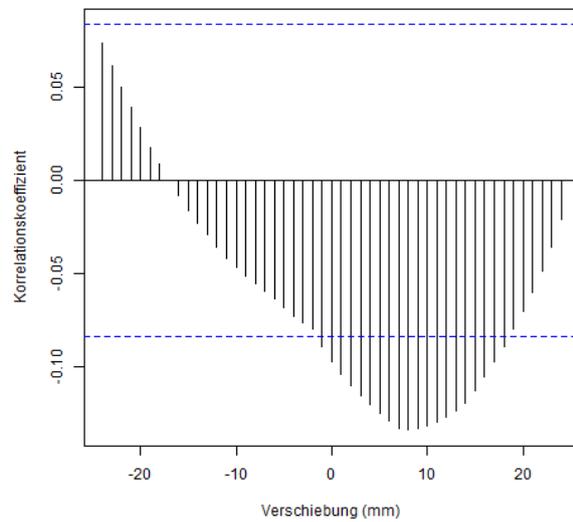
Bag 3906: mittlere Korngröße, Leitfähigkeit



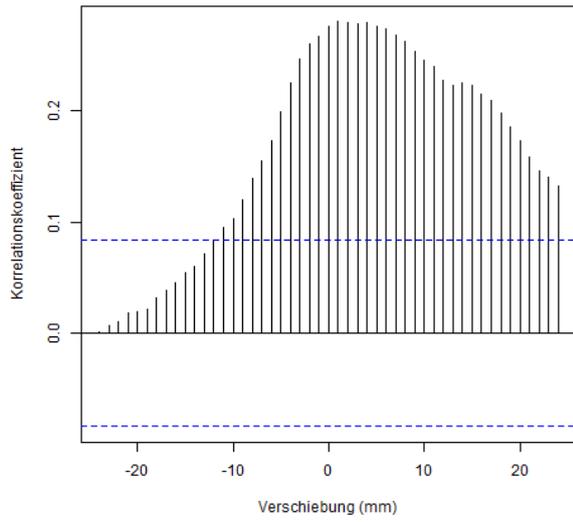
Bag 3906: mittlere Korngröße, Ammonium



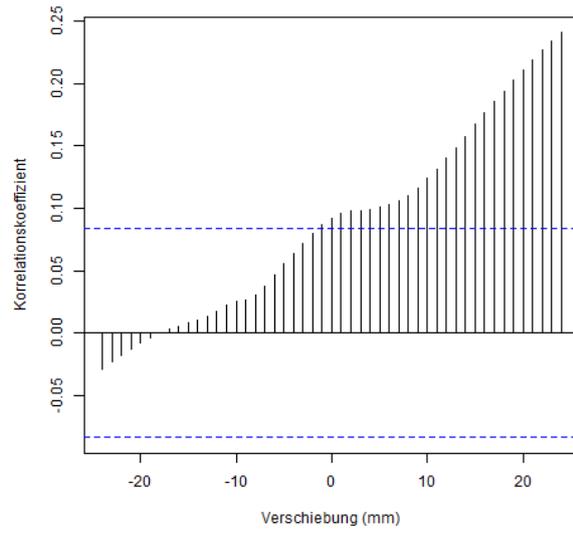
Bag 3906: mittlere Korngröße, Nitrat



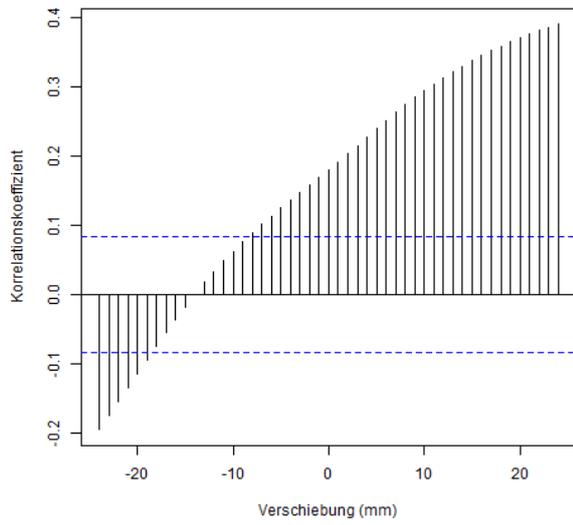
Bag 3906: Eigenwert E3, Anzahl der Staubpartikel



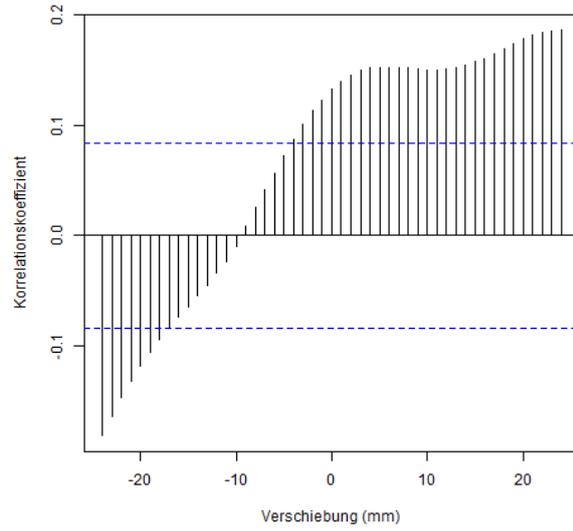
Bag 3906: Eigenwert E3, Calcium



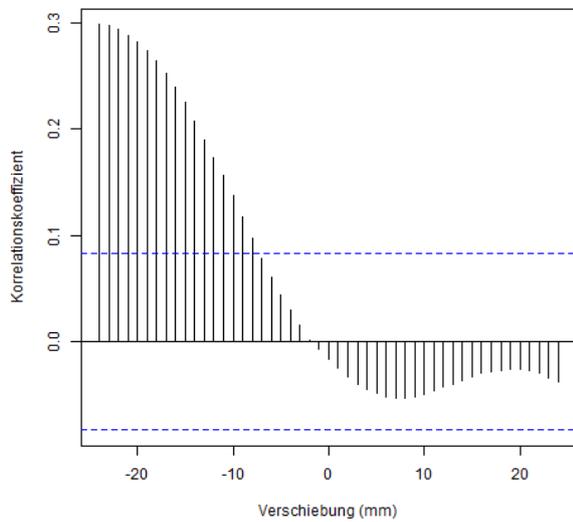
Bag 3906: Eigenwert E3, Natrium



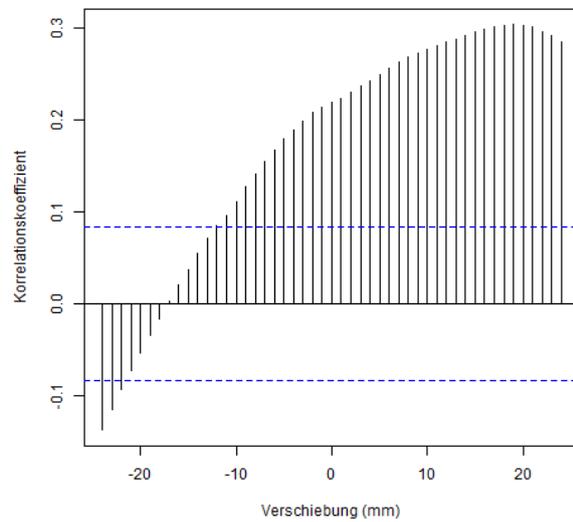
Bag 3906: Eigenwert E3, Leitfähigkeit



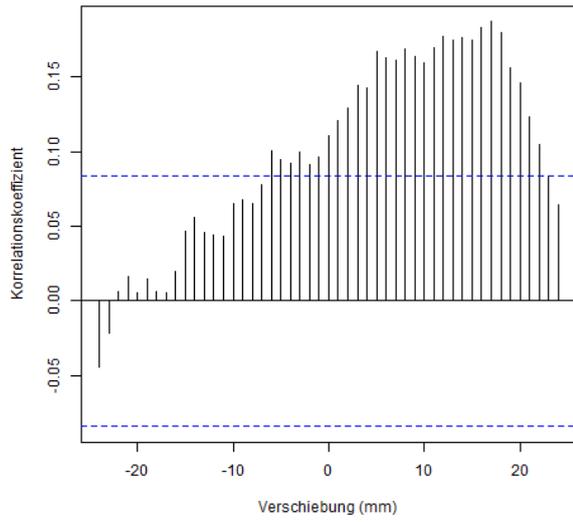
Bag 3906: Eigenwert E3, Ammonium



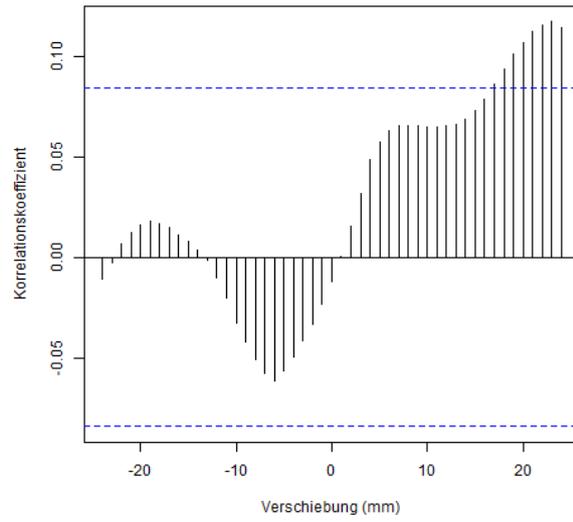
Bag 3906: Eigenwert E3, Nitrat



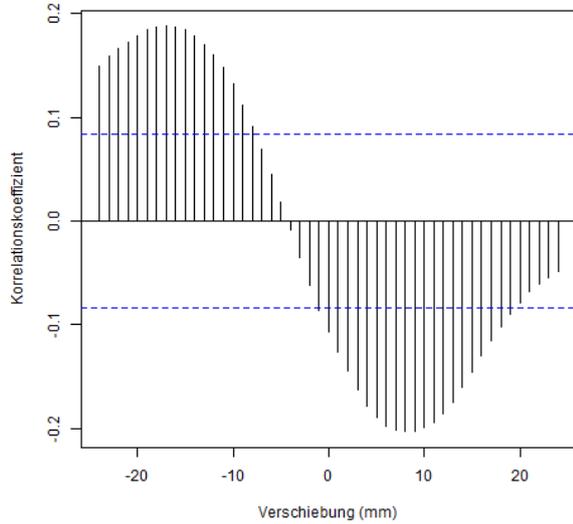
Bag 4006: mittlere Korngröße, Anzahl der Staubpartikel



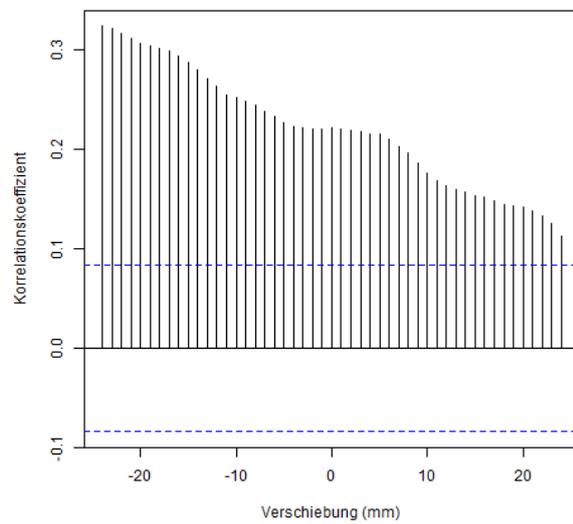
Bag 4006: mittlere Korngröße, Calcium



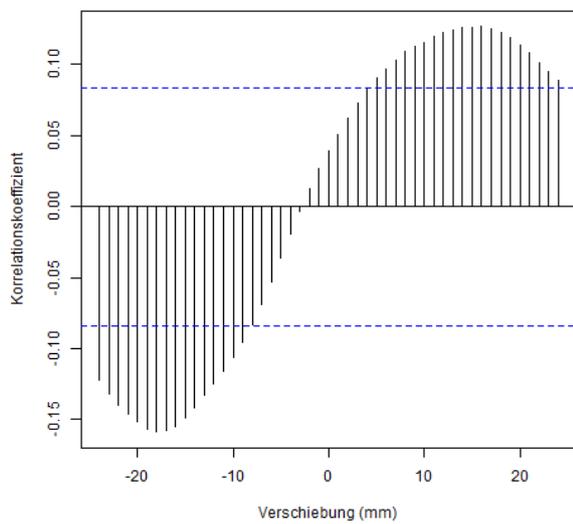
Bag 4006: mittlere Korngröße, Natrium



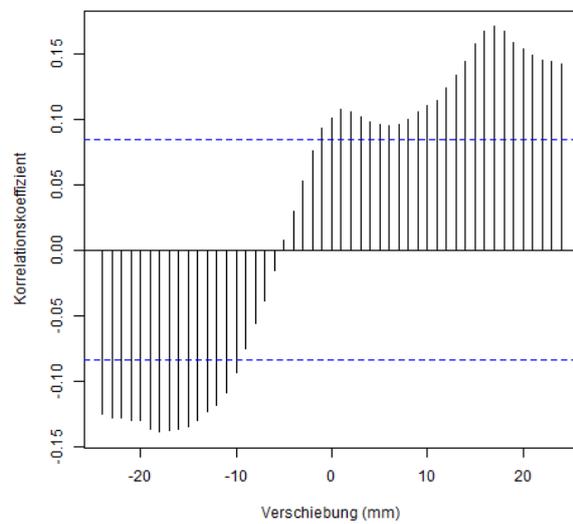
Bag 4006: mittlere Korngröße, Leitfähigkeit



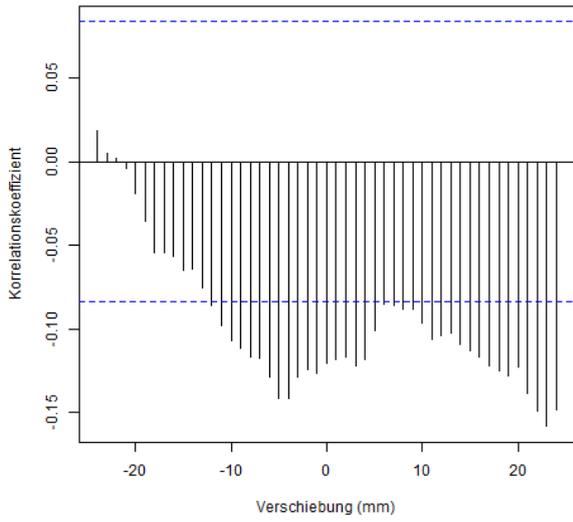
Bag 4006: mittlere Korngröße, Ammonium



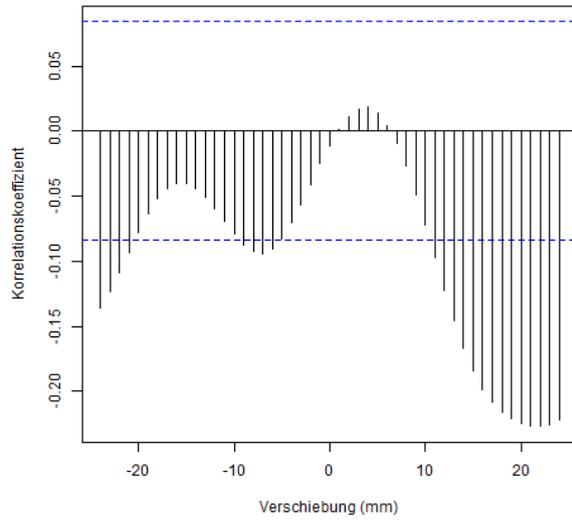
Bag 4006: mittlere Korngröße, Nitrat



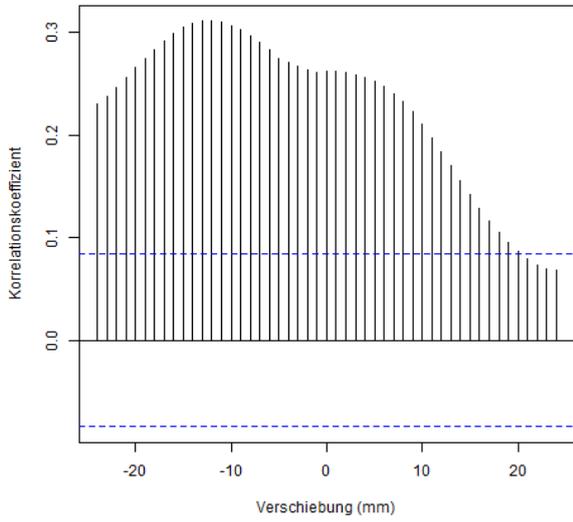
Bag 4006: Eigenwert E3, Anzahl der Staubpartikel



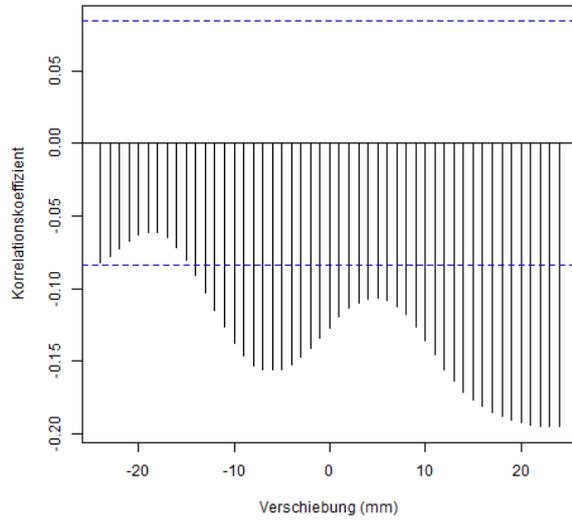
Bag 4006: Eigenwert E3, Calcium



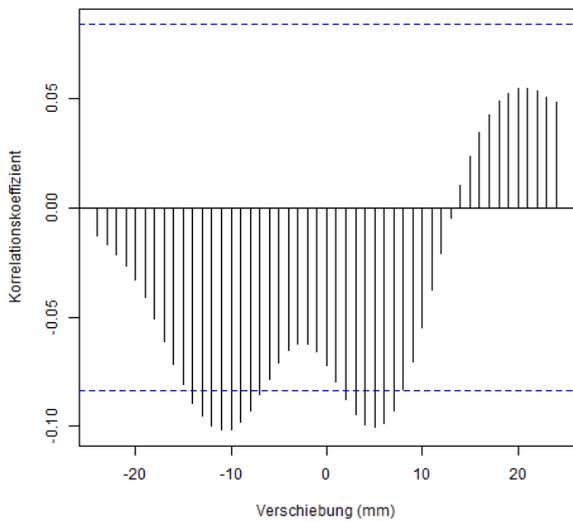
Bag 4006: Eigenwert E3, Natrium



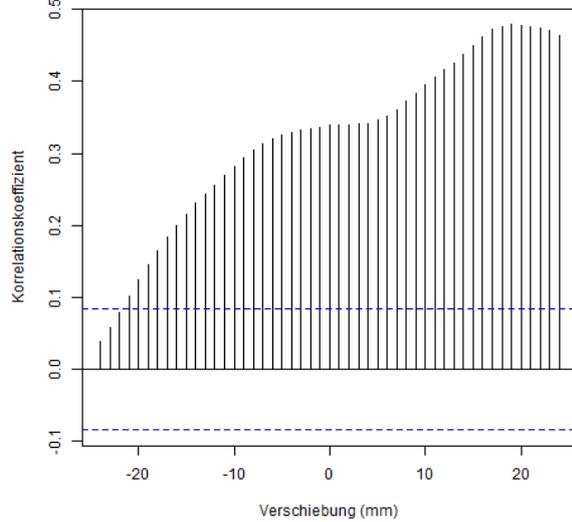
Bag 4006: Eigenwert E3, Leitfähigkeit



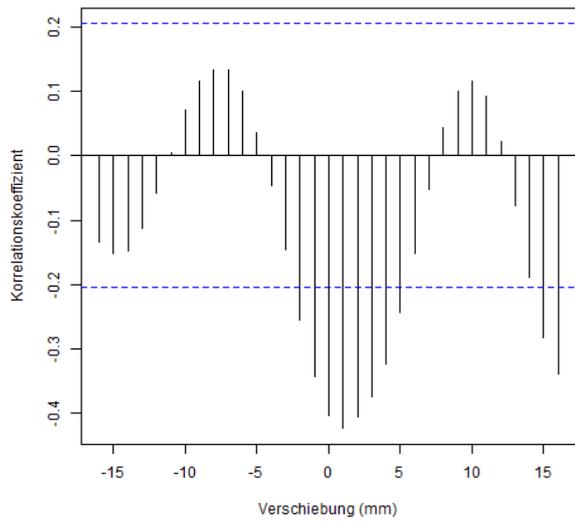
Bag 4006: Eigenwert E3, Ammonium



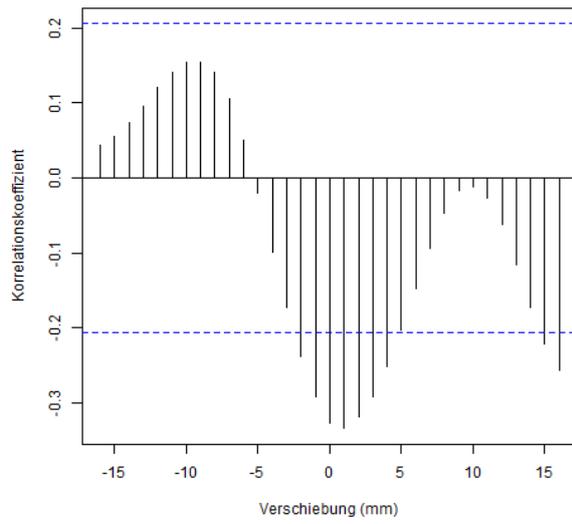
Bag 4006: Eigenwert E3, Nitrat



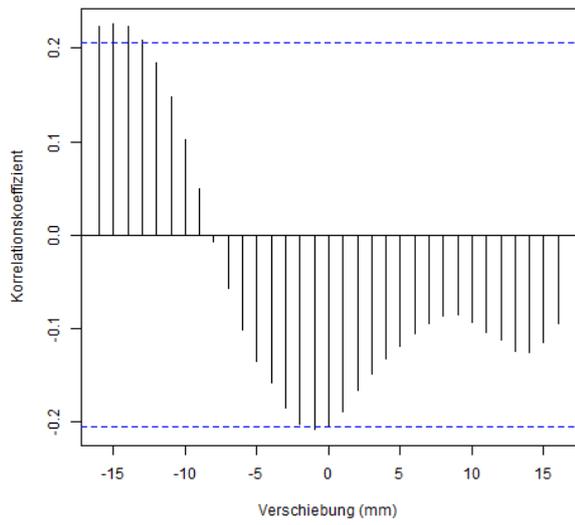
Fallstudie Bag 3356: mittlere Korngröße, Anzahl der Staubpartikel



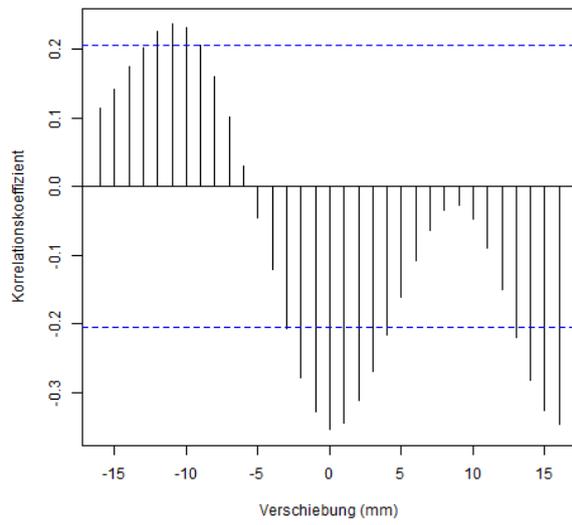
Fallstudie Bag 3356: mittlere Korngröße, Calcium



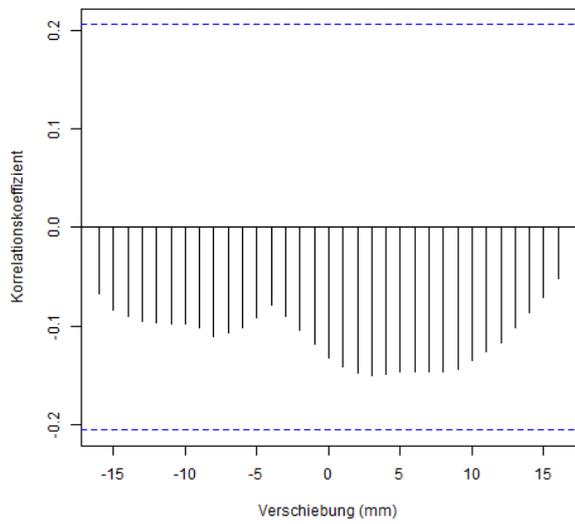
Fallstudie Bag 3356: mittlere Korngröße, Natrium



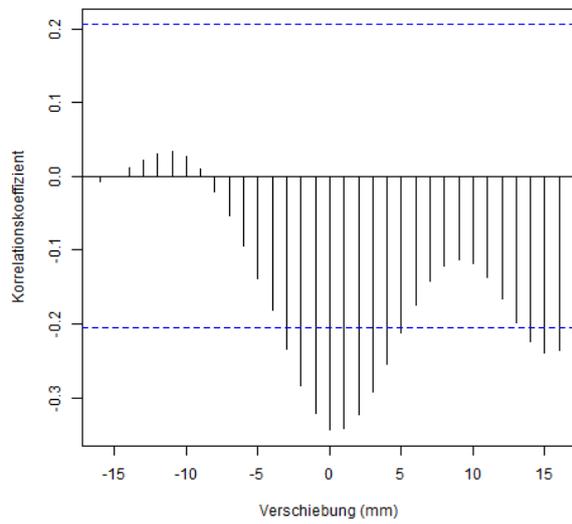
Fallstudie Bag 3356: mittlere Korngröße, Leitfähigkeit



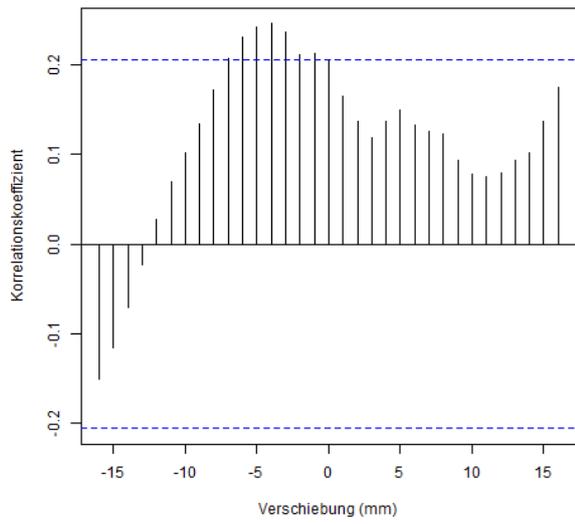
Fallstudie Bag 3356: mittlere Korngröße, Ammonium



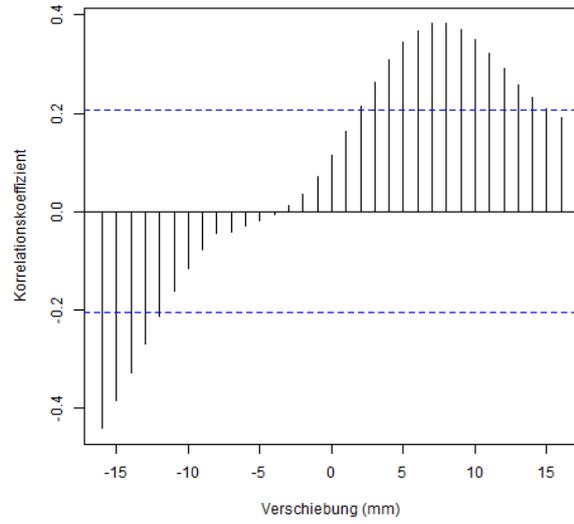
Fallstudie Bag 3356: mittlere Korngröße, Nitrat



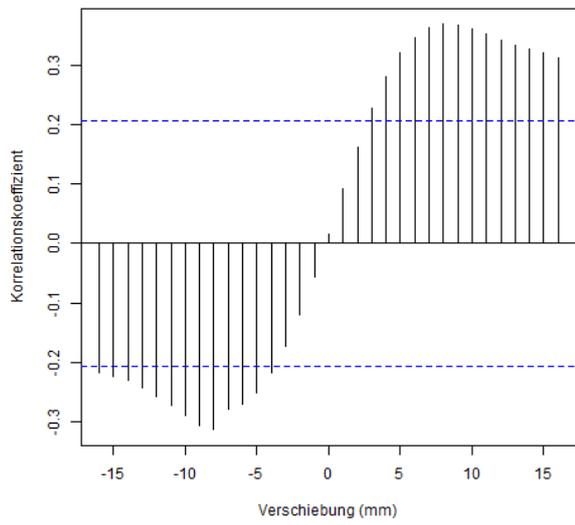
Fallstudie Bag 3356: Eigenwert E3, Anzahl der Staubpartikel



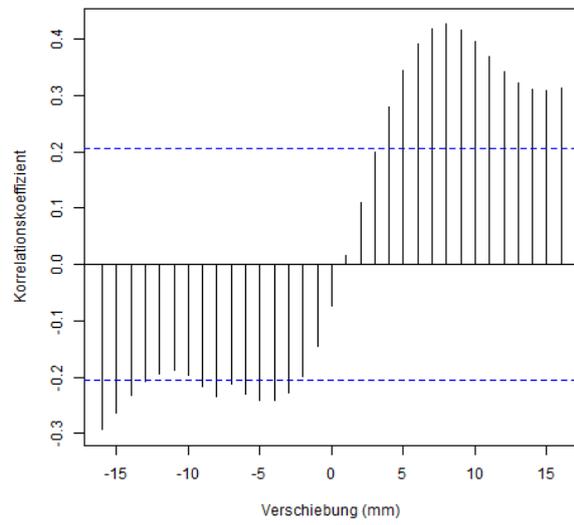
Fallstudie Bag 3356: Eigenwert E3, Calcium



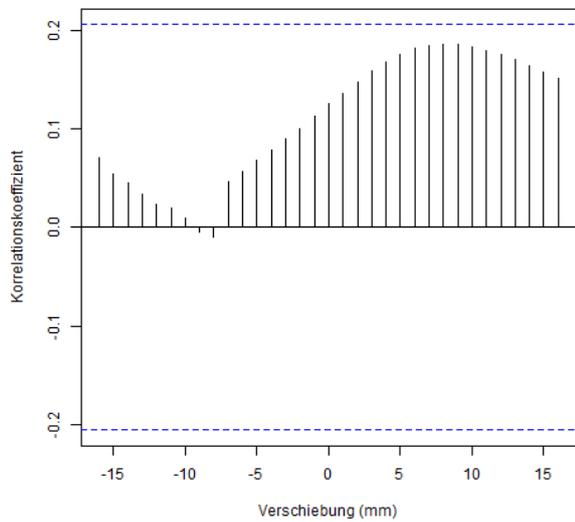
Fallstudie Bag 3356: Eigenwert E3, Natrium



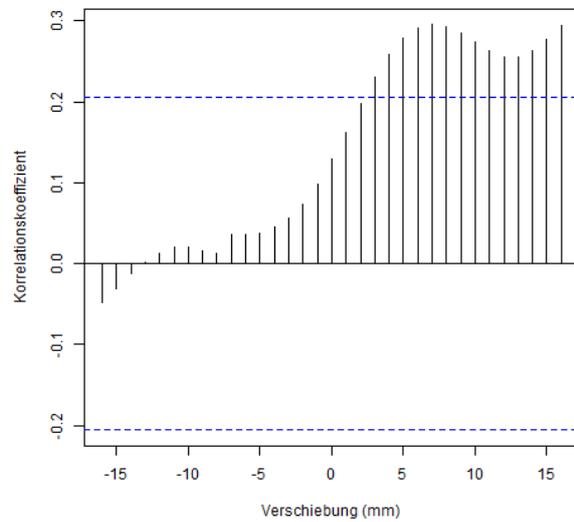
Fallstudie Bag 3356: Eigenwert E3, Leitfähigkeit



Fallstudie Bag 3356: Eigenwert E3, Ammonium



Fallstudie Bag 3356: Eigenwert E3, Nitrat



10.6 Ergebnisse der Korrelationsberechnungen

Ergebnisse der Korrelationsberechnungen nach Pearson. Dargestellt sind die Korrelationskoeffizienten, sowie der p-Wert (grau unterlegt).

Bag 3356	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	-0,08	-0,19	-0,11	-0,08	-0,19	-0,06
	0,12	3,24*10 ⁹	0,02	0,09	1,04*10 ⁻⁴	0,23
Eigenwert E3	-0,02	0,01	-0,04	-0,07	0,10	0,04
	0,71	0,83	0,38	0,13	0,04	0,42

Bag 3876	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,07	-0,45	-0,06	0,07	0,15	0,11
	0,09	0,37*10 ⁻¹⁰	0,18	0,10	0,16*10 ⁻²	0,01
Eigenwert E3	0,04	-0,32	0,11	0,63	0,36	0,36
	0,22*10 ⁻¹⁵	0,27*10 ³	0,02	0,22*10 ⁻¹⁵	0,20	0,47

Bag 3906	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,07	-0,25	-0,55	-0,70	-0,23	-0,10
	0,13	0,88*10 ⁶	0,21*10 ⁻²⁵	0,33*10 ⁶¹	0,50*10 ⁸	0,03
Eigenwert E3	0,27	0,14	0,17	0,10	-0,01	0,22
	0,23*10 ⁶	0,28*10 ⁻²	0,17*10 ⁻³	0,04	0,77	0,16*10 ⁹

Bag 4006	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,12	0,22	-0,12	-0,02	0,04	0,12
	0,01	0,70*10 ⁸	0,02	0,71	0,39	0,01
Eigenwert E3	-0,12	-0,12	0,27	-0,01	-0,07	0,35
	0,01	0,01	0,47*10 ⁶	0,85	0,15	0,12*10 ²

Bag 3356 Fallstudie	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	-0,39	-0,35	-0,20	-0,33	-0,13	-0,33
	$0,19 \cdot 10^{-3}$	$0,12 \cdot 10^{-2}$	0,06	$0,23 \cdot 10^{-2}$	0,22	$0,18 \cdot 10^{-2}$
Eigenwert E3	0,29	-0,08	0,02	0,12	0,21	0,19
	0,02	0,55	0,89	0,38	0,09	0,14

Ergebnisse der Korrelationsberechnungen nach Spearman. Dargestellt sind die Korrelationskoeffizienten, sowie der p-Wert (grau unterlegt).

Bag 3356	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	-0,06	-0,21	-0,14	-0,09	-0,26	-0,05
	0,17	$0,54 \cdot 10^9$	$0,38 \cdot 10^{-2}$	0,06	$0,96 \cdot 10^7$	0,28
Eigenwert E3	-0,05	0	0,01	0,01	0,07	0,06
	0,26	0,96	0,92	0,89	0,14	0,24

Bag 3876	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,06	-0,46	-0,12	0,15	0,08	0,09
	0,22	$0,12 \cdot 10^{-11}$	0,02	$0,76 \cdot 10^{-3}$	0,08	0,05
Eigenwert E3	0,35	-0,29	0,03	0,48	0,32	0,32
	0,97	$0,19 \cdot 10^5$	0,50	$0,55 \cdot 10^{-12}$	$0,14 \cdot 10^4$	$0,43 \cdot 10^3$

Bag 3906	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	-0,02	-0,19	-0,56	-0,62	-0,35	-0,17
	0,67	$0,23 \cdot 10^9$	$0,23 \cdot 10^{-28}$	$0,55 \cdot 10^{40}$	0,68	$0,20 \cdot 10^{-3}$
Eigenwert E3	0,25	0,15	0,17	0,07	0,02	0,25
	$0,38 \cdot 10^7$	$0,93 \cdot 10^{-3}$	$0,29 \cdot 10^{-3}$	0,11	0,74	$0,95 \cdot 10^7$

Bag 4006	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,12	0,13	-0,11	0	0,01	0,06
	0,01	$0,46 \cdot 10^{-2}$	0,01	0,97	0,75	0,19
Eigenwert E3	-0,17	-0,13	0,27	-0,04	0,01	0,32
	$0,21 \cdot 10^{-3}$	$0,43 \cdot 10^{-2}$	$0,78 \cdot 10^5$	0,45	0,87	$0,21 \cdot 10^3$

Bag 3356 Fallstudie	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	-0,48	-0,32	-0,12	-0,31	-0,07	-0,28
	$0,31 \cdot 10^9$	$0,26 \cdot 10^{-2}$	0,27	$0,39 \cdot 10^{-2}$	0,50	0,01
Eigenwert E3	0,17	-0,12	0,06	0,04	0,30	0,14
	0,18	0,39	0,63	0,78	0,02	0,25

Ergebnisse für die Korrelationsberechnung nach Pearson für den 3cm breiten Streifen in Inneren des Kerns, was dazu dienen sollte, den Einfluss der Schrägschichtung zu reduzieren.

Bag 3356	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	-0,04	-0,13	-0,17	-0,06	-0,21	-0,11
	0,43	$0,35 \cdot 10^{-2}$	$0,13 \cdot 10^{-3}$	0,19	$0,90 \cdot 10^9$	0,02
Eigenwert E3	0,03	0,11	0,10	-0,08	0,17	0,12
	0,53	0,01	0,04	0,12	$0,48 \cdot 10^{-3}$	0,01

Bag 3876	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,16	-0,32	0,03	0,07	0,09	0,18
	$0,19 \cdot 10^{-3}$	8,89	0,45	0,13	0,04	$0,31 \cdot 10^9$
Eigenwert E3	0,31	-0,39	0,14	0,46	0,29	0,42
	$0,13 \cdot 10^3$	$0,23 \cdot 10^{-4}$	$0,21 \cdot 10^{-2}$	$0,22 \cdot 10^{-15}$	$0,18 \cdot 10^5$	$0,22 \cdot 10^{-15}$

Bag 3906	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,16	-0,13	-0,42	-0,60	-0,24	-0,01
	$0,27 \cdot 10^{-3}$	$0,26 \cdot 10^{-2}$	$0,75 \cdot 10^{-9}$	$0,12 \cdot 10^{-38}$	$0,41 \cdot 10^6$	0,84
Eigenwert E3	0,07	-0,18	0	-0,15	-0,08	0,03
	0,10	$0,31 \cdot 10^{10}$	0,95	$0,42 \cdot 10^{-3}$	0,06	0,56

Bag 4006	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,08	0,25	-0,11	-0,13	0,01	0,06
	0,08	$0,42 \cdot 10^6$	0,01	$0,27 \cdot 10^{-2}$	0,88	0,15
Eigenwert E3	-0,4	-0,02	0,05	-0,09	-0,03	0,33
	0,32	0,62	0,25	0,05	0,57	0,67

Ergebnisse für die Korrelationsberechnung nach Spearman für den 3cm breiten Streifen in Inneren des Kerns, was dazu dienen sollte, den Einfluss der Schrägschichtung zu reduzieren

Bag 3356	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	-0,01	-0,08	-0,17	-0,05	-0,26	-0,08
	0,77	0,07	$0,23 \cdot 10^{-3}$	0,24	$0,28 \cdot 10^6$	0,08
Eigenwert E3	0,06	0,09	0,19	-0,01	0,12	0,16
	0,23	0,04	$0,38 \cdot 10^{10}$	0,84	0,01	$0,68 \cdot 10^{-3}$

Bag 3876	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,11	-0,33	-0,02	0,14	0,05	0,15
	$0,82 \cdot 10^{-2}$	0,76	0,68	$0,13 \cdot 10^{-2}$	0,24	$0,86 \cdot 10^{-3}$
Eigenwert E3	0,34	-0,39	0,08	0,45	0,37	0,39
	0,67	$0,14 \cdot 10^{-4}$	0,09	$0,36 \cdot 10^{-11}$	$0,21 \cdot 10^{-2}$	$0,10 \cdot 10^{-4}$

Bag 3906	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0	-0,13	-0,46	-0,50	-0,35	-0,12
	0,93	$0,30 \cdot 10^{-2}$	$0,67 \cdot 10^{-14}$	$0,35 \cdot 10^{-20}$	0,09	$0,53 \cdot 10^{-2}$
Eigenwert E3	0,02	-0,18	-0,08	-0,09	-0,01	-0,04
	0,72	$0,33 \cdot 10^{10}$	0,08	0,04	0,84	0,40

Bag 4006	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,10	0,16	-0,12	-0,13	-0,02	0,07
	0,02	$0,20 \cdot 10^{-3}$	$0,51 \cdot 10^{-2}$	$0,32 \cdot 10^{-2}$	0,72	0,10
Eigenwert E3	-0,09	-0,02	0,07	-0,05	0,10	0,29
	0,06	0,61	0,14	0,26	0,03	$0,60 \cdot 10^4$

Ergebnisse für die Korrelationsberechnung nach Pearson für die einzelnen Abschnitte des Bags 3356 (Abschnitt 201 entspricht der Fallstudie)

Bag 3356 (101)	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	-0,21	0,17	0,19	0,29	-0,04	0,12
	0,06	0,15	0,10	0,02	0,77	0,33
Eigenwert E3	-0,25	0,33	0,05	-0,14	0,49	-0,29
	0,03	$0,33 \cdot 10^{-2}$	0,71	0,30	$0,22 \cdot 10^{-3}$	0,01

Bag 3356 (301)	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,14	-0,10	0,66	0,47	0,34	0,75
	0,37	0,52	$0,51 \cdot 10^9$	$0,42 \cdot 10^{-2}$	0,03	$0,78 \cdot 10^7$
Eigenwert E3	0,34	0,30	0,74	0,33	0,47	0,64
	0,02	0,05	$0,10 \cdot 10^7$	0,05	$0,23 \cdot 10^{-2}$	$0,23 \cdot 10^{10}$

Bag 3356 (401)	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,11	-0,09	-0,13	-0,16	-0,39	-0,07
	0,35	0,43	0,24	0,16	$0,12 \cdot 10^{-2}$	0,09
Eigenwert E3	-0,11	-0,20	-0,21	-0,12	-0,17	-0,12
	0,32	0,06	0,04	0,26	0,16	0,64

Bag 3356 (501)	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	-0,01	-0,06	-0,02	-0,08	-0,39	-0,07
	0,89	0,60	0,88	0,46	$0,12 \cdot 10^{-3}$	0,53
Eigenwert E3	-0,01	-0,02	-0,15	-0,03	-0,18	-0,12
	0,91	0,86	0,17	0,81	0,09	0,27

Bag 3356 (601)	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,02	-0,41	-0,33	-0,58	-0,78	-0,49
	0,88	$0,15 \cdot 10^{-3}$	$0,33 \cdot 10^{-2}$	$0,68 \cdot 10^7$	0,08	$0,77 \cdot 10^9$
Eigenwert E3	0	-0,13	-0,18	-0,15	-0,18	-0,10
	0,99	0,26	0,14	0,24	0,15	0,42

Ergebnisse für die Korrelationsberechnung nach Spearman für die einzelnen Abschnitte des Bags 3356 (Abschnitt 201 entspricht der Fallstudie):

Bag 3356 (101)	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	-0,15	0,15	0,21	0,38	-0,20	0,27
	0,21	0,19	0,08	$0,27 \cdot 10^{-2}$	0,16	0,02
Eigenwert E3	-0,22	0,26	-0,03	-0,02	0,48	-0,22
	0,05	0,02	0,81	0,87	$0,64 \cdot 10^{-3}$	0,06

Bag 3356 (301)	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,21	0,27	0,64	0,55	0,39	0,75
	0,16	0,06	$0,11 \cdot 10^{10}$	$0,46 \cdot 10^{-3}$	0,01	$0,81 \cdot 10^7$
Eigenwert E3	0,45	0,41	0,80	0,33	0,52	0,78
	$0,20 \cdot 10^{-2}$	$0,57 \cdot 10^{-2}$	$0,14 \cdot 10^6$	0,05	$0,62 \cdot 10^{-3}$	$0,13 \cdot 10^7$

Bag 3356 (401)	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,09	-0,15	-0,18	-0,12	-0,43	-0,11
	0,44	0,18	0,12	0,29	$0,23 \cdot 10^{-3}$	0,32
Eigenwert E3	-0,21	-0,20	-0,25	-0,02	0,18	0,12
	0,04	0,06	0,02	0,88	0,11	0,25

Bag 3356 (501)	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	0,11	-0,03	-0,02	-0,01	-0,38	0,02
	0,32	0,80	0,83	0,90	$0,23 \cdot 10^{-3}$	0,84
Eigenwert E3	-0,04	0,05	0,01	0	-0,09	-0,01
	0,68	0,64	0,94	0,99	0,38	0,95

Bag 3356 (601)	Anzahl der Staubpartikel	Leitfähigkeit	Natrium	Kalzium	Ammonium	Nitrat
mittlere Korngröße	-0,09	-0,32	-0,29	-0,61	-0,75	-0,45
	0,44	$0,34 \cdot 10^{-2}$	0,01	$0,12 \cdot 10^7$	1,33	$0,44 \cdot 10^9$
Eigenwert E3	-0,07	-0,21	-0,25	-0,13	-0,18	-0,13
	0,53	0,07	0,04	0,29	0,15	0,28

10.7 Ergebnisse der Faktorenanalyse

Bag 3356:

Call:

```
factanal(factors = 3, covmat = cor(bag3356m, use = "pairwise. complete.obs"), rotation = "varimax")
```

Uniquenesses:

Conductivity	Na ⁺	Ca ²⁺	Dust	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
0.201	0.423	0.518	0.370	0.014	0.005
Mean Grain Size	Eigenvalue 3				
0.908	0.974				

Loadings:

	Factor1	Factor2	Factor3
Conductivity	0.478	0.755	-0.010
Na ⁺	0.480	0.516	-0.285
Ca ²⁺	0.339	-0.019	-0.605
Dust	0.767	0.091	-0.180
NH ₄ ⁺	0.319	0.608	0.717
NO ₃ ⁻	0.947	0.221	0.222
Mean Grain Size	0.010	-0.303	-0.008
Eigenvalue 3	0.011	-0.025	0.159

	Factor1	Factor2	Factor3
SS loadings	2.162	1.356	1.069
Proportion Var	0.270	0.170	0.134
Cumulative Var	0.270	0.440	0.573

The degrees of freedom for the model is 7 and the fit was 0.3284

Bag 3876:

Call:

```
factanal(factors = 3, covmat = cor(bag3876m, use = "pair-  
wise.complete.obs"), rotation = "varimax")
```

Uniquenesses:

Conductivity	Na ⁺	Ca ²⁺	Dust	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
0.005	0.235	0.067	0.539	0.748	0.005
Mean Grain Size	Eigenvalue 3				
0.766	0.453				

Loadings:

	Factor1	Factor2	Factor3
Conductivity	0.007	0.266	0.961
Na ⁺	0.099	0.853	0.169
Ca ²⁺	0.895	0.351	-0.095
Dust	0.510	0.447	0.039
NH ₄ ⁺	0.481	0.117	0.083
NO ₃ ⁻	0.476	0.872	-0.093
Mean Grain Size	0.051	0.052	-0.479
Eigenvalue 3	0.654	0.020	-0.344

	Factor1	Factor2	Factor3
SS loadings	1.960	1.897	1.326
Proportion Var	0.245	0.237	0.166
Cumulative Var	0.245	0.482	0.648

The degrees of freedom for the model is 7 and the fit was 0.6075

Bag 3906:

Call:

```
factanal(factors = 3, covmat = cor(bag3906m, use = "pair-  
wise.complete.obs"), rotation = "varimax")
```

Uniquenesses:

Conductivity	Na ⁺	Ca ²⁺	Dust	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
0.222	0.267	0.038	0.407	0.005	0.126
Mean Grain Size	Eigenvalue 3				
0.474	0.936				

Loadings:

	Factor1	Factor2	Factor3
Conductivity	0.763	0.348	-0.272
Na ⁺	0.424	0.698	-0.256
Ca ²⁺	0.040	0.965	0.167
Dust	0.751	-0.067	-0.155
NH ₄ ⁺	-0.198	0.160	0.964
NO ₃ ⁻	0.921	0.069	-0.145
Mean Grain Size	-0.065	-0.711	-0.130
Eigenvalue 3	0.240	0.078	0.021

	Factor1	Factor2	Factor3
SS loadings	2.277	2.087	1.160
Proportion Var	0.285	0.261	0.145
Cumulative Var	0.285	0.546	0.691

The degrees of freedom for the model is 7 and the fit was 0.2582

Bag 4006:

Call:
factanal(factors = 3, covmat = cor(bag4006m, use = "pair-
wise.complete.obs"), rotation = "varimax")

Uniquenesses:

Conductivity	Na ⁺	Ca ²⁺	Dust	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
0.809	0.005	0.884	0.845	0.005	0.690
Mean Grain Size	Eigenvalue 3				
0.889	0.005				

Loadings:

	Factor1	Factor2	Factor3
Conductivity	-0.131	0.361	-0.208
Na ⁺	-0.412	0.905	0.078
Ca ²⁺	0.246	-0.232	0.038
Dust	-0.025	-0.392	-0.028
NH ₄ ⁺	0.975	-0.204	-0.049
NO ₃ ⁻	0.436	0.012	0.345
Mean Grain Size	0.028	-0.130	0.305
Eigenvalue 3	0.026	0.228	0.971

	Factor1	Factor2	Factor3
SS loadings	1.392	1.267	1.209
Proportion Var	0.174	0.158	0.151
Cumulative Var	0.174	0.332	0.483

The degrees of freedom for the model is 7 and the fit was 0.3581

Bag 3356 (Fallstudie):

Call:

```
factanal(factors = 3, covmat = cor(bag3356fsm, use = "pair-  
wise.complete.obs"), rotation = "varimax")
```

Uniquenesses:

Conductivity	Na ⁺	Ca ²⁺	Dust	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
0.005	0.200	0.147	0.005	0.005	0.038

Mean Grain Size	Eigenvalue 3
0.829	0.776

Loadings:

	Factor1	Factor2	Factor3
Conductivity	0.960	0.272	-0.014
Na ⁺	0.889	-0.040	-0.092
Ca ²⁺	0.906	-0.161	0.081
Dust	0.641	0.201	0.738
NH ₄ ⁺	-0.144	0.972	0.170
NO ₃ ⁻	0.467	0.779	0.369
Mean Grain Size	-0.324	-0.147	-0.211
Eigenvalue 3	-0.099	0.118	0.448

	Factor1	Factor2	Factor3
SS loadings	3.297	1.730	0.969
Proportion Var	0.412	0.216	0.121
Cumulative Var	0.412	0.628	0.749

The degrees of freedom for the model is 7 and the fit was 1.9561

10.8 Skripte für die Arbeiten in R

Skript für das Erstellen der Plots (Beispiel):

```
# Arbeitsverzeichnis festlegen

setwd("C:/Users/ina/Documents/uni/BA/Inas Dateien/bags/daten/einlesen")

# Einlesen der Dateien und Benennen der Spalten

bag3356<-read.delim("3356_rm_cfa_E.txt", sep="\t", header=TRUE, dec=".")
bag3356m<-as.matrix(bag3356)

woodcockparameter<-bag3356m[,10]
Depth<-bag3356m[,11]
Conductivity<-bag3356m[,12]
Natrium<-bag3356m[,13]
Calcium<-bag3356m[,14]
Dust<-bag3356m[,15]
NH4<-bag3356m[,16]
NO3<-bag3356m[,17]
pH<-bag3356m[,18]

bag3356rm<-read.delim("3356_rm_neu_E.txt", sep="\t", header=TRUE, dec=".")
bag3356rm_m<-as.matrix(bag3356rm)

FrameYCenter_P<-bag3356rm_m[,1]      # FrameYCenter in pixel
FrameYCenter<-bag3356rm_m[,2]      # FrameYCenter in cm
NrofGrains<-bag3356rm_m[,3]
MeanGrainSize_P<-bag3356rm_m[,4]    # Mean Grain Size in pixel
MeanGrainSize<-bag3356rm_m[,5]     # Mean Grain Size in mm
Eigenvalue3<-bag3356rm_m[,7]

# Tiefeninformation und Bagnummer

Nummer <- "Bag 3356"
bag <- 3356
top <- (bag-1)*0.55
bottom <- bag*0.55

# Angaben zu Seitenrändern, Plotbereich, Abstand der Plots usw.

par(mfrow=c(5,1), las=1, oma=c(9,2,9,2), mgp=c(4,1,0))
par(mar = c(1, 5, 0, 4))

plot(Depth, NH4, type="l", col="green", lwd=1, xaxt="n", xlab="",
ylab="NH4+ (ng/g)", xlim=c(1845.25,1845.8), cex.axis=0.9)

par(new=TRUE)
plot(Depth, NO3, type="l", col="black", lwd=1, axes=FALSE, bty = "n", xlab
= "", ylab = "", xlim=c(1845.25,1845.8))
axis(side=4, cex.axis=0.9)
mtext("NO3- (ng/g)", side=4, line=3, cex=0.7, las=0)
legend("topright", c("NH4+ (ng/g)", "NO3- (ng/g)"), col=c("green",
"black"), lty=1, lwd=1, cex=0.9)
par(new=TRUE)
plot(FrameYCenter, woodcockparameter, 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)
```

```

par(mar=c(1, 5, 0, 4))
plot(Depth, Conductivity, type="l", col="darkgreen", lwd=1, xaxt="n",
xlab="", ylab="Leitfähigkeit (mikros/cm)", xlim=c(1845.25,1845.8),
cex.axis=0.9)

par(mar=c(1, 5, 0, 4))
plot(Depth, Natrium, type="l", col="violet", lwd=1, xaxt="n", xlab="",
ylab="Na+ (ng/g)", xlim=c(1845.25,1845.8), cex.axis=0.9)
par(new=TRUE)
plot(Depth, Calcium, type="l", col="darkcyan", lwd=1, axes=FALSE, bty =
"n", xlab = "", ylab = "", xlim=c(1845.25,1845.8))
axis(side=4, cex.axis=0.9)
mtext("Ca++ (ng/g)", side=4, line=3, cex=0.7, las=0)
legend("topright", c("Natrium (ng/g)", "Calcium (ng/g)"), col=c("violet",
"darkcyan"), lty=1, lwd=1, cex=0.9)

par(mar=c(1, 5, 0, 4))
plot(Depth, Eigenvalue3, type="l", col="orange", lwd=1, xaxt="n", xlab="",
ylab="Eigenwert E3", xlim=c(1845.25,1845.8), cex.axis=0.9)

par(mar=c(1, 5, 0, 4))
plot(Depth, Dust, type="l", col="blue", lwd=1, xaxt="n", xlab="",
ylab="Anzahl Staubpartikel/ml", xlim=c(1845.25,1845.8), cex.axis=0.9)
axis(side=1, cex.axis=0.9)
mtext("Absolute Tiefe (m)", side=1, line=3, cex=0.7, las=0)
par(new=TRUE)
plot(Depth, MeanGrainSize, type="l", col="red", lwd=1, axes=FALSE, bty =
"n", xlab = "", ylab = "", xlim=c(1845.25,1845.8))
axis(side=4, cex.axis=0.9)
mtext("Mittlere Korngröße (mm²)", side=4, line=3, cex=0.7, las=0)
legend("topright", c("Anzahl Staubpartikel/ml", "Mittlere Korngröße
(mm²)"), col=c("blue", "red"), lty=1, lwd=1, cex=0.9)

mtext(substitute(paste("Bagnummer: ",k," , Top-Tiefe: ",l, "m , Bottom-
Tiefe: ",m,"m")), list(k= Nummer, l= top, m= bottom), side=3,line=6,
cex=0.9, outer=TRUE)

```

Skript für die Korrelationsberechnungen (Beispiel):

```
# Festlegen des Arbeitsverzeichnis und Einlesen der Dateien

setwd("C:/Users/ina/Documents/uni/BA/Inas Dateien/bags/daten/original_einlesen")

bag3356<-read.delim("3356_rm_cfa_E.txt", sep="\t", header=TRUE, dec=".")
bag3356m<-as.matrix(bag3356)

Conductivity3356<-bag3356m[,12]
Natrium3356<-bag3356m[,13]
Calcium3356<-bag3356m[,14]
Dust3356<-bag3356m[,15]
NH43356<-bag3356m[,16]
NO33356<-bag3356m[,17]

bag3356rm<-read.delim("3356_rm_neu_E.txt", sep="\t", header=TRUE, dec=".")
bag3356rm_m<-as.matrix(bag3356rm)

MeanGrainSize3356<-bag3356rm_m[,5]
Eigenvalue33356<-bag3356rm_m[,7]

# Berechnen der Korrelation nach Spearman

MGSD3356<-round(cor(MeanGrainSize3356, Dust3356, method=c("spearman"),
use="complete.obs"), digits=6)
MGSCO3356<-round(cor(MeanGrainSize3356, Conductivity3356, method=c("spearman"),
use="complete.obs"), digits=6)
MGSN3356<-round(cor(MeanGrainSize3356, Natrium3356, method=c("spearman"),
use="complete.obs"), digits=6)
MGSC3356<-round(cor(MeanGrainSize3356, Calcium3356, method=c("spearman"),
use="complete.obs"), digits=6)
MGSNH3356<-round(cor(MeanGrainSize3356, NH43356, method=c("spearman"),
use="complete.obs"), digits=6)
MGSNO3356<-round(cor(MeanGrainSize3356, NO33356, method=c("spearman"),
use="complete.obs"), digits=6)
E3D3356<-round(cor(Eigenvalue33356, Dust3356, method=c("spearman"),
use="complete.obs"), digits=6)
E3CO3356<-round(cor(Eigenvalue33356, Conductivity3356, method=c("spearman"),
use="complete.obs"), digits=6)
E3N3356<-round(cor(Eigenvalue33356, Natrium3356, method=c("spearman"),
use="complete.obs"), digits=6)
E3C3356<-round(cor(Eigenvalue33356, Calcium3356, method=c("spearman"),
use="complete.obs"), digits=6)
E3NH3356<-round(cor(Eigenvalue33356, NH43356, method=c("spearman"),
use="complete.obs"), digits=6)
E3NO3356<-round(cor(Eigenvalue33356, NO33356, method=c("spearman"),
use="complete.obs"), digits=6)

# Signifikanztest, Berechnen des p-Wertes

MGSDP3356<-cor.test(MeanGrainSize3356, Dust3356, method=c("spearman"),
use="complete.obs", exact=FALSE)
MGSCOP3356<-cor.test(MeanGrainSize3356, Conductivity3356, method=c("spearman"),
use="complete.obs", exact=FALSE)
MGSNP3356<-cor.test(MeanGrainSize3356, Natrium3356, method=c("spearman"),
use="complete.obs", exact=FALSE)
MGSCP3356<-cor.test(MeanGrainSize3356, Calcium3356, method=c("spearman"),
use="complete.obs", exact=FALSE)
MGSNHP3356<-cor.test(MeanGrainSize3356, NH43356, method=c("spearman"),
use="complete.obs", exact=FALSE)
MGSNOP3356<-cor.test(MeanGrainSize3356, NO33356, method=c("spearman"),
use="complete.obs", exact=FALSE)
E3DP3356<-cor.test(Eigenvalue33356, Dust3356, method=c("spearman"),
use="complete.obs", exact=FALSE)
```

```

E3COP3356<-cor.test(Eigenvalue33356, Conductivity3356, meth-
od=c("spearman"), use="complete.obs", exact=FALSE)
E3NP3356<-cor.test(Eigenvalue33356, Natrium3356, method=c("spearman"),
use="complete.obs", exact=FALSE)
E3CP3356<-cor.test(Eigenvalue33356, Calcium3356, method=c("spearman"),
use="complete.obs", exact=FALSE)
E3NHP3356<-cor.test(Eigenvalue33356, NH43356, method=c("spearman"),
use="complete.obs", exact=FALSE)
E3NOP3356<-cor.test(Eigenvalue33356, NO33356, method=c("spearman"),
use="complete.obs", exact=FALSE)

```

p-wert herausfiltern

```

MGSD3356P<-MGSDP3356$p.value
MGSC03356P<-MGSCOP3356$p.value
MGSN3356P<-MGSNP3356$p.value
MGSC3356P<-MGSCP3356$p.value
MGSNH3356P<-MGSNHP3356$p.value
MGSNO3356P<-MGSNOP3356$p.value
E3D3356P<-E3DP3356$p.value
E3C03356P<-E3COP3356$p.value
E3N3356P<-E3NP3356$p.value
E3C3356P<-E3CP3356$p.value
E3NH3356P<-E3NHP3356$p.value
E3NO3356P<-E3NOP3356$p.value

```

Zusammenfassen der berechneten Werte zu einer Tabelle (txt-Datei)

```

D3356<-c(MGSD3356, E3D3356)
C03356<-c(MGSC03356, E3C03356)
N3356<-c(MGSN3356, E3N3356)
C3356<-c(MGSC3356, E3C3356)
NH3356<-c(MGSNH3356, E3NH3356)
NO3356<-c(MGSNO3356, E3NO3356)

```

```

PD3356<-c(MGSD3356P, E3D3356P)
PC03356<-c(MGSC03356P, E3C03356P)
PN3356<-c(MGSN3356P, E3N3356P)
PC3356<-c(MGSC3356P, E3C3356P)
PNH3356<-c(MGSNH3356P, E3NH3356P)
PNO3356<-c(MGSNO3356P, E3NO3356P)

```

```

Kor3356P<-cbind(D3356, PD3356, C03356, PC03356, N3356, PN3356, C3356,
PC3356, NH3356, PNH3356, NO3356, PNO3356)

```

```

write.table(Kor3356P, file = "Kor3356P_spearman.txt", sep = "\t")

```

Berechnen der Kreuzkorrelation (abgespeichert als .png)

```

png("ccfMGSD3356.png")
ccf(MeanGrainSize3356, Dust3356, type=c("correlation"), na.action=na.pass,
plot=T, xlab="Verschiebung (mm)", ylab="Korrelationskoeffizient", main="Bag
3356: mittlere Korngröße, Anzahl der Staubpartikel")
dev.off()
png("ccfMGSC03356.png")
ccf(MeanGrainSize3356, Conductivity3356, type=c("correlation"),
na.action=na.pass, plot=T, xlab="Verschiebung (mm)",
ylab="Korrelationskoeffizient", main="Bag 3356: mittlere Korngröße, Leitfä-
higkeit")
dev.off()
png("ccfMGSN3356.png")
ccf(MeanGrainSize3356, Natrium3356, type=c("correlation"),
na.action=na.pass, plot=T, xlab="Verschiebung (mm)",
ylab="Korrelationskoeffizient", main="Bag 3356: mittlere Korngröße, Natri-
um")
dev.off()
png("ccfMGSC3356.png")
ccf(MeanGrainSize3356, Calcium3356, type=c("correlation"),
na.action=na.pass, plot=T, xlab="Verschiebung (mm)",

```

```

ylab="Korrelationskoeffizient", main="Bag 3356: mittlere Korngröße, Calcium")
dev.off()
png("ccfMGSNH3356.png")
ccf(MeanGrainSize3356, NH43356, type=c("correlation"), na.action=na.pass,
plot=T, xlab="Verschiebung (mm)", ylab="Korrelationskoeffizient", main="Bag
3356: mittlere Korngröße, Ammonium")
dev.off()
png("ccfMGSNO3356.png")
ccf(MeanGrainSize3356, NO33356, type=c("correlation"), na.action=na.pass,
plot=T, xlab="Verschiebung (mm)", ylab="Korrelationskoeffizient", main="Bag
3356: mittlere Korngröße, Nitrat")
dev.off()
png("ccfE3D3356.png")
ccf(Eigenvalue33356, Dust3356, type=c("correlation"), na.action=na.pass,
plot=T, xlab="Verschiebung (mm)", ylab="Korrelationskoeffizient", main="Bag
3356: Eigenwert E3, Anzahl der Staubpartikel")
dev.off()
png("ccfE3C03356.png")
ccf(Eigenvalue33356, Conductivity3356, type=c("correlation"),
na.action=na.pass, plot=T, xlab="Verschiebung (mm)",
ylab="Korrelationskoeffizient", main="Bag 3356: Eigenwert E3, Leitfähig-
keit")
dev.off()
png("ccfE3N3356.png")
ccf(Eigenvalue33356, Natrium3356, type=c("correlation"), na.action=na.pass,
plot=T, xlab="Verschiebung (mm)", ylab="Korrelationskoeffizient", main="Bag
3356: Eigenwert E3, Natrium")
dev.off()
png("ccfE3C3356.png")
ccf(Eigenvalue33356, Calcium3356, type=c("correlation"), na.action=na.pass,
plot=T, xlab="Verschiebung (mm)", ylab="Korrelationskoeffizient", main="Bag
3356: Eigenwert E3, Calcium")
dev.off()
png("ccfE3NH3356.png")
ccf(Eigenvalue33356, NH43356, type=c("correlation"), na.action=na.pass,
plot=T, xlab="Verschiebung (mm)", ylab="Korrelationskoeffizient", main="Bag
3356: Eigenwert E3, Ammonium")
dev.off()
png("ccfE3NO3356.png")
ccf(Eigenvalue33356, NO33356, type=c("correlation"), na.action=na.pass,
plot=T, xlab="Verschiebung (mm)", ylab="Korrelationskoeffizient", main="Bag
3356: Eigenwert E3, Nitrat")
dev.off()

```