



Alfred-Wegener-Institut für
Polar- und Meeresforschung
Bremerhaven



Institut für Geologie
und Mineralogie
Universität zu Köln

Die Orientierungen der C-Achsen im NEEM Eiskern (Grönland)

Bachelorarbeit

vorgelegt von: Jakub Surma
Bremerhaven und Köln, 2011

zur Erlangung des Titels:

Bachelor of Science Geowissenschaften

Prüfung durch:

Dr. Ilka Weikusat (Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven)

Prof. Dr. Reiner Kleinschrodt (Institut für Geologie und Mineralogie, Universität zu Köln)

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation	4
2. Grundlagen	6
2.1 Einführung in das NEEM Projekt (North Greenland Eemian Ice Drilling).....	6
2.2 Lokation.....	7
2.3 Gletschereis	7
2.4 Eigenschaften von Eis.....	8
2.4.1 Kristallographie	8
2.4.2 Mechanische Eigenschaften	10
2.4.3 Optische Eigenschaften	14
2.4.4 C-Achsenorientierungen	15
2.5 Statistische Parameter von C-Achsenorientierungen	17
2.6 Laborarbeit	21
2.6.1 Geräte	21
2.6.2 Proben/Material	22
2.6.3 Probenpräparation	22
2.6.4 Messung und Datenaufnahme.....	24
3. Datenanalyse & -verarbeitung	25
3.1 Verwendete Software	25
3.2 Arbeitsschritte der Datenverarbeitung	25
3.3 Statistik.....	28
3.4 Probleme bei der Datenverarbeitung	29
3.4.1 NIPR-Daten	29
3.4.2 Lücken in den Datensätzen	30
3.5 <i>Running mean</i> -Methode	31
4. Ergebnisse und Darstellung	33
4.1 Statistische Parameter	34
4.2 Schmidt-Diagramme	36
5. Interpretation der Daten	39
5.1 Interpretation der C-Achsenverteilungen im NEEM Eiskern	39
5.1.1 Schwache Einregelung (89 m - 800 m).....	39
5.1.2 Gürtelverteilung (800 m - 1400 m)	40
5.1.3 <i>Single maximum</i> (1600 m - 2200 m)	40
5.1.4 Starke Variationen (2200 m - 2533 m).....	41
5.1.4.1 Faltungshypothese.....	41
5.1.4.2 Rekristallisationshypothese	42
5.1.4.3 Scherhorizonthypothese.....	44
5.2 Variabilität der Messparameter	44

6. Vergleich und Gegenüberstellung zu NorthGRIP-Daten	45
6.1 Einführung NorthGRIP.....	45
6.2 C-Achsenverteilungen des NorthGRIP Eiskerns.....	45
6.3 Vergleich von NorthGRIP und NEEM.....	47
7. Zusammenfassung	51
8. Literatur- und Abbildungsnachweise	54
9. Anhang	59
9.1 Schmidt-Diagramme der NEEM C-Achsenverteilungen	60
9.2 Datentabelle	68
9.3 Falschfarbenbilder der NEEM Proben	76
9.4 Schmidt-Diagramme der NorthGRIP C-Achsenverteilungen	114
9.5 Poster: <i>Folds and other microstructure variations in the NEEM ice core (Greenland) (Weikusat, I. et al., 2011)</i>	116

Danksagung

An erster Stelle möchte ich Dr. Ilka Weikusat für die Vergabe des interessanten Arbeitsthemas und die hervorragende Betreuung in Bremerhaven danken.

Danken will ich auch Prof. Dr. Reiner Kleinschrodt für die ausgezeichnete Betreuung seitens des Kölner Institutes.

Bei Dr. Sepp Kipfstuhl und Prof. Dr. Nobuhiko Azuma bedanke ich mich für die Messung und Bereitstellung der Daten und für die guten Ratschläge.

Dr. Maurine Montagnat, Dr. Denis Samyn und Dr. Anders Svensson danke ich ebenfalls für die Messung und Bereitstellung der NEEM Daten.

Zuletzt bedanke ich mich bei meiner Familie, meinen Freunden und allen anderen Menschen, die mich während dieser Arbeit und im gesamten Studium stets unterstützt haben.

1. Motivation

Die Analyse von C-Achsenverteilungen in Eisbohrkernen liefert grundlegende Informationen über Deformations- und Fließbedingungen eines Gletschersystems, sowie die Spannungsregimes in den verschiedenen Tiefen.

Das Verständnis dieser Faktoren ist vonnöten, um einerseits eventuelle Umlagerungen und Beeinträchtigungen abgelagerter Eisschichten zu erkennen und andererseits Fließmodelle für Eismassen zu optimieren. Zudem gibt die Analyse von Achsenverteilungen Aufschluss über den Grad der Anisotropie im Eis, was zum Beispiel für seismische Verfahren und für Radarmethoden eine wichtige Arbeitsgrundlage ist.

In dieser Arbeit sollen die C-Achsenorientierungen für den grönländischen NEEM (North Greenland Eemian Ice Drilling) Eiskern anhand von polarisationsmikroskopischen Dünnschnittaufnahmen ermittelt und hinsichtlich ihrer statistischen Parameter analysiert und interpretiert werden. Dabei werden die Tiefenbereiche von ca. 700 m bis ca. 1300 m und von ca. 1800 m bis ca. 2500 m betrachtet. Für die Bereiche oberhalb von 700 m und zwischen 1300 m und 1800 m wurden bereits erste Daten analysiert und für diese Arbeit zur Verfügung gestellt.

Die gewonnenen Informationen sollen einen ersten Überblick über die C-Achsenverteilungen im NEEM Eiskern liefern und sollen mit einer Auflösung von ca. 50 m pro Abschnitt untersucht werden. Für jeden Tiefenpunkt werden sechs Proben ausgewählt und gemittelt, um statistische Ausreißer einzelner Proben zu erkennen. Abschließend werden die ermittelten Daten mit den Ergebnissen der NorthGRIP-Bohrung (North Greenland Ice Core Project) verglichen, die 2003 abgeschlossen wurde.

Die Glaziologie wurde während meines Studiums in einigen Vorlesungen lediglich angeschnitten, jedoch nicht darüber hinaus vertieft. Da dieses Forschungsgebiet für mich schon lange Zeit sehr interessant war und es auch einen sehr wichtigen Teil der quartären Klimaforschung darstellt, entschloss ich mich zunächst ein Praktikum mit entsprechendem Schwerpunkt zu absolvieren, woraus sich im Endeffekt der Plan zu einer Abschlussarbeit entwickelte. Vor allem da in der Analyse der C-

Achsenverteilungen auch grundlegende Studieninhalte der Geologie - beispielsweise Methoden aus der Tektonik und der Polarisationsmikroskopie - von großer Bedeutung sind, sagte mir das Thema sehr zu.

Für mich persönlich ist es eine große Freude, einen Beitrag zum NEEM-Projekt leisten zu können.

2. Grundlagen

2.1 Einführung in das NEEM Projekt (North Greenland Eemian Ice Drilling)

Bereits seit den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts werden in der grönländischen Arktis Tiefenbohrungen im Eis abgeteuft, um wichtige Erkenntnisse über die quartäre Klima- und Eisschildentwicklung zu sammeln.

Neben den ersten Kernen - Dye-3 und GISP - waren es bis dato vor allem die gewonnenen Daten aus den Kernen GRIP, GISP2 und NorthGRIP, die den maßgeblichsten Beitrag zur Forschung beitrugen. Hierbei konnten hochaufgelöste Klimarecords des Holozäns, sowie des Weichsel-Glazials gewonnen werden, welche an ihrer Basis bis ins Eem reichen.

Das Eem, welches das vorangegangene Interglazial markiert und vor ca. 115.000 Jahren endete, konnte bisher nur in antarktischen Projekten (zum Beispiel Vostok oder Dome C) gut aufgelöst erbohrt werden. In den bisherigen grönländischen Eisbohrkernen ist es nur bruchstückhaft, stark gestört oder zu komprimiert aufgeschlossen.

Ziel der NEEM-Bohrung ist es - neben der Ergänzung bisheriger Erkenntnisse über die letzten beiden Abschnitte des Quartärs - die Eem-Warmzeit zu erschließen und somit genauere Aussagen über Durchschnittstemperaturen und klimatische Variationen zu treffen und diese mit dem vorhandenen Wissen über das Holozän zu vergleichen. Hierzu war es notwendig einen Eiskern zu erbohren, der mindestens die letzten 140.000 Jahre Klimageschichte gut aufgelöst und ungestört überliefert.

Das Projekt wird vom Zentrum für Eis und Klima (Niels Bohr Institut) der Universität Kopenhagen koordiniert und besteht aus einer Kooperation von insgesamt 14 Nationen.

Aus dem gewonnenen Material sollen neben Informationen über Atmosphärenzusammensetzungen, Staubkonzentrationen und Sauerstoffisotopenverhältnissen auch die in dieser Arbeit behandelte Verteilung der C-Achsen untersucht werden. (www.neem.nbi.ku.dk/about_neem)

2.2 Lokation

Als Lokation wurde Nordwestgrönland (77,45°N, 50,06°W) gewählt (Abb. 1). An dieser Stelle weist der Eisschild eine Mächtigkeit von 2542 m auf und es wird angenommen, dass das Eem in einem Abschnitt von ca. 2265 m bis 2345 m aufgeschlossen ist und dort eine Jahresschichtung von ungefähr 7 mm Mächtigkeit aufweist. Das Camp ist auf einer Eisscheide gelegen, welche in Richtung NW-SE verläuft. Die Hauptrichtungen des Eisflusses sind SW und NE.



Abb. 1: Grönland und die Position des NEEM-Kerns, sowie weiterer Kampagnen

2.3 Gletschereis

Da die Bildung polykristallinen, glazialen Eises unmittelbar von den regionalen und globalen klimatischen Bedingungen abhängig ist, stellt dieses ein wichtiges Forschungsarchiv für die Paläoklimatologie dar.

Die Genese beginnt zunächst mit dem Niederschlag des Schnees, welcher Maximaltemperaturen um den Nullpunkt voraussetzt. Bei stetiger Akkumulation steigt die Auflast und der Schnee wird kompaktiert, wobei die Dichte des Materials im Bereich zwischen 50 mg/cm^3 und 200 mg/cm^3 variiert.

Akkumulieren sich die feinen Eiskristalle des Schnees zu größeren Aggregaten, spricht man von Firn, welcher eine Dichte zwischen 400 und 830 mg/cm^3 hat (Paterson, 1994). Die Akkretion zu Firnkörnern kann einerseits durch steigende Auflast des akkumulierten Schnees verursacht werden, andererseits aber auch durch saisonales, leichtes Auftauen des Schnees, welcher im Anschluss wieder grobkörniger rekristallisiert. Wichtig ist jedoch, dass die Gasräume zwischen den Körnern nicht abgeschlossen sind, sondern miteinander in Verbindung stehen.

Diese Eigenschaft unterscheidet Firn von Eis, welches in der vertikalen Abfolge am tiefsten liegt und erst bei erhöhtem Druck gebildet wird. Je nach Lage des Akkumulationsgebietes und den jeweiligen Durchschnittstemperaturen kann die Bildungstiefe variieren. Beim S-2 Bohrkern in Wilkes Land am Rand der Ostantarktis (66,5°S, 112,3°E) ist man bereits in einer Tiefe von 38 m auf Eis gestoßen (Hollin & Cameron, 1961), während dieses beim Vostok-Projekt (78,5°S, 106,8°E) in der zentralen Ostantarktis, wo die Temperaturen ganzjährig deutlich unter 0°C liegen, erst in 95 m Tiefe anzutreffen war (Bernola et al., 1987).

2.4 Eigenschaften von Eis

2.4.1 Kristallographie

Eis bildet den festen Aggregatzustand von H₂O und kann in 12 kristalline und zwei amorphe Phasen gegliedert werden. Die in der Natur vorkommende und somit in dieser Arbeit relevante Phase ist das sogenannte *Eis Ih*, das im hexagonalen System kristallisiert (Schulson & Duval, 2009). Im Verlauf der Arbeit wird der Einfachheit halber nur von „Eis“ gesprochen.

Das Kristallgitter wird durch zwei verschiedene Kräfte gebunden. Einerseits die starken kovalenten Bindungen, die innerhalb der einzelnen H₂O-Moleküle auftreten, andererseits die Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Molekülen. Die relativ schwachen Wasserstoffbrückenbindungen sind der Grund für die vergleichsweise niedrige Schmelztemperatur von Eis.

Bei einer Temperatur von 0°C, die in etwa den Schmelzpunkt markiert, hat Eis eine Dichte von 916,4 mg/cm³ (bei -60°C 922,7 g/cm³) (Hobbs, 1974).

Das hexagonale Eis ist der Punktgruppe $\frac{6}{m} \frac{2}{m} \frac{2}{m}$ (Raumgruppe P6₃/mmc) zuzuordnen und besteht aus Elementarzellen, die von vier H₂O-Molekülen gebildet werden und eine rautenförmige Basalfläche aufweisen (Abb. 2). Durch die Translation dieser Zellen bilden sich Sechseringe, an deren Ecken jeweils Sauerstoffatome platziert sind, welche untereinander über Wasserstoffbrücken verbunden sind (Abb. 3). Diese Ringebenen sind maßgeblich für die hexagonale Symmetrie verantwortlich

und sind in $[001]$ -Richtung in der dichtesten Kugelpackung übereinander angeordnet (Petrenko & Whitworth, 1999).

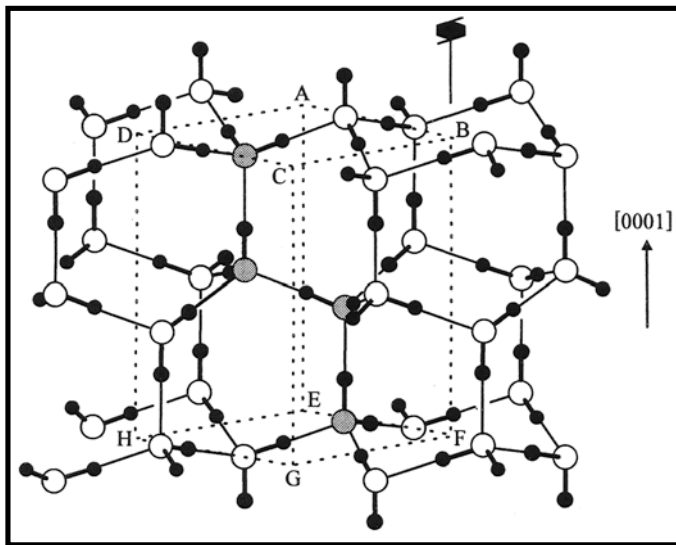


Abb. 2: Die Molekularstruktur von Eis Ih

Die einzelnen Sauerstoffatome sind im Kristallverbund von jeweils vier nächsten Sauerstoffatomen umgeben, die sich durch eine nahezu tetraedrische Anordnung auszeichnen (Schulson & Duval, 2009).

Trotz der hohen Packungsdichte sind die Abstände zwischen den einzelnen

Sauerstoffatomen noch relativ hoch. Dieser Effekt ist beispielsweise für die Dichteanomalie des Eises verantwortlich.

Wichtig in Bezug auf die Gitterstruktur sind die *Bernal-Fowler Eisregeln* (Bernal & Fowler, 1933), welche besagen, dass einerseits immer zwei Wasserstoffatome an ein Sauerstoffatom gebunden sein müssen und andererseits immer nur ein Wasserstoffatom zwischen zwei Sauerstoffatomen liegen darf (Petrenko & Whitworth, 1999).

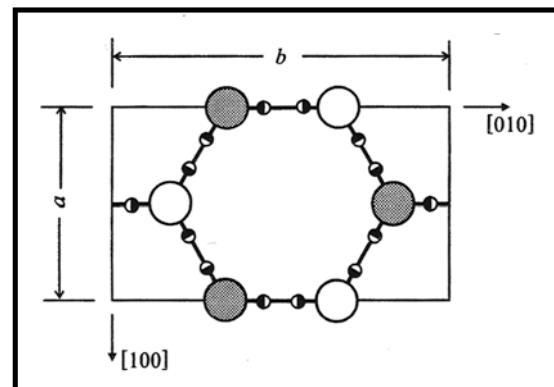


Abb. 3: Blick auf Sechsering in $[001]$ -Richtung

2.4.2 Mechanische Eigenschaften

Betrachtet man die mechanischen Eigenschaften von Eis, so muss man zunächst unterscheiden, ob man sich mit dem Eis-Einkristall befasst oder mit der polykristallinen Eismasse, da diese beiden Formen unterschiedlich hinsichtlich ihres Deformationsverhaltens sind.

Monokristallines Eis:

Bei einer langsamen Beanspruchung, wie sie in der Regel in der Natur auftritt, weist Eis ein plastisches Deformationsverhalten auf.

Hierbei ist die Härte des Materials maßgeblich von der Richtung der einwirkenden Kräfte abhängig, somit weist Eis eine deutliche Härteanisotropie auf.

Während es in Richtung der C-Achse [001] relativ hart ist und geringe Deformation zeigt, kann eine Verformung orthogonal dazu (in der [001]-Ebene) schon bei geringen Spannungen auftreten (Schulson & Duval, 2009).

Diese geringe Härte in der [001]-Ebene hat zwei Gründe.

Einerseits weisen die Bindungen innerhalb eines Eiskristalls ihre stärksten Kräfte innerhalb der einzelnen - zur Basalfläche parallelen - Ebenen auf. Die Bindungen zwischen den einzelnen Ebenen sind schwächer,

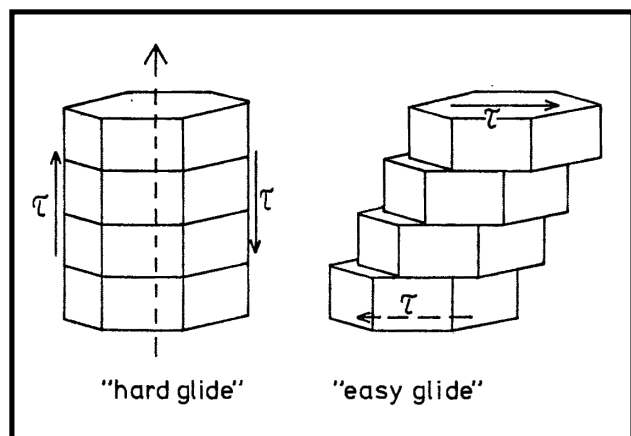


Abb. 4: Deformation eines Monokristalls bei unterschiedlichen Spannungsrichtungen (τ)

wodurch eine Spannung in [110]-Richtung auf den geringsten Widerstand trifft. Die Deformation in dieser Richtung wird auch als basales Gleiten bezeichnet (Paterson, 1994) (Abb. 4).

Andererseits haben im Kristallgitter auftretende Punkt-, Linien- und volumetrische Defekte einen großen Einfluss auf die Scherfestigkeit des Körpers.

Zu den Punktdefekten gehören Ionisierungsdefekte, die durch überschüssige Protonen in der Nähe von H_2O -Molekülen hervorgerufen werden. Sogenannte Bjerrum-Defekte, die eine Unterbrechung der Wasserstoffbrücken darstellen,

resultieren aus der Verletzung der zweiten *Bernal-Fowler Regel* (Schulson & Duval, 2009).

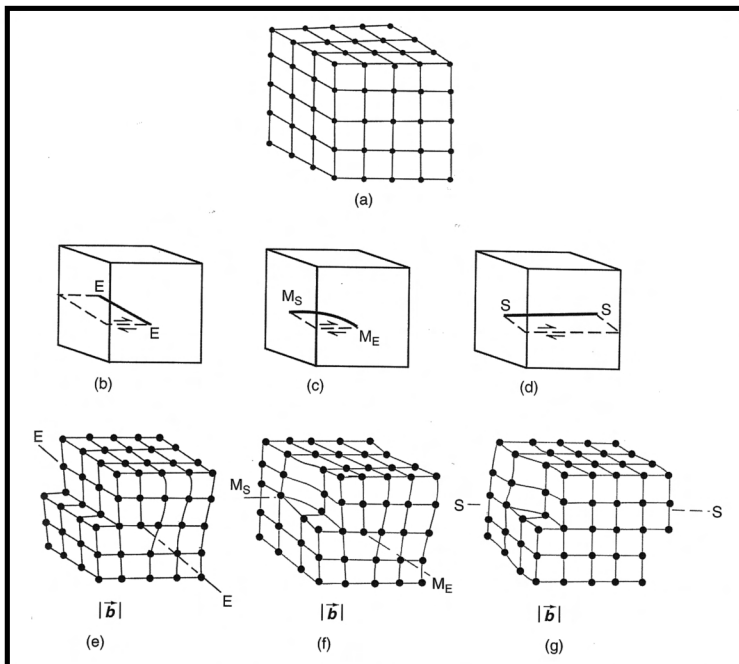


Abb. 5: Die Wirkung der unterschiedlichen Liniendefekte auf das Kristallgitter

Die Punktdefekte sind jedoch nicht so relevant für das plastische Verhalten von Eis, wie die weitaus bedeutenderen Liniendefekte.

Diese Dislokationen ermöglichen eine Absenkung des Scherwiderstandes in der [001]-Ebene, indem sie sich bei Beanspruchung durch den Kristall

fortpflanzen.

Unterschieden wird dabei zwischen *edge dislocations* und *screw dislocations*, welche sich durch verschiedene Lagen zur Richtung des Gleitens auszeichnen.

Die Richtung, bzw. auch der Betrag der Gleitbewegung wird durch den *Burgers' Vector* (\vec{b}) beschrieben. Liegt der Liniendefekt orthogonal zu \vec{b} , so handelt es sich um eine *edge dislocation* (Abb. 5 b & e), ist die Dislokation parallel zu \vec{b} orientiert, ist es eine *screw dislocation* (Abb. 5 d & g). In der Regel treten jedoch sogenannte *mixed dislocations* (Abb. 5 c & f) auf, welche eine Kombination aus beiden darstellen (Schulson & Duval, 2009).

Screw dislocations weisen zudem die Eigenschaft auf, dass sie sich auch in ober- oder unterhalb angrenzende [001]-Ebenen ausbreiten können. Dieser Effekt wird als *cross slip* bezeichnet und kann auch bei *mixed dislocations* auftreten.

Als volumetrische Defekte können beispielsweise Salze oder Gase die Kristallstruktur stören, welche ebenfalls die Fließresistenz herabsetzen und den Eiskörper anfälliger für Scherungen machen (Schulson & Duval, 2009).

Diese Faktoren begünstigen das basale Gleiten von Eiskristallen, welches für die spannungsabhängige Einregelung von einzelnen Körnern verantwortlich ist.

Darüber hinaus ist zu beobachten, dass die Verformungsrate bei konstanter Spannung mit der Zeit zunimmt. Der Grund dafür liegt vor allem darin, dass die Liniendefekte, welche die ausschlaggebende Wirkung auf das Deformationsverhalten haben, sich während der Verformung vermehren und somit die Deformation zusätzlich erleichtern (Schulson & Duval, 2005)

Polykristallines Eis:

Das polykristalline Eis verhält sich zu Beginn - im Gegensatz zum Einkristall - relativ isotrop hinsichtlich der mechanischen Stabilität. Der Grund für diese Härteisotropie liegt darin, dass in einem Eisaggregat die einzelnen Körner zunächst statistisch verteilt und zufällig orientiert sind, sodass die Gesamtmasse keine kristallographische Vorzugsorientierung aufweist (Paterson, 1994).

Das Verhalten einer polykristallinen Eismasse bei konstantem Druck lässt sich in drei Abschnitte der plastischen Verformung gliedern, welche durch die Hauptprozesse des basalen Gleitens, der Korngrenzgleitung und der Diffusion geprägt sind.

Bevor die plastische Deformation einsetzt, gibt es eine kurze, jedoch starke Phase der elastischen Verformung, die den weiteren Verlauf initiiert.

Danach setzt die plastische Phase ein, die mit dem primären Kriechen beginnt. Dieses weist eine kontinuierliche Abnahme der Verformungsrate auf. Diese

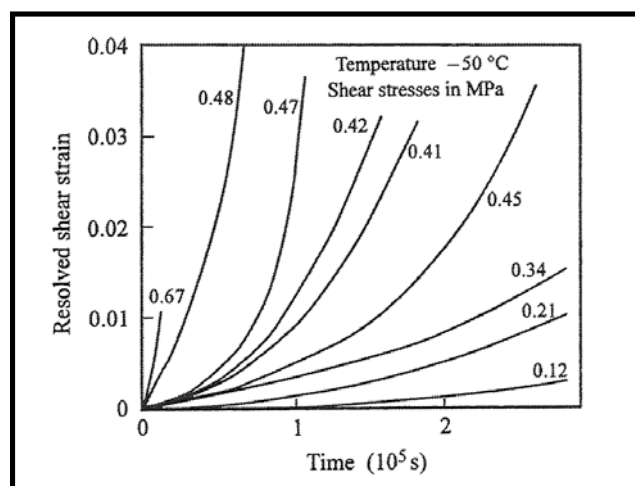


Abb. 6: Scherverformung in Abhängigkeit von der Zeit bei konstanter Scherspannung

Abnahme wird dadurch hervorgerufen, dass die Deformation, die zunächst durch die optimal orientierte Kristalle begünstigt wird, deren Basalebenen parallel zur Deformationsrichtung liegen, mehr und mehr durch die Wirkung der ungünstiger orientierten eine Abschwächung erfährt. Je länger das Eis durch Deformation beeinflusst wird, desto größer wird dessen Fließwiderstand durch Kristalle, deren

Basalebene senkrecht zur Spannungsrichtung ausgerichtet sind. Dieser erhöhte Widerstand bedingt auch den kontinuierlichen Anstieg der Spannung in der primären Phase (Abb. 6) (Hooke, 1980).

Eine weitere Ursache hierfür ist die Ansammlung von Dislokationen in Subkorn Grenzen, wodurch es zu einer gegenseitigen Behinderung beim Gleiten kommen kann. Bei zunehmender Ausbildung von Subkorn Grenzen nimmt die Mobilität der Dislokationen ab, wodurch die Deformation abgeschwächt wird (Hamann et al., 2007).

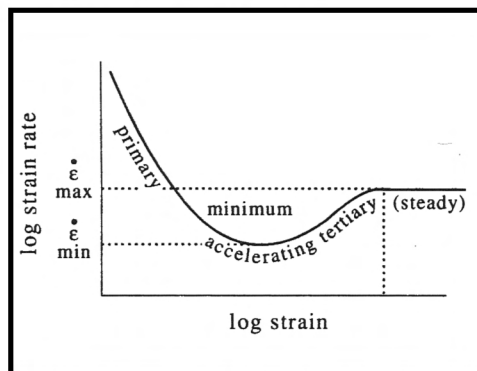


Abb. 7: Änderung der Verformungsrate bei zunehmender Verformung

An der Stelle, an der die Deformation in einen leichten, linearen Anstieg übergeht, beginnt das sekundäre Kriechen. Die Deformationsrate nimmt in diesem Bereich stetig ab, bis sie ihren Tiefpunkt ($\dot{\epsilon}_{min}$) erreicht und geht mit einem Anstieg der Spannung einher, welche zeitgleich ihr Maximum erreicht (Abb. 9). Dies markiert den

Wendepunkt im Deformationsverlauf (Abb. 8), da der Scherwiderstand nun überwunden ist, wodurch die Deformationsrate wieder zunimmt und die Spannung abgebaut wird (Hooke, 1980).

Nun setzt das tertiäre Kriechen ein, bei dem die weiterhin ansteigende Deformationsrate ihr Maximum ($\dot{\epsilon}_{max}$) erreicht (Paterson, 1994) (Abb. 7). Die Spannung nimmt dabei kontinuierlich ab, bis sie sich zum Schluss auf einem konstanten Niveau einpendelt. Auch die Deformationsrate zeigt eine Abschwächung ihres Anstieges und geht in eine konstante Phase über.

Das tertiäre Kriechen wird jedoch nur bei sehr hohen Drücken und relativ hohen Temperaturen ($> -10^{\circ}\text{C}$) erreicht und tritt daher in der Natur nur an der Gletscherbasis auf, an der der geothermische Gradient seinen Temperatureinfluss zeigt (Alley, 1988). Die relativ hohen Temperaturen begünstigen die Rekristallisationsprozesse in dieser Phase, durch welche die Eiskristalle in energetisch günstigen

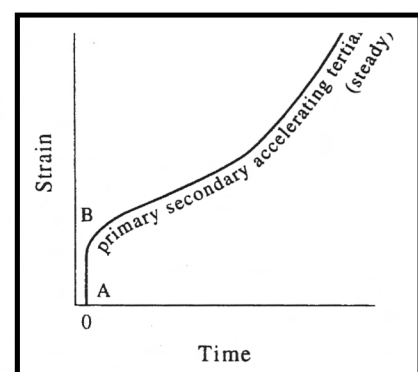


Abb. 8: Verformung von Eis in Abhängigkeit von der Zeit

Orientierungen ausgerichtet werden, die einen geringeren Scherwiderstand bieten (Peternell et al., 2010).

Durch erhöhte Druck- und Temperaturbedingungen ist das polykristalline Eis bestrebt, die aufgebrauchten Korngrenzenergien zu reduzieren, indem eine Rekristallisation in Vorzugsorientierung stattfindet (Suzuki, 1970). Diese kann, wie die *migration recrystallization* ein

Wachstum der Körner bewirken. Dies hat zur Folge, dass die durchschnittliche Korngröße mit zunehmender Tiefe steigt.

Demgegenüber steht jedoch die *rotation recrystallization*, welche durch die Ausbildung von Subkorngrenzen hervorgerufen wird und so einen energetischen Ausgleich zur einwirkenden Spannung bewirkt. Dabei nimmt die Korngröße ab, da aus einem Eiskristall mehrere neue gebildet werden (Durand et al., 2009). Allgemein hat die Änderung der Korngröße einen Einfluss auf das Deformationsverhalten des Eises, ebenso wie die Deformation die Größenentwicklung der Körner steuert.

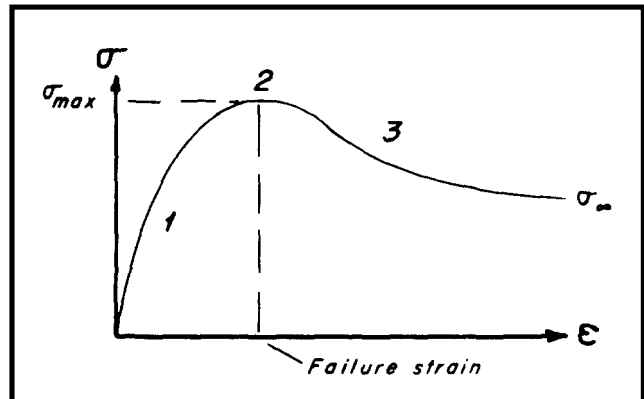


Abb. 9: Änderung der Spannung in Abhängigkeit von der Deformation

2.4.3 Optische Eigenschaften

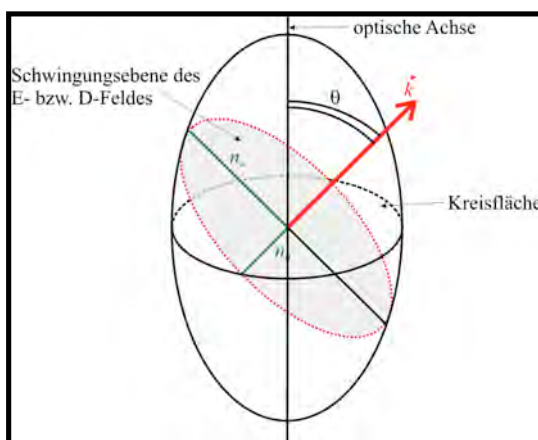


Abb. 10: Indikatrix eines hexagonalen (optisch einachsigen) Kristalls

Eine wichtige Voraussetzung für die Untersuchung von C-Achsenorientierungen sind die optischen Eigenschaften von Eis. Eis Ih ist mit seiner hexagonalen Kristallklasse optisch einachsig (positiv) und weist dementsprechend keine Doppelbrechung bei einem Strahlengang auf, der parallel zur C-Achse verläuft (Abb. 10).

Die maximale Doppelbrechung von Eis ist mit ca. 0,0014 zudem recht gering. Der Brechwert n liegt im Bereich des sichtbaren Lichtes bei ca. 1,31 (Petrenko & Whitworth, 1999).

2.4.4 C-Achsenorientierungen

Die Analyse von C-Achsenverteilungen liefert grundlegende Informationen über Spannungsfelder sowie die Deformations- und Fließmechanismen, die in einer Eismasse vorherrschen. Zudem lassen sich über den Grad der Einregelung von C-Achsen Vermutungen über die Anisotropie des Eises in unterschiedlichen Tiefen anstellen.

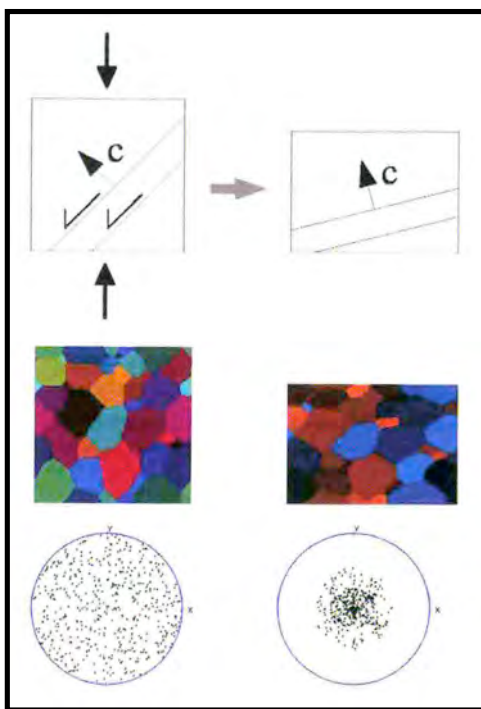


Abb. 11: Beispiel für die Ausrichtung von C-Achsen bei uniaxialer Kompression

Dargestellt und klassifiziert werden die Verteilungen anhand von stereographischen Projektionen und statistischen Parametern der räumlichen Anordnungen, wie z.B. der Eigenwerte, dem Regelungsgrad, der sphärischen Apertur oder dem Woodcock-Parameter.

Die Orientierungen von C-Achsen ändern sich zunehmend bei Beeinträchtigung von polykristallinem Eis durch Spannungen und daraus resultierender Scherkräfte. So ist eine Änderung von Verteilungen mit zunehmender Tiefe (und somit zunehmendem Druck) zu beobachten. Dieses

Verhalten der C-Achsen ist durch die Härteanisotropie des Eises bedingt.

In den obersten Metern einer Eismasse zeigt die C-Achsenorientierung noch eine relative statistische Gleichverteilung in alle Raumrichtungen (Svensson et al., 2009).

Mit zunehmender Tiefe nimmt der Druck zu und somit die vertikal wirkende Kraft auf die Eiskristalle, wodurch eine Einregelung der C-Achsen in Richtung der Vertikalachse verursacht wird (Abb. 11).

Der Regelungsgrad steigert sich mit zunehmendem Druck und wird als *single maximum* bezeichnet. Hierbei weist die Punktwolke im Schmidt'schen Netz eine zirkuläre Konzentration zum Mittelpunkt hin auf (Alley, 1988) (Abb. 12, oben).

Je nachdem, ob auftretende Extensionskräfte beteiligt sind, kann das *single maximum* auch eine leicht elliptische Form annehmen. Dies ist zum Beispiel beim *pure shear* der Fall, welcher innerhalb von Eiskappen durch paralleles Fließen mit verschiedenen Geschwindigkeiten auftreten kann (Alley, 1988) (Abb. 12, 2. von oben).

Deutlich wird der Einfluss von Extensionskräften vor allem an C-Achsen, die nicht an einem Dome, sondern im Eisschild an einer Eisscheide einregeln, an der eben jene Kräfte - zumindest im oberen Bereich - die dominantere Rolle spielen.

Bewirken die Differentialspannungen im Eisschild eine uniaxiale Extension in der Horizontalen, wie es beispielsweise in den oberen

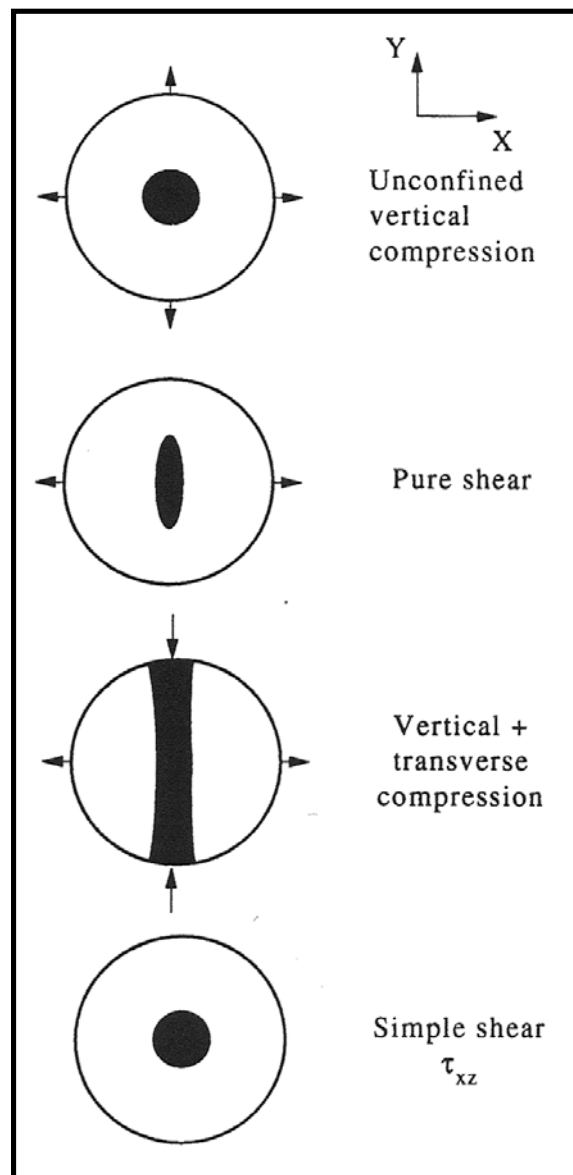


Abb. 12: Verteilungsmuster von C-Achsen in unterschiedlichen Spannungskonfigurationen

Bereichen von Gletschern an Eisscheiden der Fall ist, so zeigen die C-Achsen in der Lagenkugeldarstellung ein typisches Gürtelverteilungsmuster (Abb. 12, 3. von oben). Dabei regeln sich die Achsen in der Ebene ein, die orthogonal zu den extensiven Hauptspannungen liegt (Wang et al., 2002). Diese Verteilung ist nicht im tieferen Bereich eines Eisschildes zu beobachten, da mit zunehmender Tiefe der Einfluss der *simple shear*-Kräfte auf die Eiskristalle zunimmt. Diese entstehen durch die erhöhten Spannungen an der Grenze zwischen Gletscherbasis und Grundgebirge

und bewirken eine Ausrichtung der C-Achsen in vertikaler Richtung (Alley, 1988) (Abb. 12, unten).

Die Gürtelverteilung geht so in der Tiefe in ein *single maximum* über. In den untersten Bereichen von Gletschern, welche relativ warm sind, da sie durch den näheren geothermischen Gradienten beeinflusst werden, kann aufgrund von Rekristallisation und Korngrenzmigration der Grad der Einregelung geringer sein, da das Eis in energetisch günstigen Lagen rekristallisiert. Sind die Kristalle groß und in deutlich unterschiedlichen Ausrichtungen gewachsen, macht sich diese Verteilung im Schmidt'schen Netz als *diamond pattern* bemerkbar (Azuma & Higashi, 1985). Hier sind in der Lagenkugel die Achsen auf wenige, deutlich voneinander isolierte Positionen verteilt. Dabei richten sich die einzelnen, großen Eiskristalle so aus, dass zwischen ihren Korngrenzen möglichst geringe Energien aufgebracht werden müssen. Die C-Achsen weisen hierbei eine Abweichung von ca. 40° oder 90° zueinander auf (Suzuki, 1970).

Zudem wurde beobachtet, dass diese auch in einem Gürtel mit einer Abweichung von ca. 30° von der Vertikalachse angeordnet sein können (Jacka & Maccagnan, 1983).

2.5 Statistische Parameter von C-Achsenorientierungen

Neben der visuellen Darstellung von Verteilungen ist es vor allem wichtig, die C-Achsenorientierungen quantitativ miteinander vergleichbar zu machen. Um diese Vergleichbarkeit zu ermöglichen, werden einige statistische Parameter zur Analyse von Gefügedaten herangezogen.

Im Folgenden werden der Regelungsgrad ($R_{\%}$), die sphärische Apertur (α_s), die Eigenwerte (s_1 , s_2 und s_3), sowie der Woodcock-Parameter (k) vorgestellt.

Regelungsgrad ($R_{\%}$)

Betrachtet man die orientierten C-Achsen als Vektoren in einer Einheitskugel, so lassen sich die Vektoren, die zusammen ein Cluster bilden, addieren, wodurch sich ein Summenvektor (R) ergibt. Je orientierter die Vektoren sind (d.h. je kleiner der

Winkel zwischen den Vektoren ist), desto größer wird der Betrag des Summenvektors. Sind die Achsen breiter gestreut, wird der Betrag geringer.

Die Formel für die Berechnung des Regelungsgrades lautet:

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

Wobei N die Zahl der Proben (bzw. Vektoren) und R der Summenvektor ist.

Je größer $R_{\%}$ ist, desto stärker sind die Achsen eingeregelt, $R_{\%} = 100$ würde somit bedeuten, dass alle Achsen der Verteilung parallel liegen.

(Wallbrecher 1978)

Sphärische Apertur (α_S)

Die sphärische Apertur ist ein weiterer Parameter, der zur Beschreibung der Streuweite eines Clusters herangezogen wird. Betrachtet man die Punktwolke, welche durch die Durchstoßpunkte der C-Achsen auf einer Einheitskugel gebildet wird und beschreibt deren mittlere Streuweite mit einer Kreisfläche, so lässt sich, wenn man diese als Basis nimmt, ein Kegel zum Zentrum der Einheitskugel vorstellen.

Der halbe Öffnungswinkel dieses Kegels ist α_S . Je geringer der Winkel der sphärischen Apertur ist, desto geringer ist auch die Streuweite.

Die Berechnung von α_S erfolgt allgemein mit folgender Formel:

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

Je größer der Regelungsgrad ist, desto geringer ist somit die sphärische Apertur. Die Relation der beiden Parameter wird durch folgenden Zusammenhang beschrieben:

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

(Wallbrecher, 1978 ; Wang et al., 2002)

Eigenwerte (s_1, s_2, s_3)

Die Eigenwerte einer Achsenverteilung dienen dazu, ihre Ausprägung, bzw. Gewichtung in der Lagenkugel zu beschreiben.

Hierzu kann man sich zunächst vereinfacht vorstellen, dass jeder Druckstoßpunkt an der Kugeloberfläche eine Masse $m = 1$ besitzt. Je nach Verteilung der Punkte kann man davon ausgehen, dass man durch diese bestimmte Achsen mit minimalem oder maximalem Trägheitsmoment legen könnte.

So würde beispielsweise für eine Verteilung mit einem eng gestreuten Cluster die Achse mit dem minimalen Trägheitsmoment zentral durch dieses verlaufen. Senkrecht dazu wären die Lagen der Achsen des maximalen Trägheitsmomentes frei wählbar (Wallbrecher, 1978).

Betrachtet man hingegen eine Großkreisverteilung (bzw. Gürtelverteilung), so liegt die Achse des maximalen Trägheitsmomentes senkrecht zur durch den Großkreis definierten Ebene, die minimalen Trägheitsmomente lägen in der Ebene.

In einem Teilgürtel, welcher in der Regel am ehesten einer natürlichen Verteilung entspricht, läge das maximale Trägheitsmoment ebenfalls orthogonal zur Kreisebene. Das minimale würde - wie im ersten Beispiel - zentral durch das Cluster verlaufen, wo die Punktkonzentration am höchsten ist. Die dritte Achse des mittleren Trägheitsmomentes läge senkrecht zu den beiden anderen Achsen.

Legt man nun die orthogonal zueinander liegenden Achsen der Trägheitsmomente als Koordinatensystem fest, so kann man die Eigenwerte der Vektoren (die auf 1 normiert werden und die Verteilung beschreiben), an diesen abtragen und sie als Achsen eines Ellipsoids betrachten. Dieses sogenannte Orientierungsellipsoid veranschaulicht die Verteilung der C-Achsen sehr gut (Wallbrecher, 1978).

Bei den Eigenwerten ist zu beachten, dass der größte Eigenwert dem niedrigsten Trägheitsmoment zugeordnet wird. Dies heißt veranschaulicht, dass der Ellipsoid in die Richtung am stärksten elongiert ist, in der die meisten C-Achsen orientiert sind (Wallbrecher, 1978). Ferner gilt bei der Zuordnung der ermittelten Eigenwerte:

$$s_1 < s_2 < s_3$$

Die folgende Tabelle (Abb. 13) liefert einen kurzen Überblick über die Zusammenhänge zwischen Eigenwerten und Habitus des Orientierungsellipsoids:

Verteilungsform	Ellipsoid	Eigenwerte
Isotrop, Zufallsverteilung	Kugel	$s_1 = s_2 = s_3 = \frac{1}{3}$
Cluster (<i>single maximum</i>)	gestrecktes Rotationsellipsoid („Zigarre“)	$s_1 \approx s_2 \ll s_3$
Großkreisverteilung (Gürtelverteilung)	flaches Rotationsellipsoid („Diskus“)	$s_1 \approx 0 ; s_2 \approx s_3 \approx \frac{1}{2}$
Teilgürtelverteilung	flaches Ellipsoid („elongierter Diskus“)	$s_1 \approx 0 < s_2 < s_3$

Abb. 13: Tabelle für den Zusammenhang zwischen Verteilung, Habitus des Ellipsoids und den Eigenwerten

Woodcock-Parameter (k)

Der Woodcock-Parameter dient der einfachen Unterscheidung von *single maximum* und Gürtelverteilung. Hierbei wird das Verhältnis der ermittelten Eigenwerte betrachtet, um anhand dieses Verhältnisses eine grobe Unterteilung zu ermöglichen.

$$k = \frac{\ln (s_3/s_2)}{\ln (s_2/s_1)}$$

Ist $0 < k < 1$, so handelt es sich um eine Gürtelverteilung.

Ein *single maximum* liegt vor, wenn: $1 < k < \infty$ (Woodcock, 1977).

2.6 Laborarbeit

2.6.1 Geräte

Mikrotom (Leitz®)

Beim Mikrotom (Abb. 14) handelt es sich um eine Apparatur, die vor allem in der Medizin und in der Biologie zum Anfertigen von dünnen Schnittpräparaten von Gewebe für die Durchlichtmikroskopie benutzt wird.

Bei der Anfertigung von Eisdünnschnitten eignet es sich zum Glätten und zum Hobeln der Probe auf eine gewünschte Schliffdicke.

Die auf dem justierbaren Tisch fixierte Eisprobe wird dabei von einer scharfen Metallklinge durch das Vor- und Zurückfahren auf einem Schlitten heruntergeschliffen.

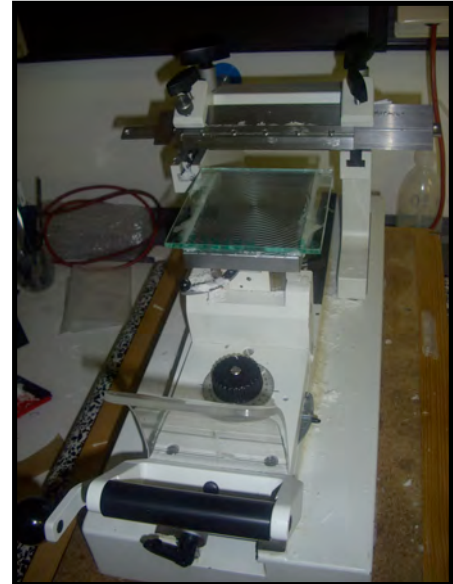


Abb. 14: Mikrotom zum Anfertigen der Dünnschnitte

G50 Fabric Analyser (Russel-Head Instruments®)

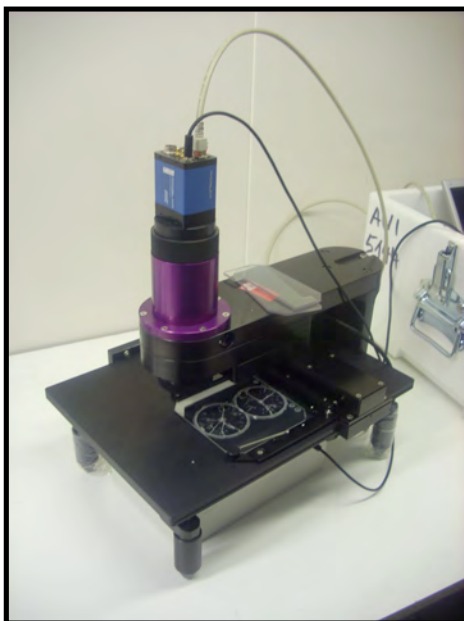


Abb. 15: G50 Fabric Analyser im Eislabor des Alfred-Wegener-Institutes

Beim *G50 Fabric Analyser* der australischen Firma Russel-Head Instruments® (Abb. 15) handelt es sich um einen automatisierten Apparat zur Untersuchung lichtoptischer Eigenschaften, sowie von C-Achsenverteilungen von Eis-, Quarz- und Apatitdünnschliffen.

Im Wesentlichen setzt sich das Gerät aus zwei Komponenten zusammen. Einerseits einer hochauflösenden Kamera (2048 x 2048 Pixel / 4 Megapixel) mit einem Bildfeld von 10 mm x 10 mm Größe und einer 50 mm Objektivlinse.

Hiermit lassen sich Auflösungen zwischen 50 μm und 5 μm pro Pixel erreichen.

Der zweite, untere Teil des Apparates besteht aus einem automatisierten Polarisationsmikroskop. Die Polarisatoren werden elektrisch rotiert (in acht Bildstellungen, jeweils 11,25° Rotation pro Bild). Zudem wird auch der Objektisch elektrisch angesteuert, wodurch ein Rastern von größeren Proben (bis 100 mm x 100 mm) ermöglicht wird.

Die Beleuchtung erfolgt durch insgesamt neun LEDs, von denen eine axial direkt im Strahlengang angebracht ist. Die übrigen acht sind in einem Winkel von 20° inkliniert und in 45°-Abständen radial angeordnet. (www.russelheadinstruments.com/brochure.html)

Aus den verschiedenen ermittelten Bildaufnahmen wird durch automatische, digitale Bildanalyse die Orientierung der C-Achsen bestimmt.

Für die Feldmessungen in Grönland wurden zwei verschiedene Versionen des Geräts verwendet. Bei dem vom AWI bereitgestellten Gerät handelte es sich um den hier Beschriebenen *Fabric Analyser G50*. Das vom NIPR zur Verfügung gestellte Gerät gehörte zur Vorläufergeneration.

2.6.2 Proben/Material

Die bearbeiteten Eisproben wurden in den Sommersaisons 2009 und 2010 im NEEM Camp erbohrt. Der Bohrkern wurde in Abschnitte von 55 cm Länge (Bags) zerteilt, welche noch einmal in jeweils sechs, in etwa gleich große Einzelproben gegliedert sind.

Um Relaxationseffekte weitestgehend zu vermeiden, fanden die Messungen der C-Achsenverteilungen Stunden bis Tage nach der Bohrung des jeweiligen Abschnitts statt.

2.6.3 Probenpräparation

Die hier beschriebene und bildlich dokumentierte Präparation ist exemplarisch für einen Eisdünnschnitt für anderweitige Untersuchungen im Eislabor des AWI Bremerhaven gemacht worden. Die bearbeiteten NEEM Daten wurden während der



Abb. 16: Sägen einer Probe auf eine Dicke von 2 mm

Feldkampagnen in Grönland gemessen. Zur Analyse der C-Achsenverteilungen wurden Eisdünnschnitte der einzelnen Proben (9 cm bis 9,5 cm lang) angefertigt. Die Schnitte sind vertikal orientiert, was bedeutet, dass ihre Schnittlage parallel zur Kernachse ausgerichtet ist.

Um ein Anschmelzen oder der Sublimation der Probe zu verhindern, wird bei ca. -20°C im Eislabor oder direkt an der Bohrlokation gearbeitet.

Bei der Präparation wird zunächst eine ca. 7 mm dicke Probe des Eiskerns gesägt, welche anschließend mit Wasser auf einem Probenträger aus Glas fixiert wird.

Anschließend wird die freiliegende Seite mit einem Mikrotom geglättet, das Eis erneut gelöst und mit der geglätteten Seite wieder auf dem Probenträger angefroren.

Ist dies geschehen, wird die Eisprobe nun auf eine Dicke von 2 mm gesägt (Abb. 16) und danach mit dem Mikrotom auf ca. $300\ \mu\text{m}$ heruntergeschliffen (Abb. 17).

Die nun vorliegende Dünnschnittprobe kann mit dem *Fabric Analyser* untersucht werden. Die Probenpräparation sollte möglichst unmittelbar vor

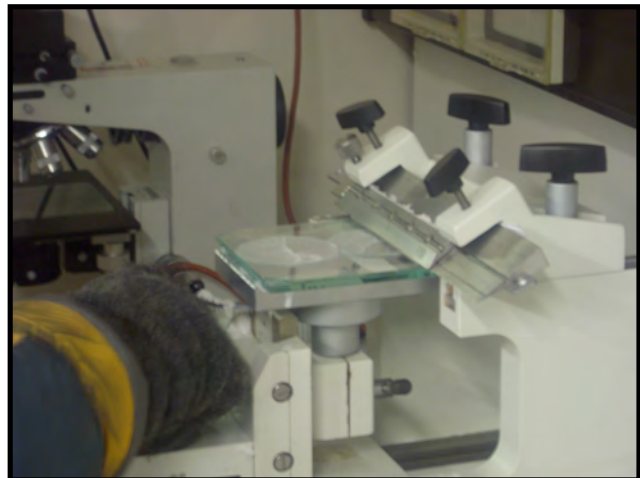


Abb. 17: Ausdünnen einer Probe auf $300\ \mu\text{m}$ mit dem Mikrotom

der Analyse erfolgen, um die möglicherweise auftretende Sublimation gering zu halten.

2.6.4 Messung und Datenaufnahme

Die Messung der Dünnschnitte hinsichtlich ihrer C-Achsenverteilungen mit dem *Fabric Analyser* erfolgt weitestgehend automatisch.

Die präparierte Probe wird auf dem Mikroskoptisch fixiert und das Kameraobjektiv auf die Probe fokussiert.

Nachdem Länge und Breite der Probe in das Softwareprogramm eingegeben worden sind, beginnt die Messung. Hierbei wird das Gesamtbild aus zahlreichen Einzelaufnahmen (1 cm x 1 cm) zusammengesetzt. Pro Einzelaufnahme werden Bilder in acht verschiedenen Polarisatorstellungen aufgenommen, bei denen wiederum jeweils acht Beleuchtungswinkel, sowie die axiale Lichtquelle gewählt werden.

Ist die Messung abgeschlossen (bei den NEEM Proben nach ca. 2 Stunden), werden die aufgenommenen Bilddaten als Mappe im civ-Format abgespeichert und zur weiteren Bearbeitung bereitgestellt. Die Pixelauflösung der bearbeiteten NEEM Dünnschnittbilder beträgt 50 µm x 50 µm.

3. Datenanalyse & -verarbeitung

3.1 Verwendete Software

Für die Auswertung der erstellten Bilddaten der C-Achsenverteilungen waren drei Programme notwendig.

Für das erste Auslesen von Datenpunkten aus den Trendbildern, welche die Orientierungen der Achsen widerspiegeln, wurde *Investigator G50* von Russell-Head Instruments® verwendet.

Für jegliche Kalkulationen und Umrechnungen wurden *IGOR Pro* von Wave Metrics® und die dazu zur Verfügung gestellten Makros benutzt

GEOorient von HolcombeCoughlinOliver® diente der Erstellung der stereographischen Projektionen.

Für die graphische Darstellung wurde Microsoft® *Excel 2011*, sowie die Adobe® *Creative Suite 4* verwendet.

Im nachfolgenden Abschnitt werden die einzelnen analytischen Arbeitsschritte genauer erläutert.

3.2 Arbeitsschritte der Datenverarbeitung

Die Datenaufnahme mit dem *Fabric Analyser* lieferte Bilddateien mit Informationen über unterschiedliche optische Eigenschaften der untersuchten Dünnschnitte. Um diese in verwertbare Daten für ein Tiefenprofil des NEEM Eiskernes zu verarbeiten, waren mehrere Bearbeitungsschritte mit diverser Software notwendig.

In einem ersten Schritt wird die vom *Fabric Analyser* ausgegebene Bilddatei (im Format .cis, z.B. „nmfa1496_201.cis“) mittels *Investigator G50* bearbeitet (Abb. 18). Neben diversen Bildformaten, welche zum Beispiel die geometrische Qualität, den Gangunterschied, Korngrenzen oder Aufnahmen unter verschiedenen Polarisatorstellungen (mit und ohne λ -Platte) beinhalten, findet sich auch die zur Analyse benötigte „Trend“-Abbildung, eine Falschfarbenaufnahme, die die räumliche Orientierung der C-Achsen darstellt.

Anhand dieser Raumverteilungen werden nun mittels eines Rasters mit festlegbarer Punktzahl die - flächengewichteten - Orientierungen der C-Achsen ermittelt. Für diese Arbeit wurden, wenn nicht anders gekennzeichnet, immer 500 Stichproben verwendet.

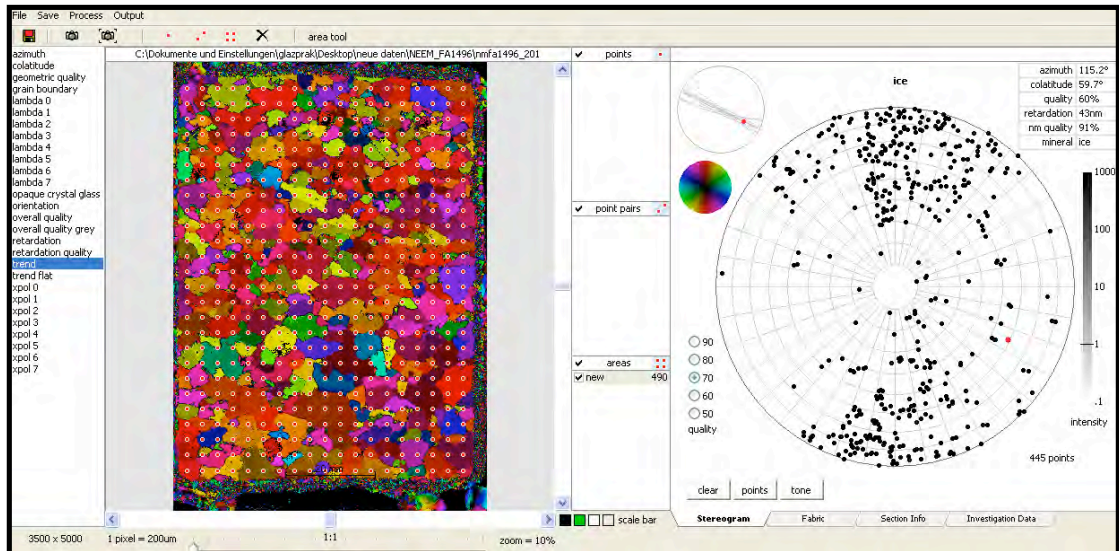


Abb. 18: Investigator G50. Links: die Auswahl der verschiedenen Bildformate. Mitte: Trend-Abbildung des Dünnschnitts (1496_20) mit Auswahlraster. Rechts: Schmidt'sches Netz mit C-Achsenverteilungen.

Zur weiteren Verarbeitung werden die Daten als Textdatei (z.B. „selections_1496_20_ver.dat“) ausgegeben, in der neben den Raumlagen auch die geometrische Qualität festgehalten wird.

Zudem wird die Trend-Datei mit Auswahlraster für die spätere graphische Veranschaulichung als Bitmap gespeichert.

Da die ausgegebenen Daten die Orientierung der C-Achsen für die vertikalen Schnitte (siehe Präparation) wiedergeben, ist es erforderlich diese in die Horizontalebene zu rotieren, da die übliche Darstellung der C-Achsenverteilungen in einer horizontalen Projektion erfolgt. Für diesen Schritt werden die Daten mittels eines gegebenen Makros im Tabellenkalkulationsprogramm *IGOR Pro* umgerechnet. Neben der Rotation beinhaltet das Makro auch die Filterung von Daten mit zu geringer (selbst festlegbarer) geometrischer Qualität.

Nach Laden des Makros ist die Angabe von Quellordner, Quelldatei sowie Ausgabedatei erforderlich. Darüber hinaus wird die gewünschte geometrische Mindestqualität angegeben.

Die in dieser Arbeit gewählte Mindestqualität beträgt 75%, da man für diesen Wert relativ geringe Messfehler für die Orientierungen (maximale Messfehler bei 10° bis 15°) bei möglichst hoher Stichprobenzahl erhält (Peternell et al., 2010). Diese Qualitätsgrenze musste allerdings im Verlauf der Arbeit bei einigen Proben verringert werden, da einige Fehler auftraten. Diese werden in 3.4 beschrieben und diskutiert.

Bei der Ausführung des Makros werden zunächst neue *Waves* (Tabellenspalten) angelegt und umbenannt, sodass man nun die Parameter *az*, *lat*, *colat*, *retardationqual*, *geomqual*, *azi_hor*, *colat_hor* und *lat_hor* erhält. Die ersten vier Parameter werden aus der zuvor erstellten Textdatei importiert, die letzten drei werden in diesem Schritt ermittelt.

Bevor dies geschieht werden die Datensätze nach *geomqual* (geometrische Qualität) sortiert und ausgefiltert.

Ist diese Sortierung und Filterung abgeschlossen, wird die Rotation in die Horizontalebene vollzogen, bei der die Parameter *azi_hor*, *colat_hor* und *lat_hor* neu berechnet werden, die die Raumlage der C-Achsen im Horizontalschnitt wiedergeben. Die neu ermittelten Daten werden als Textdatei ausgegeben (z.B. *selections_1496_20_hor.dat*).

Mit den nun vorhandenen horizontalen Datensätzen lassen sich einerseits stereographische Projektionen der Verteilungen im Schmidt'schen Netz darstellen, andererseits die benötigten statistischen Parameter für die C-Achsenverteilungen bestimmen.

Die Darstellung der stereographischen Projektionen erfolgt durch das Programm *GEOrient*, in welches die Horizontaldaten eingelesen und in diversen Projektionstypen abgebildet werden können.

In dieser Arbeit werden die Orientierungen anhand von Linearen in Punktdiagrammen dargestellt, um die Lagen der C-Achsen zu veranschaulichen.

Die Berechnung der statistischen Parameter für die C-Achsenorientierungen wird über ein zweites Makro in *IGOR Pro* vollzogen.

Nach Angabe des Quellordners und der -dateien werden die Parameter *S* (Vektorsumme), *R* (Regelungsgrad), α_5 (sphärische Apertur), *k* (Woodcock-Parameter), s_1 , s_2 , s_3 (Eigenwerte) bestimmt und die entsprechenden *Waves* erstellt.

Damit diese Parameter bestimmt werden können, werden die sphärischen Daten der Quelldatei vorher in ein kartesisches Koordinatengefüge umgerechnet.

Ist dies geschehen, werden die ermittelten Eigenwerte für jeden Datensatz nach Größe sortiert und die jeweils größten als s_3 , die mittleren als s_2 und die niedrigsten als s_1 abgetragen (Erläuterung siehe 2.3.5). Anhand der ausgegebenen Tabelle lassen sich nun die statistischen Parameter in einem Tiefenprofil darstellen.

Zur graphischen Darstellung werden im letzten Arbeitsschritt die Bitmap-Dateien mit Auswahlraster (aus *Investigator G50*) und die erstellten stereographischen Projektionen zu Profilabschnitten zusammengesetzt (siehe Anhang 9.3).

3.3 Statistik

Für eine quantitativ relevante Analyse wurde für jeden Dünnschnitt eine Stichprobenzahl von 500 Datenpunkten gewählt. Diese Stichprobenzahl wurde anschließend noch verringert, da die Qualitätsanalyse einige der Datenpunkte herausfilterte. Die für die Bestimmung der Parameter berücksichtigte Stichprobenzahl ist in der angehängten Tabelle und in den dargestellten stereographischen Projektionen vermerkt.

Zur Berücksichtigung von Messabweichungen der in dieser Arbeit behandelten Proben wurden für jeden Tiefenpunkt des Profils komplette Bags (Kernabschnitte von 55 cm Länge) zusammengefasst. Diese Vorgehensweise soll repräsentativere Werte für die jeweiligen Profiltiefen liefern und darüber hinaus die Streuweite in den jeweiligen Tiefenabschnitten verdeutlichen.

Hierzu wurden die Messwerte der einzelnen Dünnschnitte (sechs Dünnschnitte je Bag) gemittelt und als Einzelwerte dargestellt. Zur Darstellung der Streuung wurden die Parameter der jeweiligen Dünnschnitte einzeln in den Diagrammen wiedergegeben.

Die Bags, für die weniger als sechs Dünnschnitte verfügbar waren oder verwendet wurden, sind in der angehängten Tabelle (siehe Anhang 9.2) markiert.

3.4 Probleme bei der Datenverarbeitung

3.4.1 NIPR-Daten

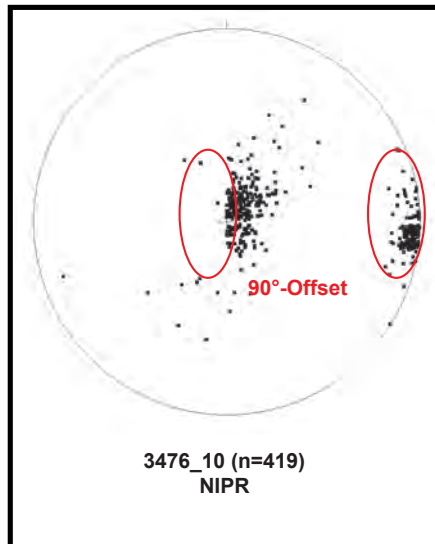


Abb 19: Darstellung des 90°-Offsets im Schmidt'schen Netz

Bei der Bearbeitung der Datensätze, die mit dem Gerät des NIPR (National Institute of Polar Research, Tachikawa, Japan) aufgenommen worden sind, fällt oftmals auf, dass - verglichen mit den AWI-Datensätzen - starke Unterschiede hinsichtlich des Orientierungsgrades aufgetreten sind. Die NIPR-Daten wiesen eine geringere Orientierung auf, was sich auch in den stereographischen Projektionen äußerte. Aus diesen wurde jedoch auch ersichtlich, dass Datenpunkte aus dem zentralen, linken Bereich

der Projektionshalbkugel fehlten, dafür vermehrt am rechten Rand auftauchten.

Auch zeigte eine erneute Betrachtung der Daten mit *Investigator G50*, dass die geometrische Qualität dieser Punkte im Durchschnitt geringer war als die der übrigen.

Verursacht wurde dieses Problem vermutlich durch eine zu hoch gewählte Schliffdicke bei der Messung, wodurch für zahlreiche Punkte ein 90°-Offset hervorgerufen wurde (Abb. 19). Zudem handelte es sich bei dem verwendeten *Fabric Analyser* um ein Vorgängermodell des *G50*, dessen Messwerte eventuell abweichend waren.

Dieser Offset beeinträchtigte die Analyse teilweise stark, weshalb der Entschluss gefasst wurde, diese zwar in die Streukurven miteinzubeziehen, jedoch aus der Berechnung der Mittelwerte für die betroffenen Tiefenbereiche herauszulassen.

3.4.2 Lücken in den Datensätzen

Ein weiteres Problem, das sich im Zuge der Analyse ergeben hat, war das Auftreten von Datenlücken für Datenpunkte mit einem Azimut von ca. 90° oder von ungefähr 270°. In den stereographischen Projektionen machten sich diese Lücken als horizontale Bänder bemerkbar, die durch das Zentrum der Lagenhalbkugel verliefen (Abb. 20).

Auch bei diesem Problem handelt es sich vermutlich um ein Messartefakt, welches eventuell durch eine nicht genau eingehaltene Schliffdicke, oder aber durch ein Softwareproblem hervorgerufen wurde.

Die betroffenen Punkte fehlten in der weiteren Analyse, weil diese eine geometrische Qualität von unter 75% aufwiesen, und somit herausgefiltert wurden. Da diese herausgefilterten Daten jedoch immer im gleichen Bereich der Lagenhalbkugel aufgetreten sind, kann von einem technischen Problem ausgegangen werden.

Aus diesem Grund wurde für die betroffenen Proben (in Tabelle gekennzeichnet, siehe Anhang 9.2), eine erneute Analyse mit niedrigerem Qualitätsniveau (55%)

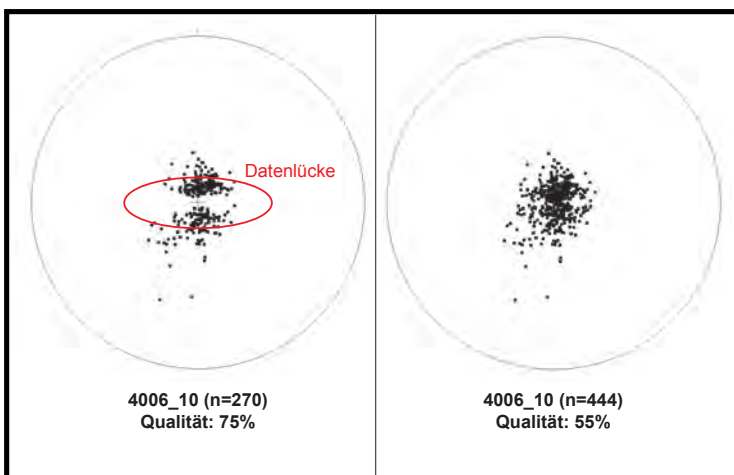


Abb 20: Datensatz mit Datenlücke (links), Datensatz mit verringertem Qualitätsfilter und ohne Datenlücke (rechts)

vollzogen, wodurch das Problem unterbunden werden konnte und die Datenlücken beseitigt wurden.

Dieses Problem trat sowohl bei den NIPR-, als auch bei den AWI-Datensätzen auf.

3.5 Running mean-Methode

Im Zuge der laufenden Arbeit kam bei einer Zwischenbesprechung die Idee auf, eine Methode anzuwenden, welche eine höhere Auflösung, sowie eine genauere Statistik der Messungen ermöglicht.

Diese sogenannte *running mean*-Methode sollte zunächst an einem Bag (0,55 m) getestet werden. Bei dem gewählten Bag handelt es sich um 1676 (ca. 922 m).

Im Gegensatz zu den bisherigen - und für diese Arbeit durchgeführten - Analysen wird das Auswahlraster für die Probenpunkte von *Investigator G50* nicht mehr über den kompletten Dünnschnitt gelegt, sondern auf eine Höhe von ca. 2 cm reduziert. Die Anzahl der Probenpunkte (500) wird dabei beibehalten.

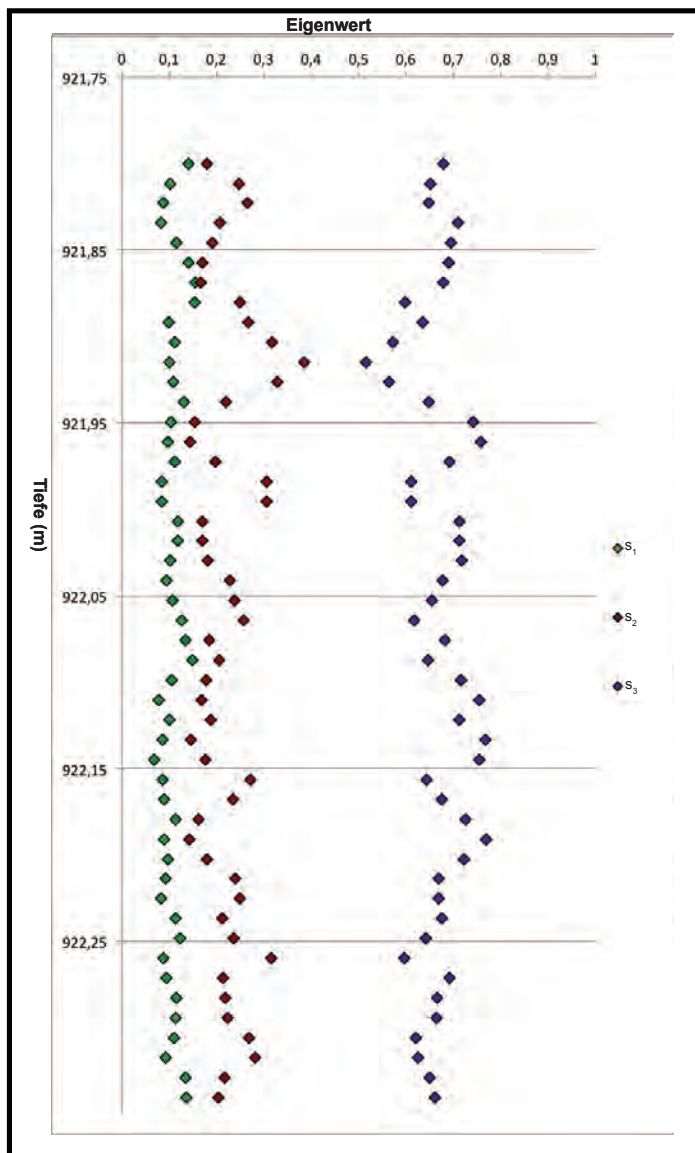


Abb. 21: Eigenwerte im Tiefenprofil (*running mean*)

Anhand dieses Rasters werden nun die Verteilungen für kleinere Abschnitte einer Sektion gemessen, wobei das Raster bei jeder Messung um ca. 1,15 cm nach unten versetzt wird. Dadurch ergibt sich pro Sektion ein Datensatz aus acht Rasteranalysen, welche sich teilweise überlappen und insgesamt ca. 4000 Datenpunkte liefern.

Diese Methode wurde anschließend für die weiteren fünf Sektionen des Bags angewendet und die entsprechenden Daten aufgenommen.

Die Auswertung dieser Daten hinsichtlich ihrer Eigenwerte erfolgte analog zur in 3.2 beschriebenen Verarbeitung.

Die Ergebnisse der Analyse lassen erkennen, dass eine Sektion auch intern deutliche Schwankungen aufweisen kann. Dies wird aus dem Verlauf der Eigenwert-Kurven deutlich (Abb. 21). Neben der so erzielten höheren Auflösung ließe sich nun überlegen, die hohe Zahl an Daten für eine genauere statistische Untersuchung (beispielsweise Standardabweichung) zu verwenden.

Die *running mean*-Methode wurde im weiteren Verlauf dieser Arbeit jedoch nicht verwendet, da sie manuell mit einem zu hohen Zeitaufwand verbunden ist. Eine Automatisierung der Methode würde jedoch große Vorteile und eine schnellere Probenbearbeitung mit sich bringen.

4. Ergebnisse und Darstellung

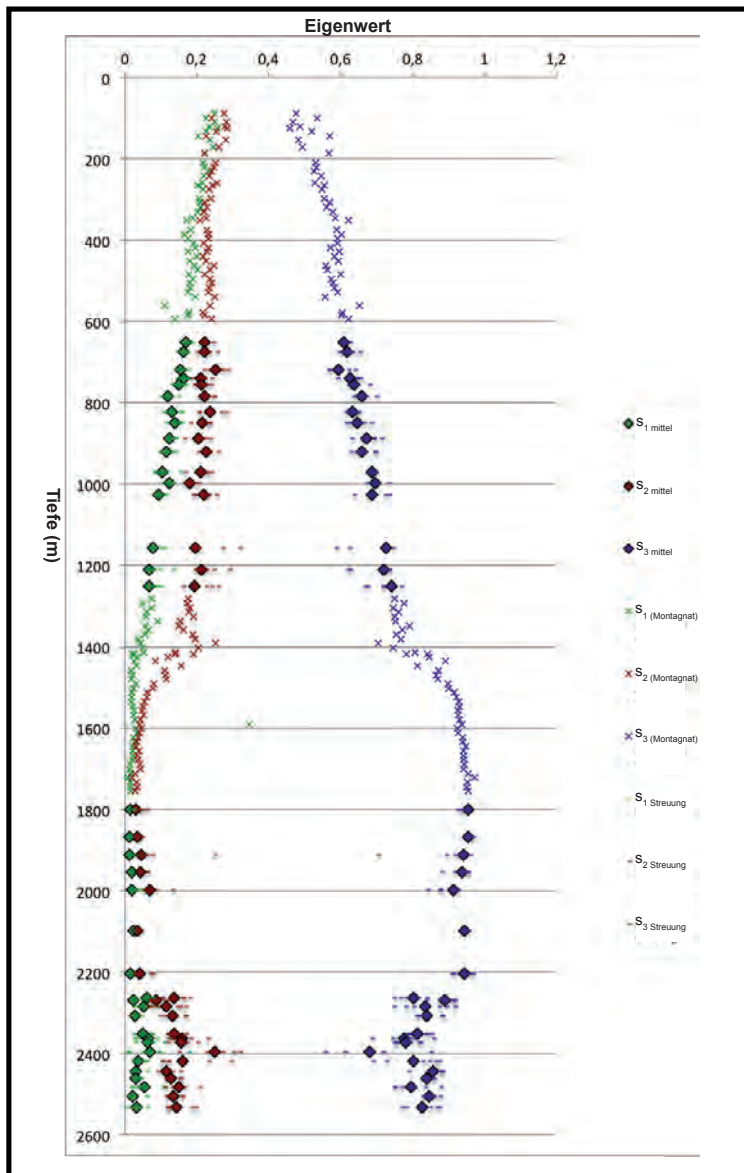


Abb. 22: Eigenwerte im Tiefenprofil

*die mit „x“ markierten Daten wurden von M. Montagnat (personal communication, 14.03.2011) zur Verfügung gestellt

Die aus den vorhandenen Datensätzen ermittelten statistischen Parameter und die dazugehörigen stereographischen Projektionen sollen in diesem Kapitel näher vorgestellt werden. Vorweg ist zu sagen, dass bei der Darstellung der Messungen in den Tiefenprofilen zusätzlich Daten von Dr. Maurine Montagnat hinzegenommen wurden, welche für den obersten Abschnitt (89 m bis 595 m) und den *brittle core* Abschnitt (1282 m bis 1755 m) ermittelt worden sind. Dabei handelt es sich um Einzelproben für jeden Tiefenpunkt, was bedeutet, dass für jeden gemessenen Bag lediglich eine repräsentative Probe gemessen und analysiert wurde. Die ermittelten Parameter beschränken sich zudem auf die Eigenwerte (Abb. 22) sowie den Regelungsgrad (Abb. 23), die sphärische Apertur (Abb. 23) wurde nicht ermittelt. Der für diese Abschnitte dargestellte Woodcock-Parameter (Abb. 24) wurde nachträglich im Zuge dieser Arbeit aus den vorhandenen Eigenwerten errechnet.

Die aus den vorhandenen Datensätzen ermittelten statistischen Parameter und die dazugehörigen stereographischen Projektionen sollen in diesem Kapitel näher vorgestellt werden.

Vorweg ist zu sagen, dass bei der Darstellung der Messungen in den Tiefenprofilen zusätzlich Daten von Dr. Maurine Montagnat hinzegenommen wurden, welche für den obersten Abschnitt (89 m bis 595 m) und den *brittle core* Abschnitt (1282 m bis 1755 m) ermittelt worden sind. Dabei handelt es sich um

4.1 Statistische Parameter

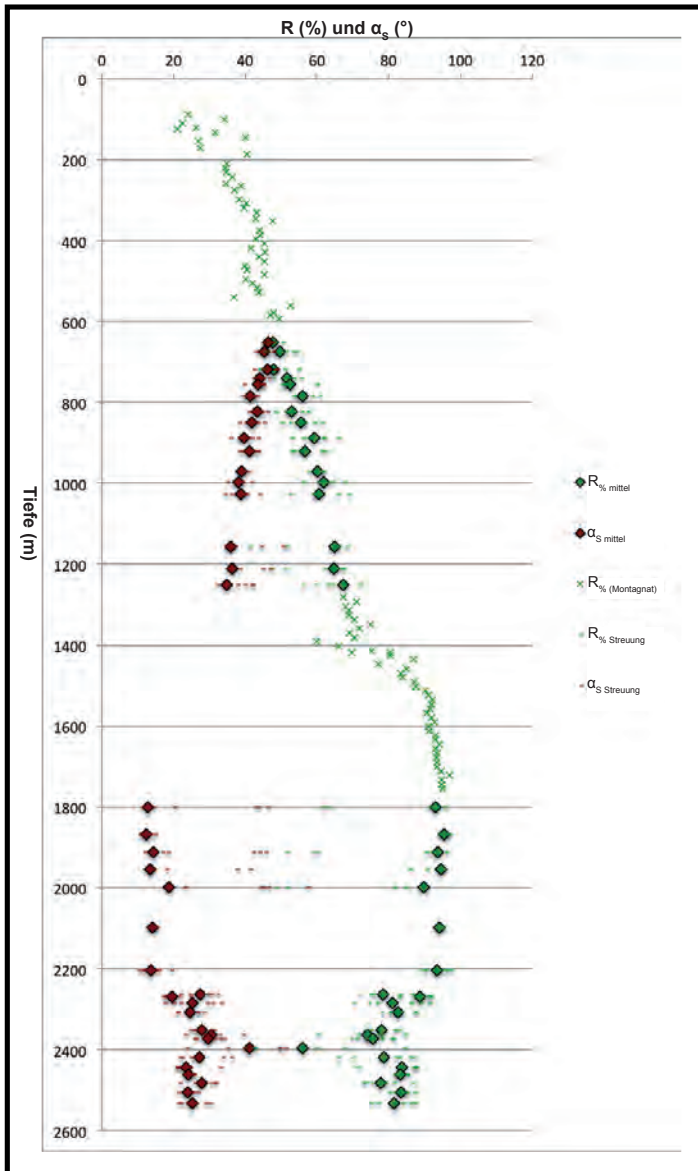


Abb. 23: Regelungsgrad und sphärische Apertur im Tiefenprofil

*die mit „x“ markierten Daten wurden von M. Montagnat (personal communication, 14.03.2011) zur Verfügung gestellt

bleiben ($R_{\%} \approx 44$ bis 45 ; $s_1 \approx 0,18$ bis $0,19$; $s_2 \approx 0,21$ bis $0,22$; $s_3 \approx 0,58$ bis $0,59$). Man könnte bereits an dieser Stelle eine Tendenz zur Gürtelverteilung annehmen, da die Werte für s_1 und s_2 deutlich unterschiedliche Niveaus einnehmen.

Diese Stagnation hält sich bis in eine Tiefe von 550 m. In diesem Bereich fallen leichte Schwankungen der einzelnen Werte auf, an die sich eine erneute Verstärkung der Einregelung anschließt. $R_{\%}$ sowie s_3 nehmen kontinuierlich zu,

Der oberste Datensatz zu den C-Achsenverteilungen liegt in 89 m Tiefe. Bereits in diesem Bereich zeichnet sich eine - wenn auch recht geringe - Einregelung der Eiskristalle ab ($R_{\%} \approx 20$ bis 25 ; $s_1 \approx 0,25$; $s_2 \approx 0,25$; $s_3 \approx 0,46$ bis $0,56$).

In den darunterliegenden Proben (bis zu einer Tiefe von ca. 210 m) fallen relativ starke Schwankungen, insbesondere von $R_{\%}$ und s_3 auf. Diese gehen jedoch ab ca. 210 m in einen stärkeren, kontinuierlichen Anstieg über.

In einer Tiefe von ungefähr 330 m ist zu beobachten, dass dieser Anstieg abgebremst wird und die Parameter auf einem relativ gleichbleibenden Niveau

während s_1 und s_2 wieder abnehmen. Zudem fällt auf, dass die bis dahin geringe Differenz zwischen den beiden kleinen Eigenwerten nun erhöht ist und mit zunehmender Tiefe größer wird.

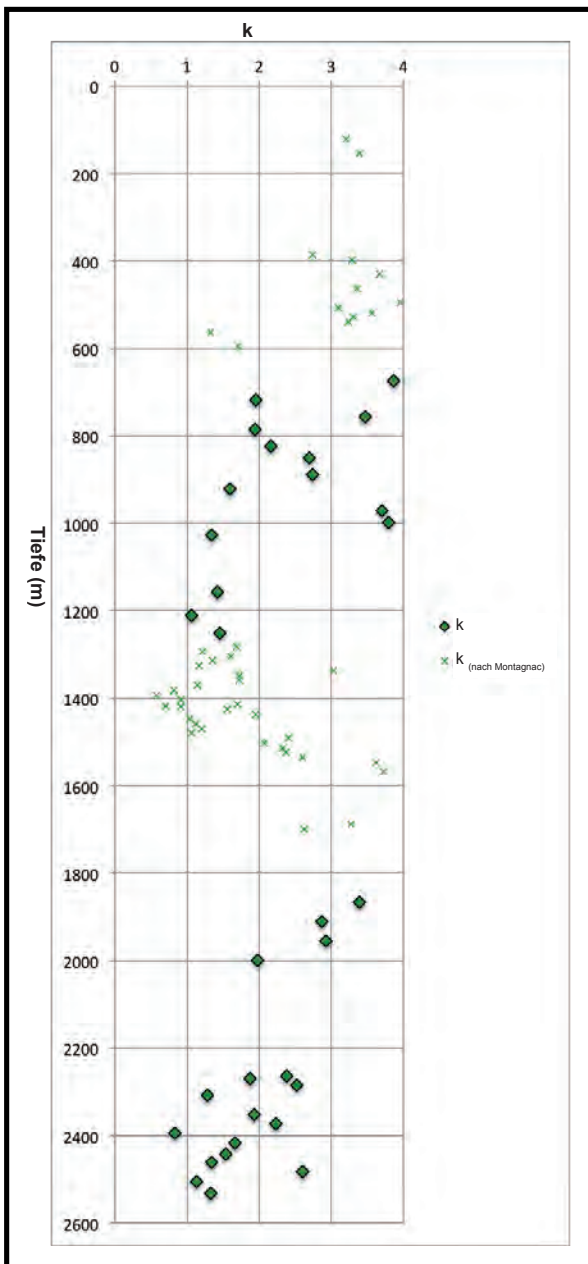


Abb. 24: Woodcock-Parameter im Tiefenprofil

*die mit „x“ markierten Daten wurden anhand der Daten von M. Montagnat (personal communication, 14.03.2011) berechnet

Die angedeutete Gürtelverteilung wird durch den Woodcock-Parameter gestützt. Dieser liefert Werte, die zwar nahe bei 1 liegen, jedoch nicht

- wie für Gürtelverteilungen definiert
- unter 1 (Woodcock, 1977). Lediglich in den darunter liegenden Bereichen um ca. 1400 m herum sinkt k unter den Wert von 1.

Im Tiefenabschnitt von ca. 1320 m, machen sich Schwankungen der übrigen Parameter bemerkbar, die ab einer Tiefe von 1400 m in einen sprunghaften Anstieg des Regelungsgrades und von s_3 übergehen. Im Intervall von 1400 m bis 1600 m steigt $R_{\%}$ von 66,1 auf über 90, s_3 von 0,75 auf 0,93.

Die beiden kleineren Eigenwerte s_2 und s_1 laufen im Bereich um 1400 m noch einmal deutlich auseinander

und nähern sich bis zur Tiefe von 1600 m stark an ($s_2 \approx 0,05$; $s_1 \approx 0,03$). Auch der Woodcock-Parameter zeigt an dieser Stelle einen ausgeprägten Anstieg an und liefert Zahlen, die um ein mehrfaches größer als 1 sind.

Die Parameterwerte bleiben - mit Ausnahme von k - ab 1600 m bis zu einer Tiefe von ca. 2000 m mit leichten Variationen weitestgehend stabil. Bei 2000 m ist eine

leichte Abnahme der Einregelung zu beobachten, welche jedoch bis 2200 m wieder auf das vorige Niveau ansteigt.

In dem Tiefenintervall von 2200 m bis 2533 m treten deutliche Änderungen der Parameter auf. Diese zeichnen sich zunächst durch ein deutliches Absinken des Regelungsgrades aus. Das Minimum wird in diesem Intervall in einer Tiefe von ca. 2395 m erreicht ($R_{\%} \approx 55,9$; $\alpha_S \approx 41,26^\circ$; $s_1 \approx 0,07$; $s_2 \approx 0,25$; $s_3 \approx 0,68$).

In dem darunter liegenden, tiefsten Abschnitt nimmt die Einregelung wieder zu, die Parameter deuten jedoch weiterhin deutliche Wechsel an.

4.2 Schmidt-Diagramme

Die Lagenkugel-Darstellungen der C-Achsenverteilungen zeigen im Tiefenprofil deutliche Änderungen in ihrer Ausprägung und können zur weiteren Beschreibung und Interpretation der gesammelten Daten und Parameter herangezogen werden.

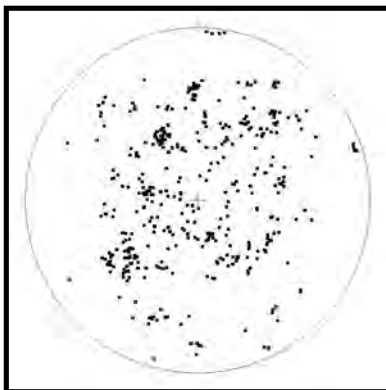


Abb. 25: Schmidt-Diagramm mit schwacher Einregelung (Probe: 1306_40)

Die Schmidt-Diagramme der oberen Bereiche (652 m bis 756 m) zeigen eine leichte Einregelung der C-Achsen in vertikaler Richtung (Abb. 25). Dies äußert sich darin, dass die Verteilungsdichte in den äußeren Bereichen der Lagenkugeln gering ist, jedoch zum Zentrum hin zunimmt. In diesem Intervall ist auch zu sehen, dass die Konzentration der Punkte mit der Tiefe leicht zunimmt. Diese Beobachtung wird durch den beschriebenen Anstieg von s_3 gestützt.

In einer Tiefe von 784 m ist zu erkennen, dass sich die Verteilungsform ändert. Die Punktwolke der C-Achsen wird seitlich eingeengt und kann als relativ breiter Gürtel beschrieben werden. Deutliche Beispiele sind die Proben 1426_40, 1496_30 oder 1546_60 (siehe Anhang, 9.1).

In etwas größeren Tiefen intensiviert sich diese Einengung und die Gürtelverteilung wird deutlicher erkennbar (Abb. 26), wie beispielsweise in den Proben 1676_50, 1766_40, 2204_20 oder 2275_20 (siehe Anhang, 9.1). Jedoch fällt zusätzlich auf, dass in diesen Tiefenbereichen auch Verteilungen auftauchen, die eine geringere Einregelung aufweisen und sich durch eine größere Streuung auszeichnen. Das

gürtelartige Verteilungsmuster ist in den Proben 1866_50, 2106_30 oder 2204_40 (siehe Anhang 9.1) nicht so deutlich ausgeprägt.

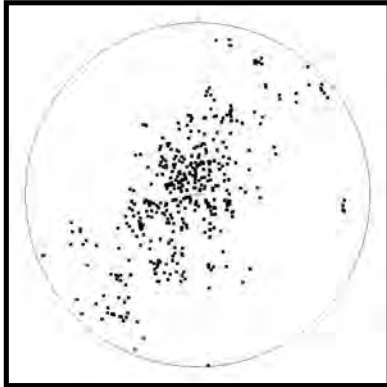


Abb. 26: Schmidt-Diagramm mit Gürtelverteilung (Probe: 2204_60)

Betrachtet man die Projektionen der bearbeiteten ab 1800 m Tiefe, so ist erkennbar, dass sich die starke Änderung der statistischen Parameter im Intervall von 1400 m bis 1600 m auch in den Schmidt-Diagrammen niederschlägt. Das *single maximum* tritt offenbar bereits bei 1600 m ein, ist jedoch nicht mit Schmidt-Diagrammen nachweisbar, da die Proben aus dieser Tiefe in dieser Arbeit nicht bearbeitet wurden.

Ein starkes *single maximum* ist kennzeichnend für den Abschnitt von 1800 m bis 2200 m (Abb. 27). Allerdings wird auch deutlich, dass die Intensität dieser Verteilung vor allem im Bereich um ca. 2000 m leichten Schwankungen unterliegt. Die konzentrische Punktwolke nimmt hier eine leicht elliptische, elongierte Form an (Bag 3556 und Bag 3636, siehe Anhang 9.1).

Außerdem ist bei mehreren Bags auffällig, dass die Verteilungen ein zweifaches *single maximum* andeuten, wobei eine Verteilungskonzentration zentral in der Lagenkugel liegt, die zweite um ca. 90° versetzt ist. Hierbei handelt es sich wahrscheinlich um ein Messartefakt. Eine genauere Erläuterung dieser Erscheinung wurde bereits in 3.4.1 diskutiert.

Am Übergang von Bag 4006 zu Bag 4116 (siehe Anhang 9.1) zeigt sich eine deutliche Veränderung der Verteilungsform in den Schmidt-Diagrammen.

Die C-Achsen sind nun auf einige, deutlich von einander getrennte Punkte konzentriert und weisen insgesamt eine höhere Streuung auf.

Betrachtet man die Bilder der Dünnschnitte, so ist auch erkennbar, dass die Korngröße der Eiskristalle in Bag 4116 deutlich größer ist und die C-Achsen vermutlich deshalb auf einige, wenige Punkte verteilt sind.

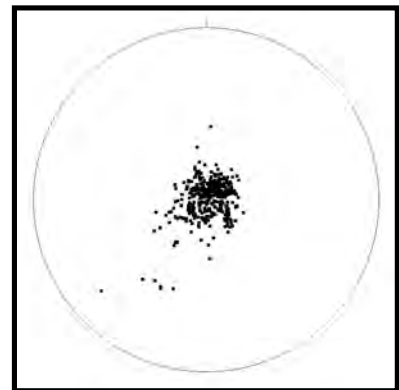


Abb. 27: Schmidt-Diagramm mit deutlichem *single maximum* (Probe: 4006_30)

In den darunter folgenden Bags (4126 bis 2364, siehe Anhang 9.3) ist die Korngröße jedoch wieder geringer und die Verteilung ähnelt eher einem *single maximum*, jedoch mit teilweise stärkeren Abweichungen und einer elongierten bis elliptischen Ausbildung.

Der Wechsel im Verteilungsmuster, wie er zwischen Bag 4006 und Bag 4116 beschrieben wird, wiederholt sich im tiefsten Abschnitt mehrfach. Auf Verteilungsfelder mit wenigen, jedoch deutlichen Zusammenballungen von C-Achsenorientierungen eher großer Eiskristalle (Bags 4299, 4316, 4256, 4397, 4514 und 4606, siehe Anhang 9.3) folgen Achsenverteilungen kleinerer Kristalle, die zum Zentrum der Lagenkugel hin ausgerichtet sind (Bags 4006, 4126, 4156, 4196, 4276, 4442, 4476 und 4556, siehe Anhang 9.3).

Innerhalb dieses tiefsten Intervalls gibt es neben dieser Wechselfolge noch weitere Auffälligkeiten zu beobachten.

Zum einen nehmen die zentral orientierten Verteilungen nicht die Form eines *single maximums* an, sondern zeichnen sich durch eine gestreckte bis stark elliptische Form aus, wie zum Beispiel in den Bags 4196, 4276 und 4442 (siehe Anhang 9.1) zu sehen ist (Abb. 28).

Bag 4556 (siehe Anhang 9.1) in 2505 m Tiefe weist ein besonders auffälliges Verteilungsmuster auf, welches zwar auch als elliptisch beschrieben werden kann, jedoch an den Seiten sehr stark eingengt ist. Eine weitere Auffälligkeit in den Aufnahmen aus diesem Tiefenabschnitt sind zudem geringmächtige, horizontale Bänder, welche immer wieder auftreten. Sie zeichnen sich in den Trend-Abbildungen durch dunklere Farbmuster ab, was auf eine abweichende Orientierung hindeutet.

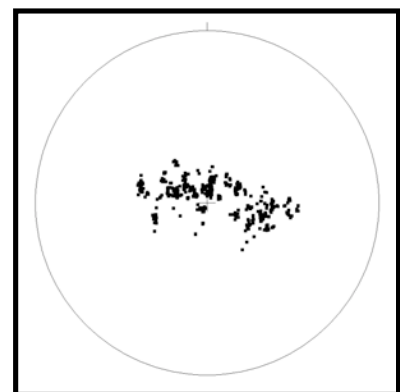


Abb 28: Elliptisch ausgebildetes Verteilungsmuster (Probe: 4442_60)

5. Interpretation der Daten

5.1 Interpretation der C-Achsenverteilungen im NEEM Eiskern

Die im Laufe der Arbeit gewonnenen und beschriebenen Daten über die C-Achsenverteilung im NEEM Eiskern zeigen in ihrem Tiefenprofil signifikante Veränderungen hinsichtlich der statistischen Parameter und der Schmidt-Diagramme.

Diese Verteilungsmuster lassen eine Interpretation hinsichtlich der Spannungskonfigurationen im Eisschild an der Bohrlokation, sowie anderen Eigenschaften des Eises zu.

5.1.1 Schwache Einregelung (89 m - 800 m)

Betrachtet man zunächst den obersten Bereich zwischen 89 m und ca. 200 m, so zeigen die deutlichen Schwankungen, dass die Einregelung der Eiskristalle sich noch in einem recht frühen und nicht eindeutigen Anfangsstadium befindet.

Der darauf folgende schnelle Anstieg der Einregelung, welcher jedoch mit der Tiefe leicht abnimmt, könnte darauf schließen lassen, dass das noch unorientierte, in den Härteeigenschaften isotrope Eis ein leicht erhöhtes Deformations- und somit Einregelungspotential bietet.

Die mit der Tiefe zunehmende, jedoch abschwächende Einregelung könnte dies belegen, da die Härte des Eises in vertikaler Richtung mit zunehmender Einregelung steigt.

Dass das einwirkende Spannungsregime in diesem oberen Bereich primär durch die uniaxiale, vertikale Kompression geprägt wird, zeigt sich in den ermittelten Schmidt-Diagrammen. Diese weisen eine leichte Konzentration der Orientierung der C-Achsen in Richtung der Vertikalachse auf, was als Hinweis auf ein solches Spannungsfeld gedeutet werden kann (Azuma, 1994).

5.1.2 Gürtelverteilung (800 m - 1400 m)

Die angedeutete Gürtelverteilung, welche sich mit zunehmender Tiefe intensiviert, deutet eine Änderung der Spannungskonfiguration im Tiefenabschnitt zwischen 800 m und 1400 m hin. Aus den Verteilungen der C-Achsen für dieses Intervall lässt sich auf eine dominantere longitudinale Extension schließen (Azuma, 1994).

Die Differentialspannungen ergeben somit eine Dehnung des Gefüges in einer horizontalen Raumrichtung (orthogonal zum Verlauf der Eisscheide) und eine Einregelung der C-Achsen in der Ebene, die senkrecht zur Haupttextensionsrichtung steht. Jedoch deuten die ermittelten Daten darauf hin, dass die extensive Kraft nicht allzu ausgeprägt ist. Dies zeigen einerseits die Schmidt-Diagramme mit den eher breit ausgebildeten Gürteln, andererseits deuten auch die ermittelten Parameter darauf hin. So erreicht der Woodcock-Parameter, der als grober Indikator für Verteilungsmuster betrachtet werden kann (Woodcock, 1977), nur selten Werte, die niedriger als 1 sind. Eine mögliche Ursache für diese abgeschwächte Intensität und die geringere Extensionskraft könnte ein eher flaches Relief des Grundgebirges sein. Ist die Morphologie im Untergrund weniger steil ausgeprägt, kann dies die Ursache für niedrigere Fließraten und somit geringere Extension sein.

Ein anderer Grund könnte ein weniger ausgeprägtes hydrostatisches Potential im Eisschild sein, was durch eine geringere Masse der Eisaufasten, oder eine andere Transportrichtung der oberen Eisschichten verursacht werden könnte.

Wahrscheinlich weisen die Gürtelverteilungen in den Schmidt-Diagrammen im Abschnitt zwischen 1300 m und 1400 m ihre deutlichste Ausprägung auf, da die Parameter in diesem Bereich die stärkste Intensivierung zeigen, allerdings konnten hierzu die Projektionen im Rahmen dieser Arbeit nicht gezeigt werden, da es sich um den von M. Montagnat bearbeiteten Datenbereich handelt.

5.1.3 *Single maximum* (1600 m - 2200 m)

Der deutliche Anstieg des Regelungsgrades und die damit einhergehende Bildung eines *single maximums* zwischen 1400 m und 1600 m, grenzt sich außerordentlich scharf von der Gürtelverteilung ab.

Dieser einschneidende Übergang kann durch zwei Ursachen hervorgerufen werden. Einerseits nimmt der Einfluss der basalen Scherung an der Gletscherbasis zu, wodurch die Bildung eines *single maximums* durch die Vorzugsorientierung der C-Achsen senkrecht zur Scherebene begünstigt wird (Wang et al., 2002). Andererseits könnte die deutliche Grenze bei ca. 1400 m damit erklärt werden, dass in dieser Tiefe die Grenze zwischen dem Holozän und dem letzten Glazial liegt (Sepp Kipfstuhl, personal communication 24.03.2011).

Da sich die Eigenschaften von glazialen und interglazialen Eis deutlich unterscheiden (glaziales Eis hat eine höhere Staub- und Ionenkonzentration und weist geringere Korngrößen auf) (Duval & Lorius, 1980), kann dies auch deutliche Auswirkungen auf das Spannungsregime haben, womit sich die recht weit oben gelegene, scharfe Abgrenzung zum *single maximum* erklären lassen könnte.

Die leichte Absenkung des Regelungsgrades in 2000 m Tiefe könnte darauf schließen lassen, dass in dem Abschnitt eine Änderung im Spannungsgefüge des Eises auftritt. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass es sich bei dem Wert um einen minimalen „Ausreißer“ handelt, da der Datenpunkt einerseits nicht in den Trend passt (in etwa gleichbleibende Parameter von 1850 m bis 2200 m). Andererseits muss berücksichtigt werden, dass die Datengrundlage für diesen Tiefenabschnitt lediglich auf einer Probe basiert (3636_40), da die restlichen fünf Datensätze auf NIPR bezogen waren und daher nicht in den Mittelwert miteinbezogen werden konnten.

5.1.4 Starke Variationen (2200 m - 2533 m)

Die auffällige, deutliche Änderung der Verteilungsmuster und der Parameter ab einer Tiefe von ca. 2200 m kann diverse Ursachen und Einflüsse haben, welche im Folgenden aufgeführt werden.

5.1.4.1 Faltungshypothese

Zunächst ist in Erwägung zu ziehen, dass die abwechselnde Folge der beiden unterschiedlichen C-Achsengefüge durch eine Verfaltung des Eises hervorgerufen

werden kann. Bei überkippten Falten wäre eine Wiederholung von stratigraphischen Einheiten, welche ursprünglich gleich alt waren, im Tiefenverlauf sehr wahrscheinlich.

Eine solche Verfaltung an der Gletscherbasis müsste in entsprechenden klimatologischen Untersuchungen berücksichtigt werden. Insbesondere, da gerade in diesem Tiefenintervall das Eem vermutet wird.

Als Gegenargument zu einer solchen Faltenstruktur könnte aufgeführt werden, dass die C-Achsenverteilungen keine Neigungswinkel oder Krümmungen der Eisschichten - beispielsweise durch eine Abweichung der *single maxima* vom Zentrum der Lagenkugel - widerspiegeln. Hierbei wäre jedoch zu bedenken, dass das natürliche Eis sich aufgrund der Nähe zum Schmelzpunkt sehr dynamisch verhält und das Gefüge sehr wahrscheinlich durch die aktuell gegebenen Deformationsmechanismen geprägt wird. Da der Mechanismus in dieser Tiefe vermutlich vor allem die basale Scherung ist, ist in den Schmidt-Diagrammen eine annähernd vertikale Ausrichtung der C-Achsen zu beobachten.

5.1.4.2 Rekristallisationshypothese

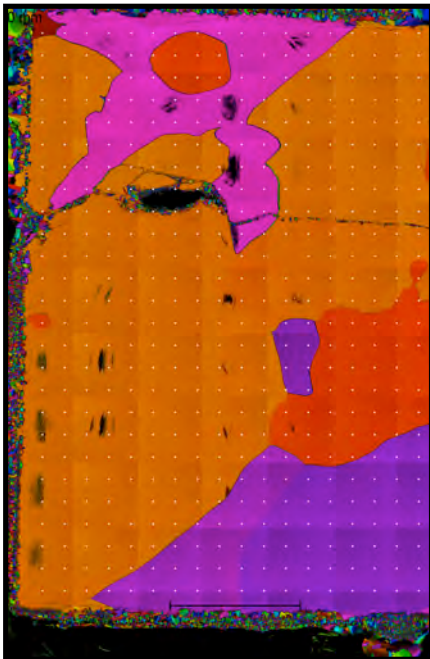


Abb 29: Probe 4606_50 mit großen, verzahnten Rekristallisationskörnern

Die Lagen, in denen deutlich erkennbar ist, dass sie keine Vorzugsorientierung in der Vertikalen zeigen, lassen auf einen weiteren Faktor schließen, der sich auf die Verteilungsmuster in diesen Tiefen auswirkt. Dies könnte als Rekristallisation durch Korngrenzmigration interpretiert werden, da die beschriebenen Verteilungen in den Abschnitten mit großen Kristalldurchmessern auftreten.

Ein weiterer Hinweis auf Rekristallisation ist, neben den sehr großen Korngrößen und der Verzahnung der Körner (Abb. 29), auch die Ausrichtung der C-Achsen der jeweiligen Kristalle.

Es lässt sich beobachten, dass zwischen den Verteilungsschwerpunkten, welche C-

Achsenorientierungen von jeweils einem Kristall angeben, Winkel zwischen 35° und 45° liegen. Diese weisen darauf hin, dass es sich bei den Verteilungen um sogenannte *diamond patterns* handelt (Abb. 30) (Azuma & Higashi, 1985). In diesen Verteilungsmustern treten zwischen den C-Achsen der verschiedenen Kristalle Winkel im Bereich

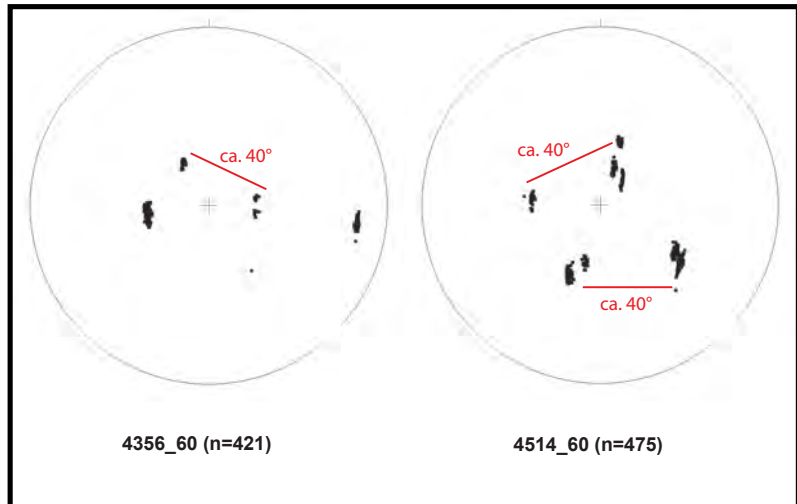


Abb. 30: *diamond patterns* mit spezifischen Winkelabständen

von ca. 40° auf (Suzuki, 1970). In diesen Stellungen zueinander haben die Eiskristalle eine energetisch sehr günstige Lage mit der geringsten Korngrenzenergie (Abb. 31) in dem häufigen Misorientierungsbereich um ca. 40° bis 45° .

Der Grund dafür, dass diese Erscheinung nicht im kompletten Intervall, sondern lediglich in einzelnen Tiefenabschnitten auftritt, könnte in der

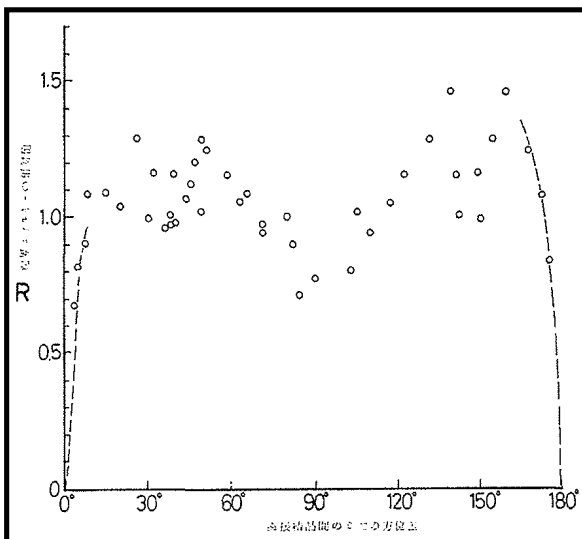


Abb. 31: Relative Korngrenzenergie (y-Achse) im Verhältnis zu Misorientierungen (x-Achse). Bei ca. 40° , 90° und ca. 150° sind lokale Minima zu beobachten.

Grundzusammensetzung des Eises, beziehungsweise des ursprünglichen Schnees liegen. Eis, das durch Korngrenzmigrationsrekristallisation und Kristallwachstum - und damit seiner Korngröße - geprägt ist, hat einen geringeren Anteil an Einschlüssen wie Staubpartikeln und ist „reiner“.

Ist das Eis jedoch stärker durch Staub und andere Einschlüsse verunreinigt, wird die Bewegung der Korngrenzen

und somit das Kristallwachstum und die Rekristallisation gehemmt (Thorsteinsson, 1996; Azuma et al. 2000). Hier werden die C-Achsenorientierungen vor allem durch Deformationseinflüsse geprägt, was im betrachteten Intervall zur Ausprägung von *single maxima* - oder zumindest angenäherten Verteilungen - führen kann.

5.1.4.3 Scherhorizonthypothese

Die in den tieferen Sektionen auftretenden, geringmächtigen, horizontalen Bänder (Abb. 32) könnte man eventuell als sehr dünne Scherhorizonte interpretieren, die in ihrer Orientierung Abweichungen zur den übrigen Eiskörnern aufweisen. Eventuell wäre auch denkbar, dass diese Lagen beispielsweise stärkere Staub- oder Spurenstoffanteile aufweisen und sich deshalb von den umliegenden Kristallen unterscheiden.

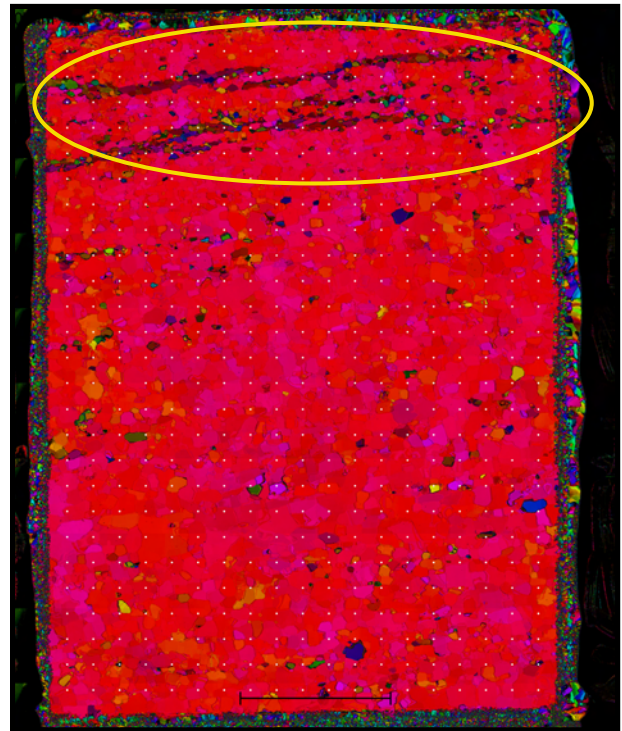


Abb. 32: Dünne, horizontale Lagen (gelb eingekreist) in Probe 3556_30

5.2 Variabilität der Messparameter

Aus den ermittelten Parametern und den Schmidt-Diagrammen wird deutlich, dass selbst in Dünnschnitten von Einzelproben, die aus den gleichen Tiefenabschnitten stammen noch teilweise stärkere Unterschiede auftreten können. Dies wird besonders bei Betrachtung der in den Tiefenprofilen dargestellten Streuwerte deutlich.

Dabei muss jedoch ausgeschlossen werden, dass einige dort gezeigte Abweichungen nur auf Unterschiede im Grad der Orientierung und nicht durch methodische Beeinträchtigung (siehe NIPR-Daten, 3.4.1) hervorgerufen werden.

Allgemein kann man die Streuungen jedoch als grobe Fehlerindikatoren betrachten, welche bei der Interpretation der Daten als hilfreiche Toleranzbereiche der Messdaten miteinbezogen werden können.

6. Vergleich und Gegenüberstellung zu NorthGRIP-Daten

6.1 Einführung NorthGRIP

Die Abkürzung NorthGRIP steht für „North Greenland Icecore Drilling Project“, eine Tiefenbohrung im grönländischen Eisschild, die hauptsächlich im Zeitraum von 1999 bis 2001 stattfand (bis zum Jahr 2003 wurden die letzten 80 m bis zum Grundgebirge gebohrt). Auch dieses Projekt stand unter der Federführung des Niels Bohr Institutes der Universität Kopenhagen.

Die Bohrlokation ist im nördlichen Bereich Grönlands gelegen (75,1°N, 42,3°W) und befindet sich ca. 3000 m über NN. Die Entfernung zum NEEM-Camp beträgt ca. 330 km in südöstlicher Richtung.

Die Mächtigkeit des Eisschildes am NorthGRIP-Camp beläuft sich auf ca. 3084 m. Dieser stellt - wie auch an der NEEM-Lokation - an der Bohrstelle eine Eisscheide mit zwei Hauptflussrichtungen (NEE und SWW) dar, was die beiden Kerne vergleichbar macht. (www.gfy.ku.dk/~www-glac/ngrip/index_eng.htm)

6.2 C-Achsenverteilungen des NorthGRIP Eiskerns

Die C-Achsen-Verteilungen des NorthGRIP-Kerns wurden mit einem älteren Messgerät (AIFA, *Automatic Ice Fabric Analyser*) untersucht, welches jedoch auf dem gleichen Prinzip basiert wie der bei NEEM eingesetzte *Fabric Analyser* von Russel-Head Instruments®.

Zur Auswertung der Verteilungen wurden neben stereographischen Projektionen der einzelnen Abschnitte auch statistische Parameter herangezogen (*eigenvalues, degree of orientation, spherical aperture, woodcock k parameter*).

Aus den im Diagramm dargestellten Daten lässt sich erkennen, dass man den Bohrkern hinsichtlich der C-Achsen in fünf Abschnitte gliedern kann.

1. Der oberste Abschnitt, der bis in eine Tiefe von ca. 805 m reicht, zeigt eine Gleichverteilung der Achsen. Deutlich sichtbar ist dies einerseits in der stereographischen Projektion aber auch in den statistischen Parametern (Abb. 33,

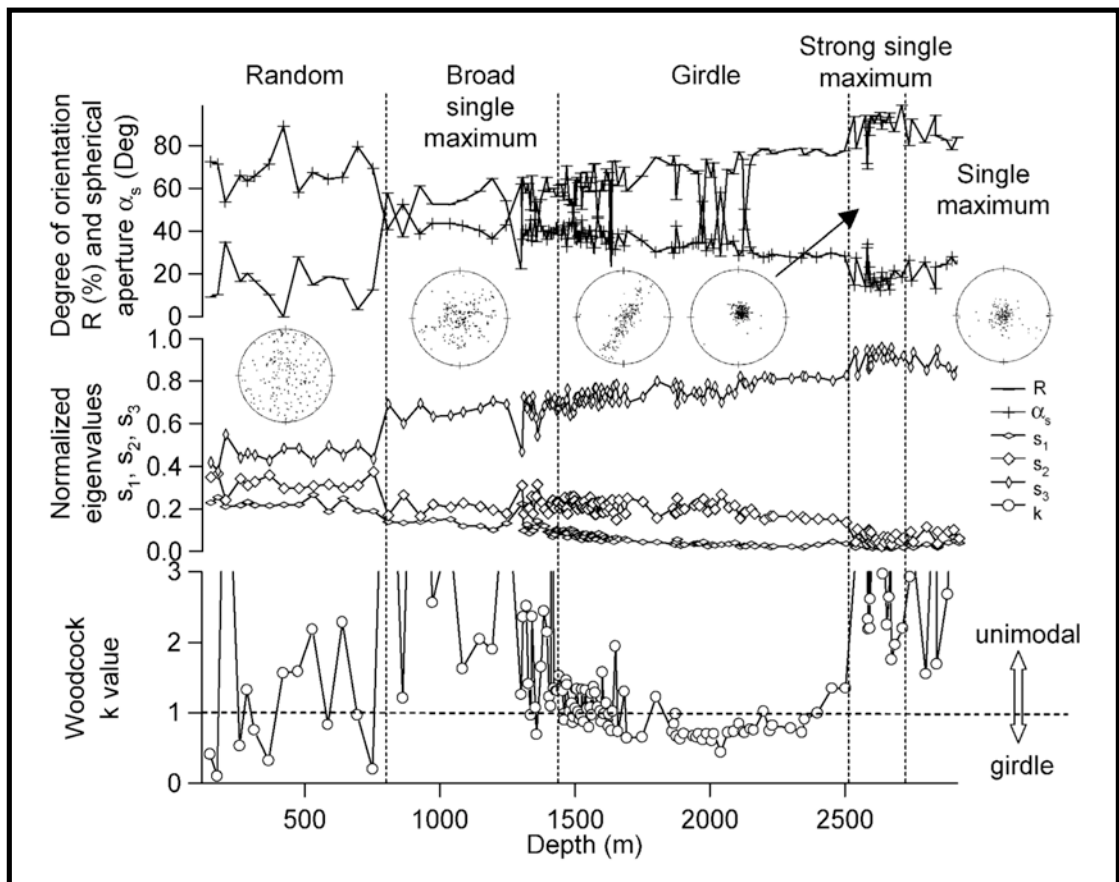


Abb. 33: Statistische Parameter der NorthGRIP C-Achsenverteilungen

Wang et al., 2002). Während α_s recht hoch ist, ist der Regelungsgrad sehr gering. Die Eigenwerte sind in etwa gleich groß. Der Woodcock-Parameter weist deutliche Variationen auf, was jedoch damit zu erklären ist, dass er lediglich für die Unterscheidung von *single maxima* und Gürtelverteilungen herangezogen werden kann.

2. Im Abschnitt darunter, welcher bis ca. 1450 m Tiefe reicht, zeigt sich die Ausprägung eines breiteren *single maximums*, was durch einen Anstieg des s_3 -Eigenwertes, die Anpassung von $R\%$ und α_s , sowie dem Woodcock-Parameter (>1) angedeutet wird.

3. Ab 1450 m geht die Orientierung in eine typische Gürtelverteilung über, bei der eine größere Differenz zwischen s_1 und s_2 vorherrscht, welche durch die erhöhte longitudinale Extension in diesem Bereich verursacht wird.

4. Die Gürtelverteilung nimmt in einer Tiefe von ungefähr 2500 m ab und es bildet sich ein ca. 200 m mächtiger Abschnitt mit einem sehr deutlichen *single maximum*. Die Eigenwerte s_1 und s_2 sind sehr gering, s_3 hingegen fast 1, was die unimodale Verteilung gut widerspiegelt. Auch der Regelungsgrad liegt über 80% und in der stereographischen Projektion ist die Achsenverteilung als sehr eng gestreute Punktwolke im Zentrum des Feldes erkennbar.

5. Im tiefsten Abschnitt des Profils (ab 2700 m) bildet sich erneut ein gemäßigteres *single maximum* mit etwas geringerer Einregelung aus.

Der Übergang von einer Gürtelverteilung hin zu einem *single maximum* wird vermutlich dadurch bedingt, dass die zunächst dominante Extension der Eismassen mit zunehmender Tiefe durch die basalen Scherkräfte an der Gletscherbasis abgelöst wird. Daraus resultiert eine Orientierung der C-Achsen in Richtung der Vertikalachse.

Allgemein lässt sich sagen, dass die statistischen Parameter mit der Tiefe eine immer deutlichere Ausprägung zeigen. $R_{\%}$ und s_3 nehmen kontinuierlich zu, während α_s , s_1 und s_2 stetig abnehmen. Der Woodcock-Parameter variiert im Bereich zwischen 0 und 1 für Gürtelverteilungen und im Bereich >1 für *single maxima* (Woodcock, 1977).

Lediglich im untersten Abschnitt ist ein leichter Rückgang der Intensitäten der einzelnen Parameter zu beobachten. Dies könnte durch Rekristallisations- und Umstrukturierungsprozesse der Kristalle in dieser Tiefe bedingt sein (Wang et al., 2002).

6.3 Vergleich von NorthGRIP und NEEM

Der Vergleich der C-Achsenverteilungen der NorthGRIP- und der NEEM-Kampagnen bot sich für diese Arbeit an, da beide Eiskerne aus dem nördlichen Bereich Grönlands stammen und beide von den glaziologischen Gegebenheiten einer Eisscheide geprägt sind. Im folgenden Kapitel werden die Entwicklungen der statistischen Parameter (Abb. 34) sowie der Schmidt-Diagramme verglichen, sowie mögliche Ursachen für Unterschiede diskutiert.

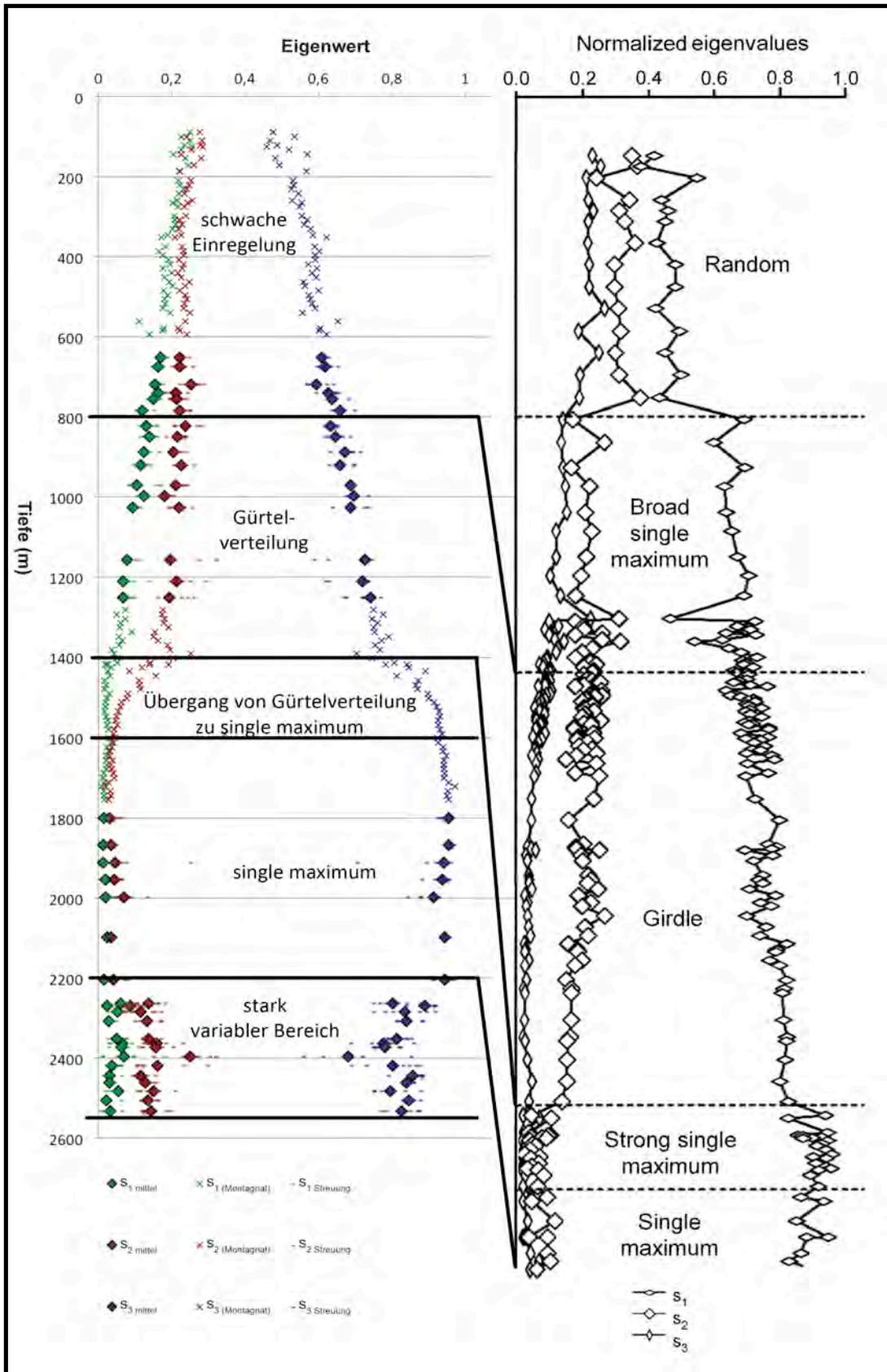


Abb. 34: Vergleich zwischen NEEM (links) und NorthGRIP (rechts)

Betrachtet man die oberen Bereiche der beiden Kerne, so lässt sich zunächst sehen, dass eine ähnliche Entwicklung stattfindet. Die zu Beginn relativ gering orientierten C-Achsen richten sich mit zunehmender Tiefe zunehmend in Richtung der Vertikalachse aus und bilden in den Schmidt-Diagrammen eine breite, konzentrische Verteilung. Diese wird von Wang et. al (2002) als *broad single maximum* bezeichnet.

Auffällig ist jedoch, dass sich diese Entwicklung bis zu einer Tiefe von ca. 1450 m intensiviert, bevor sie dann einen Übergang zu einer breiteren Gürtelverteilung vollzieht.

Im NEEM Eiskern ist diese Grenze zur Gürtelverteilung vermutlich wesentlich höher in einer Tiefe von ungefähr 780 m angesiedelt. Dieser Unterschied könnte implizieren, dass die longitudinale Extension an der NEEM Lokation wesentlich früher eintritt, als bei NorthGRIP. Dies könnte bedeuten, dass der Eisschild an NEEM schon in geringeren Tiefen durch eine verstärkte Eisextension orthogonal zur Eisscheide geprägt ist.

Bei weiterer Betrachtung der Gürtelverteilungen fällt ein weiterer, deutlicher Unterschied auf. Im NorthGRIP scheint diese wesentlich deutlicher ausgeprägt zu sein. Dies zeigt sich einerseits in den Schmidt-Diagrammen von NorthGRIP, welche einen stark eingeeengten Gürtel zeigen (zum Beispiel bei 2040 m), andererseits aber auch in den statistischen Parametern, insbesondere beim Woodcock-Parameter, welcher bei NorthGRIP für das Tiefenintervall von 1450 m bis ca. 2500 m in großen Bereichen kleiner als 1 ist oder zumindest 1 sehr nahe liegt.

Diese deutliche Ausprägung des Woodcock-Parameters ist im NEEM Eiskern nur lokal (um 1400 m Tiefe) zu beobachten, woraus man insgesamt schließen könnte, dass die longitudinale Extension im NorthGRIP Kern einen wesentlich dominanteren Einfluss auf die Eismassen zeigt, der sich zudem, wie dem Tiefenprofil zu entnehmen ist, auch über ein größeres Tiefenintervall auswirkt.

Der Übergang von der Gürtelverteilung zum *single maximum* findet in den C-Achsen des NorthGRIP Kerns erst bei über 2500 m statt, während dieser bei NEEM schon in einer Tiefe von ca. 1400 m einsetzt.

Daraus lässt sich ableiten, dass der Einfluss der basalen Scherung an der Grenze zwischen Eis und Grundgebirge in einem weitaus kleineren Bereich als im NEEM

Eiskern wirkt, was bei NEEM vermutlich seine Ursache in den unterschiedlichen Zusammensetzungen der Eisschichten aus dem Holozän und dem letzten Glazial haben könnte (siehe 5.).

Eine weitere, wichtige Ursache könnte sein, dass an der Gletscherbasis von NorthGRIP Aufschmelzprozesse stattfinden. Bei NEEM ist das Eis bis an die Basis durchgefroren was den Einfluss der Scherung im Gegensatz zu Schmelzwasser nicht abschwächen würde (Sepp Kipfstuhl, personal communication, 21.04.2011).

Allgemein lässt sich zu den Ausprägungen der *single maxima* in den tiefen Bereichen der beiden Kerne sagen, dass diese eine ähnlich starke Ausprägung aufweisen. Diese unterscheiden sich bei NEEM (ca. 1600 m bis ca. 2200 m) im Vergleich zu NorthGRIP (ca. 2500 m bis ca. 2700 m) in den unterschiedlichen Tiefenniveaus und in den größeren Erstreckungen.

Die Abnahme des Regelungsgrades an der Basis ist ebenfalls bei beiden Eisbohrkernen zu erkennen, jedoch ist diese in den C-Achsenverteilungen des NEEM Kerns durch deutlichere Schwankungen gekennzeichnet als bei NorthGRIP.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass beide Kerne einen ähnlichen, für Eisscheiden typischen Verlauf aufweisen, der zunächst mit einer leichten, vertikalen Einregelung beginnt, dann in eine Gürtelverteilung übergeht und im tiefsten Abschnitt zunächst durch ein starkes *single maximum*, das an der Basis abschwächt gekennzeichnet ist.

Jedoch ließ sich feststellen, dass besonders die Gürtelverteilungen mit unterschiedlich starken Ausprägungen und in unterschiedlichen Tiefen aufgetreten sind und man daher annehmen kann, dass die extensiven Kräfte an der NorthGRIP Position eine weitaus dominantere Rolle einnehmen, während an der NEEM Position der Einfluss der basalen Scherung einen stärkeren Einfluss auf die C-Achsenverteilungen hat.

7. Zusammenfassung

Die Verteilungen von C-Achsen können, wie in dieser Arbeit beschrieben, Aufschluss über Deformationsprozesse, Rekristallisationserscheinungen, Spannungs-konfigurationen und auffällige Strukturen in polaren Eisschilden liefern. Dabei wird die Härteanisotropie von Eis (Ih) genutzt, die eine Einregelung der C-Achsen verursacht, sobald mechanische Deformation auf das Eis einwirkt.

Zur genaueren Analyse müssen neben der Darstellung der Achsenverteilungen in Schmidt-Diagrammen auch diverse statistische Parameter herangezogen werden, um eine quantitative Aussagekraft zu erlangen. Auch ist es notwendig, sich ein Bild von den durchschnittlichen Korngrößen zu machen, um diese eventuell in einen Bezug zu den C-Achsenorientierungen setzen zu können.

Im NEEM Eiskern wird deutlich, dass der Verlauf der Verteilungsmuster dem entspricht, den man von einer Eisscheide erwarten könnte. Jedoch wird aus dem Vergleich mit dem NorthGRIP Eiskern, der in den Jahren 1999 bis 2003 ca. 330 km südwestlich vom NEEM Camp gebohrt wurde, auch ersichtlich, dass speziell die Gürtelverteilungen, die eine Eisscheide am markentesten kennzeichnen, in NEEM eine abgeschwächte Ausprägung aufweisen. Während der NorthGRIP Eiskern enge Gürtelverteilungen zeigt, sind die Gürtel im NEEM Kern breiter gestreut. Diese könnten bei 1400 m noch etwas enger ausgebildet sein. Die Proben aus dieser Tiefe wurden jedoch nicht im Zuge dieser Arbeit analysiert. Die schwächere Ausbildung der Gürtelverteilungen ist eventuell auf eine schwächere extensive Spannungs-konfiguration als bei NorthGRIP zurückzuführen. Im Gegenzug weist der Eiskern aber auch die Besonderheit eines offenbar weitaus dominanteren basalen Schereinflusses auf, welcher eventuell durch die abweichenden mechanischen Eigenschaften des glazialen Eises ab ca. 1400 m Tiefe und das fehlende Aufschmelzen an der Gletscherbasis verstärkt wird.

Zudem lässt sich auch erkennen, dass im tiefsten Abschnitt des Gletschers Unregelmäßigkeiten auftreten, die möglicherweise nicht nur auf Rekristallisationsprozesse, sondern auch auf eventuelle Verfaltungen des Eises zurückgeführt werden können. Ein deutlicher Hinweis darauf sind die sich abwechselnd wiederholenden Verteilungsmuster in dieser Tiefe, die einerseits als

breitere, elongierte *single maxima*, andererseits als *diamond patterns* ausgeprägt sind. Dieser Aspekt sollte, sofern er sich bestätigt, bei der Auswertung der paläoklimatologischen Ergebnisse berücksichtigt werden, da eine Faltung die stratigraphische und somit zeitliche Abfolge massiv stören würde.

Die Unterteilung des NEEM Eisbohrkernes in vier Abschnitte mit unterschiedlichen Spannungsregimes wird in Abb. 35 noch einmal mit exemplarischen Schmidt-Diagrammen verdeutlicht.

Die Variabilität der Messparameter in Sektionen gleicher Tiefenabschnitte zeigte, dass eine höher aufgelöste Analyse von C-Achsenverteilungen aussagekräftigere Ergebnisse liefert und die Streuungen bei der Interpretation und Auswertung der Daten mitberücksichtigt werden müssen. Die Darstellung der Streuung verdeutlicht, dass auch innerhalb eines Bags markante Unterschiede in den statistischen Parametern und somit in den Einregelungsmustern vorliegen können. Der Test der *running mean*-Methode zeigte außerdem, dass selbst innerhalb von einzelnen Sektionen Schwankungen im cm-Bereich auftreten können und dieses Verfahren durchaus lohnenswert ist, sofern man es automatisieren kann, um den damit verbundenen zeitlichen Aufwand einzuschränken.

Mit der erhöhten Auflösung könnte man zum Beispiel auch die in den tieferen Abschnitten auftretenden, horizontalen Bänder genauer betrachten, welche deutlich abweichende Orientierungen aufweisen.

Auch ließe sich sehen, ob die Variationen im untersten Abschnitt auf noch kleinräumigeren Skalen auftreten, oder ob es weitere sich wiederholende Muster gibt, die eine weitreichendere Interpretation hinsichtlich der Faltung ermöglichen würden.

Abschließend lässt sich sagen, dass auch bei der in dieser Arbeit gewählten Auflösung deutliche Aussagen über die Spannungskonfigurationen im Eisschild am NEEM Camp getroffen werden können, die auch eine weitergehende Interpretation zulassen und so zum einen mehr Aufschluss über die Fließmechanismen des Eises liefern können, zum anderen Informationen über die Anisotropie und Strukturen preisgeben, welche bei der weiteren Untersuchung des Eiskerns berücksichtigt werden können.

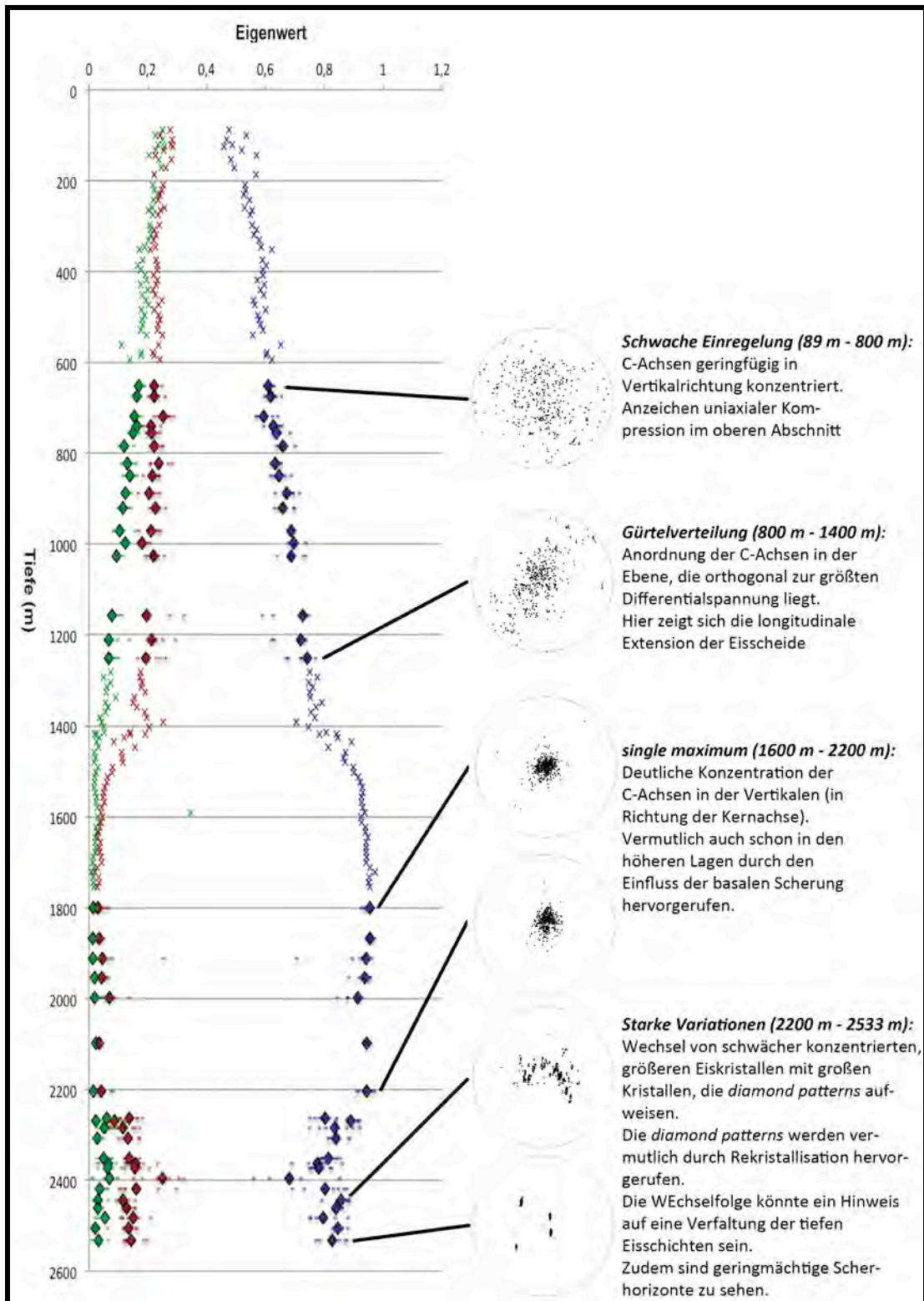


Abb. 35: NEEM Tiefenprofil mit Eigenwerten; gegliedert in vier Abschnitte mit unterschiedlichen Spannungsregimes

8. Literatur- und Abbildungsnachweise

Literaturnachweise:

ALLEY, R.B., 1988. Fabrics in Polar Ice Sheets: Development and Prediction. *Science*, Vol. 240, No. 4851. pp. 493-495.

AZUMA, N. & **HIGASHI**, A., 1984. Mechanical properties of Dye 3 Greenland deep ice cores. *Annals of Glaciology*, Vol. 5, pp. 1-8.

AZUMA, N., 1994. A flow law for anisotropic ice and its application to ice sheets. *Earth and Planetary Science Letters*, 128, pp. 601-614.

AZUMA, N. et al., 2000. Crystallographic analysis of the Dome Fuji ice core. *Physics of Ice Core Records*. Hokkaido University Press, Sapporo. pp.45-61.

BERNAL, J.D. & **FOWLER**, R.H., 1933. A theory of water and ionic solution, with particular reference to hydrogen and hydroxyl ions. *Journal of chemical physics*, Vol.1, Issue 8. pp. 515-548.

BERNOLA, J.M. et al., 1987. Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO₂. *Nature*, 329. pp. 408-414.

DURAND, G., et al., 2009. Evolution of the Texture along the EPICA Dome C Ice Core. *Low Temperature Science*, Vol. 68, Supplement Issue, *Physics of Ice Core Records II*. pp. 91-105.

DUVAL, P. & **LORIUS**, C., 1980. Crystal size and climatic record down to the last ice age from Antarctic ice. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 48, Issue 1. pp. 59-64.

HAMANN, I., WEIKUSAT, C., AZUMA, N. & KIPFSTUHL, S., 2007. Evolution of ice crystal microstructure during creep experiments. *Journal of Glaciology*, Vol. 53, No. 182. pp. 479-489.

HOBBS, P.V., 1974. *Ice Physics*. Clarendon Press, Oxford.

HOLLIN, J.T. & CAMERON, R.L., 1961. I.G.Y. Glaciological work at Wilkes station, Antarctica. *Journal of Glaciology*, No. 29. pp. 833-844.

HOOKE, R. LeB., MELLOR, M. et al., 1980. Mechanical properties of polycrystalline ice: An assessment of current knowledge and priorities for research. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 3, Issue 4. pp. 263-275.

JACKA, T.H. & MACCAGNAN, M., 1983. Ice crystallographic and strain rate changes with strain in compression and extension. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 8, Issue 3. pp. 269-286.

PATERSON, W.S.B., 1994. *The Physics of Glaciers*. Butterworth-Heinemann, Burlington. pp. 81-89.

PETERNELL, M. et al., 2010. Evaluating quartz crystallographic preferred orientations and the role of deformation partitioning using EBSD and fabric analyser techniques. *Journal of Structural Geology*, Vol. 32, Issue 6. pp. 803-817.

PETERNELL, M., RUSSEL-HEAD, D.S. & WILSON, C.J.L., 2010. A technique for recording polycrystalline structure and orientation during in situ deformation of rock analogues using an automated fabric analyser. *Journal of Microscopy*, no. doi: 10.1111/j.1365-2818.2010.03456.x

PETRENKO, V.F. & WHITWORTH, R.W., 1999. *Physics of Ice*. Oxford University Press, Oxford. pp. 15-21.

SCHULSON, E.M. & DUVAL, P., 2009. Creep and Fracture of Ice. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 5-14, pp. 78-80.

SUZUKI, S., 1970. Grain Coarsening of Microcrystals of Ice. Low Temperature Science, Ser. A 28. pp. 47-61.

SVENSSON, A. et al., 2009. Texture of the Upper 1000m in the GRIP and NorthGRIP Ice Cores. Low Temperature Science, Vol. 68, Supplement Issue, Physics of Ice Core Records II. pp. 107-113.

THORSTEINSSON, T., 1996. Textures and fabrics of the GRIP ice core, in relation to climate history and ice deformation. Berichte zur Polarforschung, 146 p., Dissertation Universität Bremen, 1996.

WALLBRECHER, E., 1978. Ein Cluster-Verfahren zur richtungsstatistischen Analyse tektonischer Daten. Geologische Rundschau, Vol. 67, No. 3. pp. 840-857.

WALLBRECHER, E., 1986. Tektonische und gefügeanalytische Arbeitsweisen. Thieme, Stuttgart. pp. 154-171.

WANG, Y. et al., 2002. A vertical girdle fabric in the NorthGRIP deep ice core, North Greenland. Annals of Glaciology, Vol. 35, No. 1. pp. 515-520.

WOODCOCK, N.H., 1977. Specification of fabric shapes using an eigenvalue method. Geological Society of America Bulletin, Vol. 88, No. 9. pp. 1231-1236.

Internetquellen:

www.neem.nbi.ku.dk/about_neem , Stand: 21.02.2011

www.russelheadinstruments.com/brochure.html , Stand: 25.02.2011

www.gfy.ku.dk/~www-glac/ngrip/index_eng.htm , Stand: 15.03.2011

Abbildungsnachweise:

Abb. 1: www.neem.nbi.ku.dk/about_neem , Stand: 21.02.2011

Abb. 2: **PETRENKO**, V.F. & **WHITWORTH**, R.W., 1999. Physics of Ice. Oxford University Press, Oxford. p. 16.

Abb. 3: **PETRENKO**, V.F. & **WHITWORTH**, R.W., 1999. Physics of Ice. Oxford University Press, Oxford. p. 21.

Abb. 4: **THORSTEINSSON**, T., 1996. Textures and fabrics of the GRIP ice core, in relation to climate history and ice deformation. Berichte zur Polarforschung, 146 p., Dissertation Universität Bremen, 1996. p. 27.

Abb. 5: **SCHULSON**, E.M. & **DUVAL**, P., 2009. Creep and Fracture of Ice. Cambridge University Press, Cambridge. p. 13.

Abb. 6: **SCHULSON**, E.M. & **DUVAL**, P., 2009. Creep and Fracture of Ice. Cambridge University Press, Cambridge. p. 80.

Abb. 7 & Abb. 8: **PATERSON**, W.S.B., 1994. The Physics of Glaciers. Butterworth-Heinemann, Burlington. p. 82.

Abb. 9: **HOOKE**, R. LeB., **MELLOR**, M. et al., 1980. Mechanical properties of polycrystalline ice: An assessment of current knowledge and priorities for research. Cold Regions Science and Technology, Vol. 3, Issue 4. p. 4.

Abb. 10: www.academic.ru/pictures/dewiki/73/Indexellipsoid.png , Stand: 29.03.2011

Abb. 11: **DURAND**, G., et al., 2009. Evolution of the Texture along the EPICA Dome C Ice Core. Low Temperature Science, Vol. 68, Supplement Issue, Physics of Ice Core Records II. p. 92.

Abb. 12: **PATERSON**, W.S.B., 1994. The Physics of Glaciers. Butterworth-Heinemann, Burlington. p. 198.

Abb. 13: geändert nach: **WALLBRECHER**, E., 1986. Tektonische und gefügeanalytische Arbeitsweisen. Thieme, Stuttgart. p. 163.

Abb. 31: **SUZUKI**, S., 1970. Grain Coarsening of Microcrystals of Ice. Low Temperature Science, Ser. A 28. p. 4.

Abb. 33 & Abb. 34: **WANG**, Y. et al., 2002. A vertical girdle fabric in the NorthGRIP deep ice core, North Greenland. Annals of Glaciology, Vol. 35, No. 1. p. 4.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Jakub Surma (geboren am 09.12.1987 in Lüdenscheid), dass ich die vorliegende Bachelorarbeit nach bestem Wissen und Gewissen selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen, als die im Literaturverzeichnis angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Diese Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

(Ort, Datum)

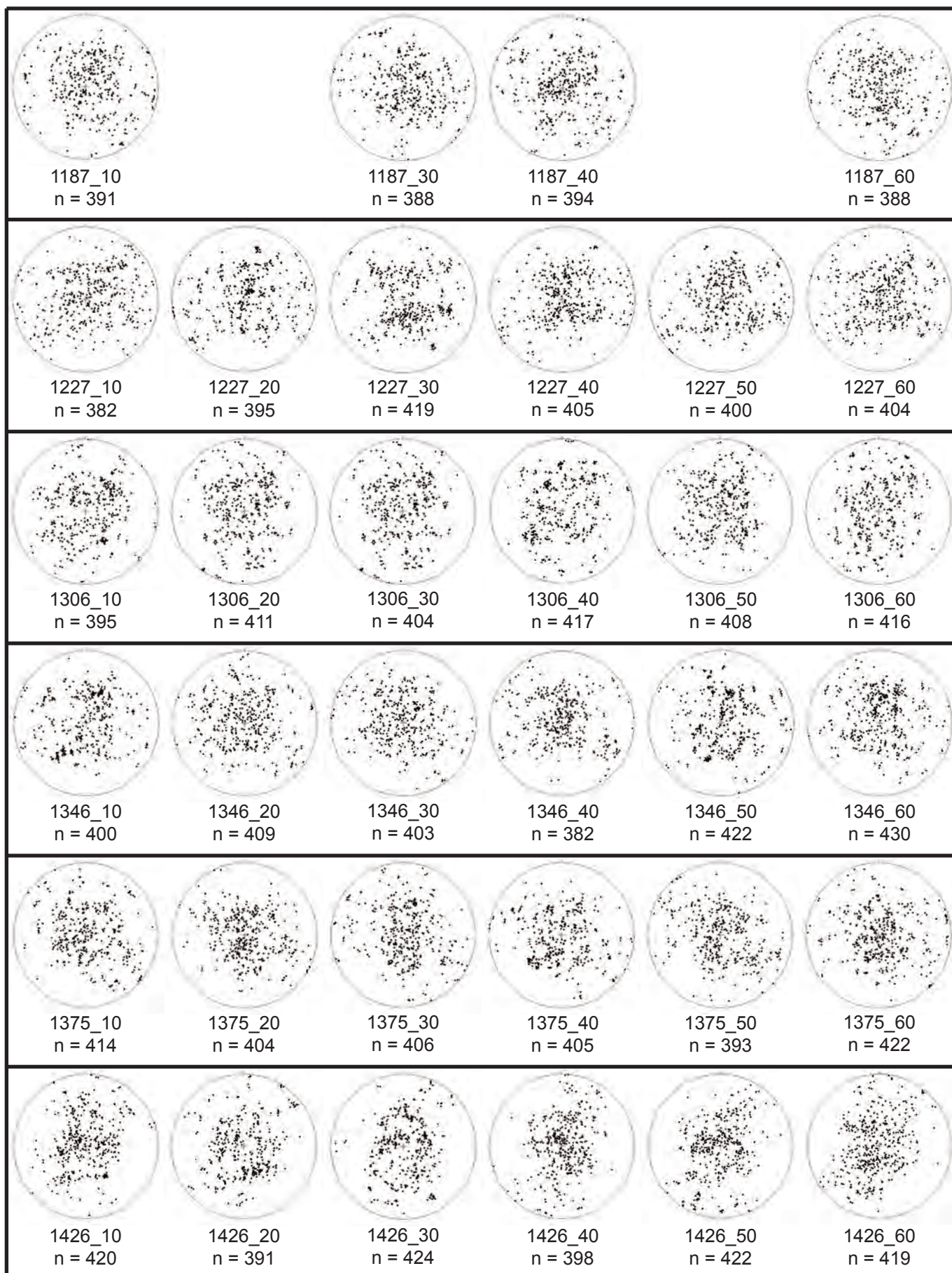
(Unterschrift)

9. Anhang

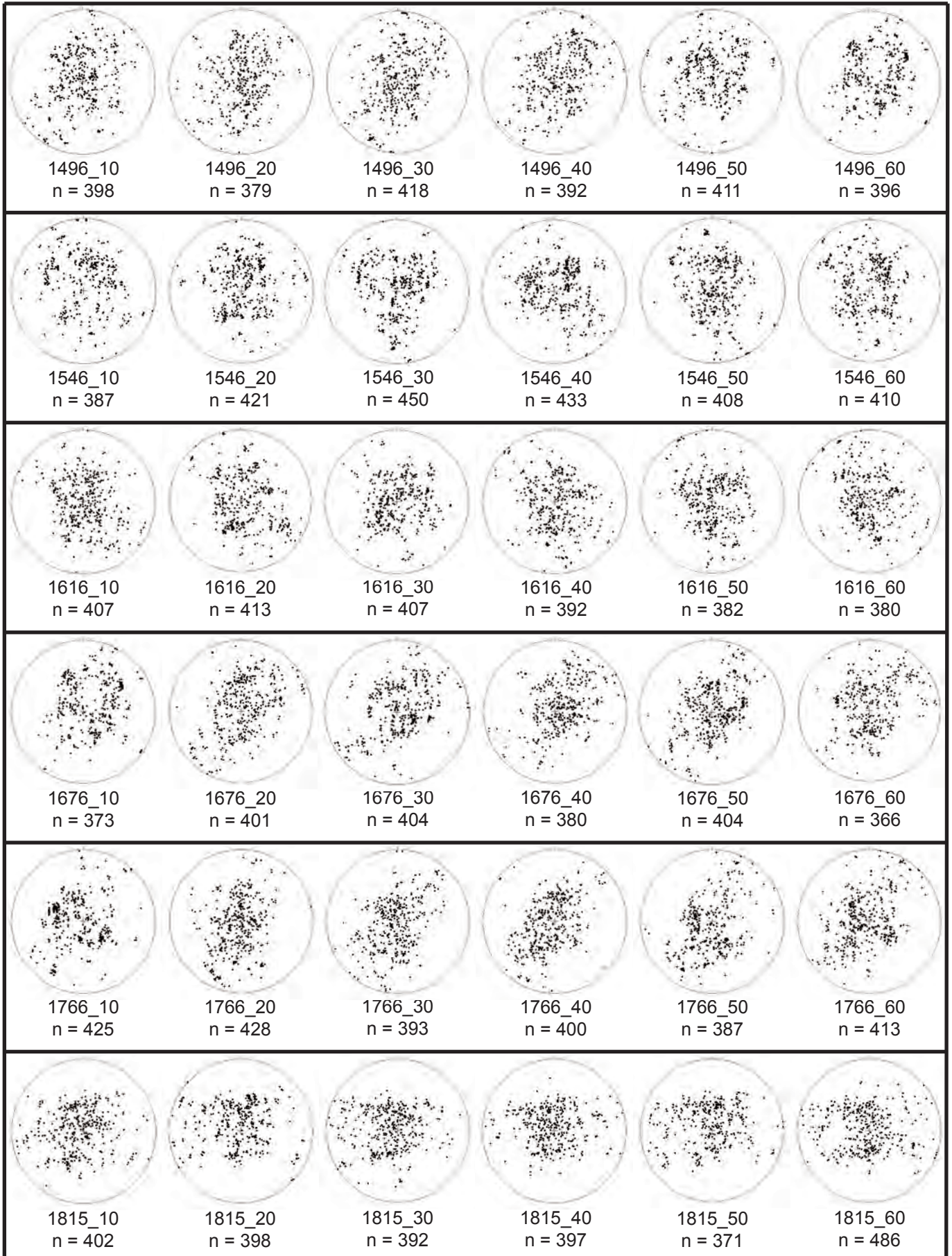
9.1 Schmidt-Diagramme der NEEM C-Achsenverteilungen

Gezeigt werden die erstellten Schmidt-Diagramme im Tiefenverlauf. Je Zeile sind jeweils die Diagramme eines Tiefenabschnittes zu sehen.

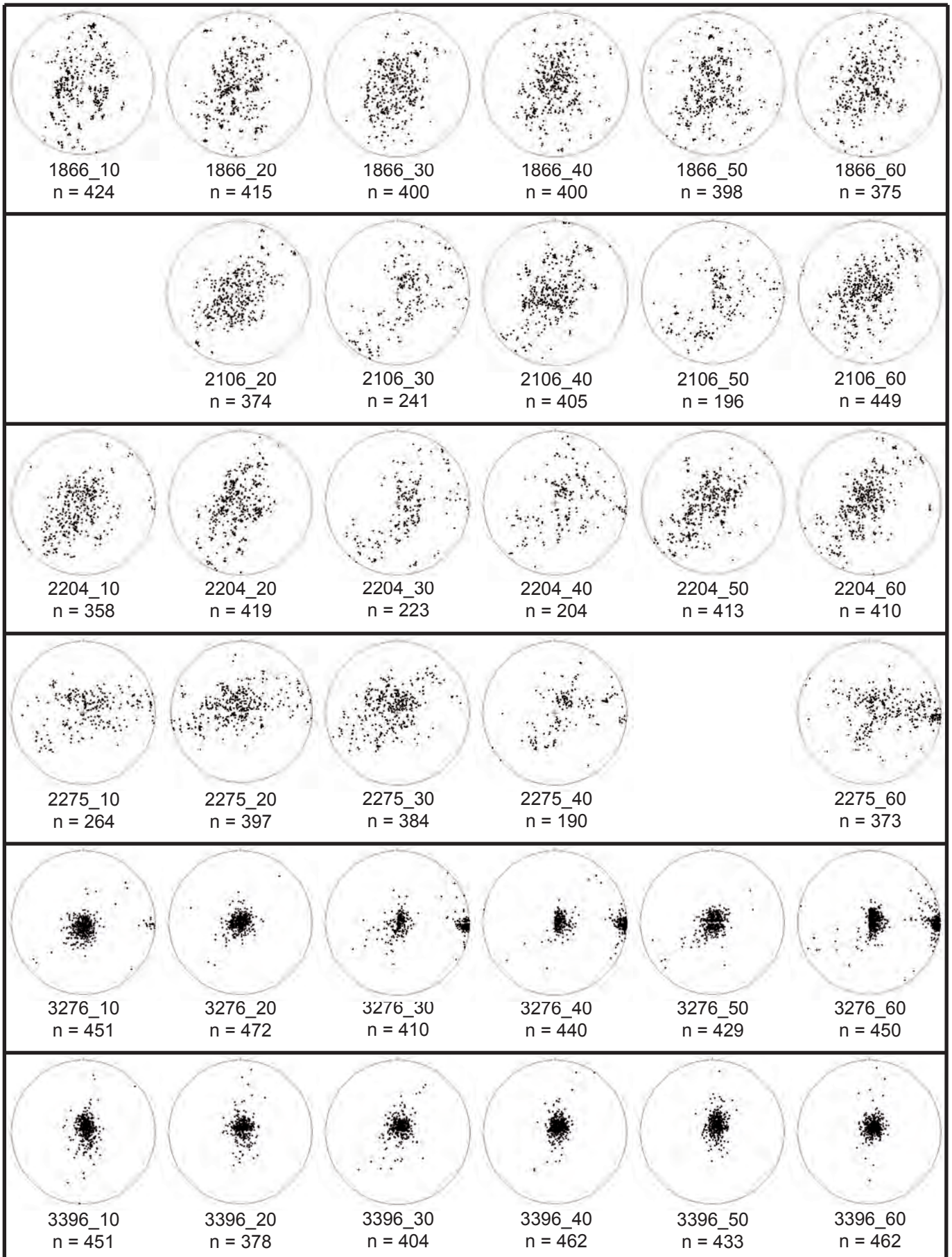
Schmidt-Diagramme: NEEM Bag 1187 - 1426



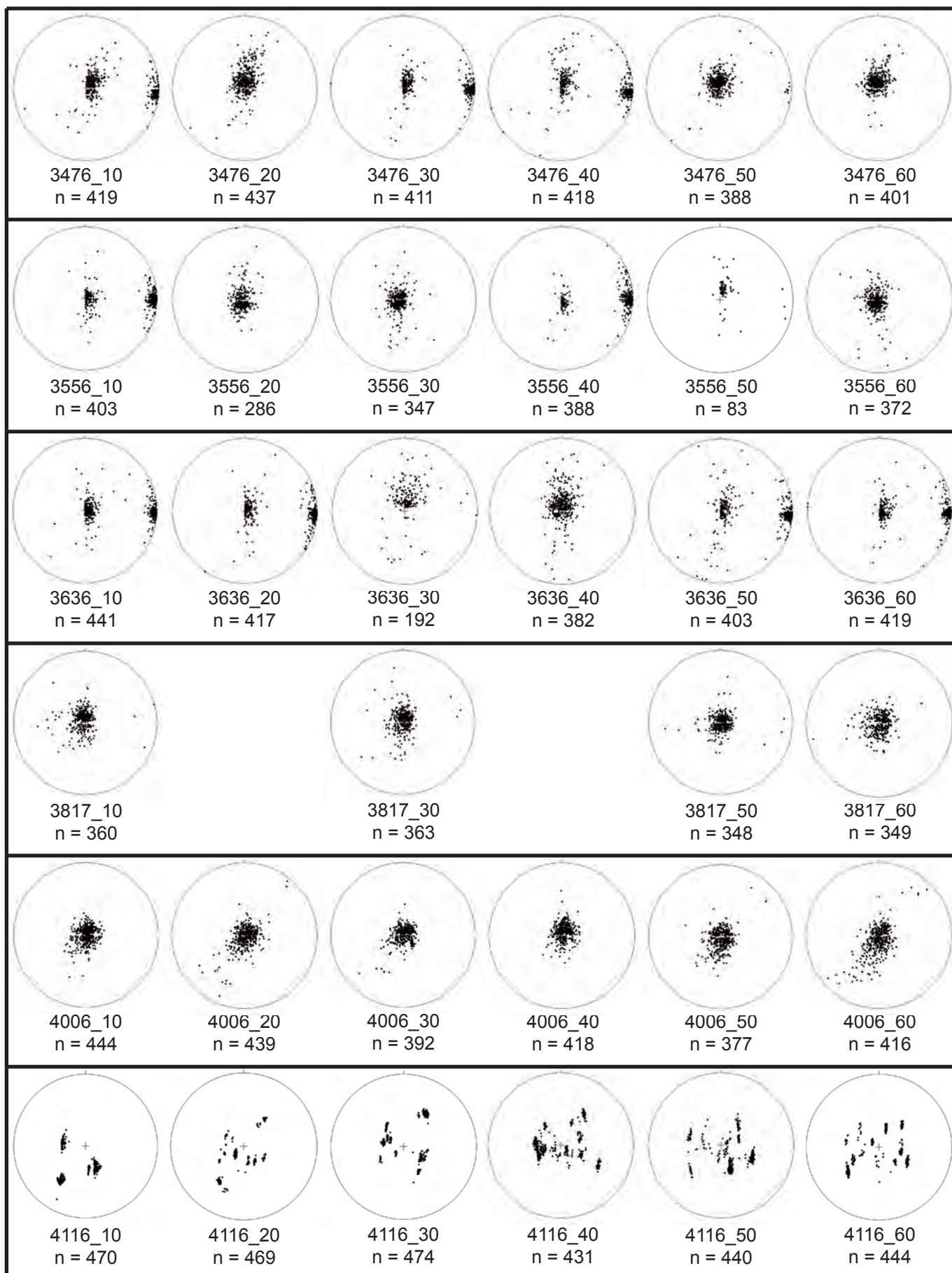
Schmidt-Diagramme: NEEM Bag 1496 - 1815



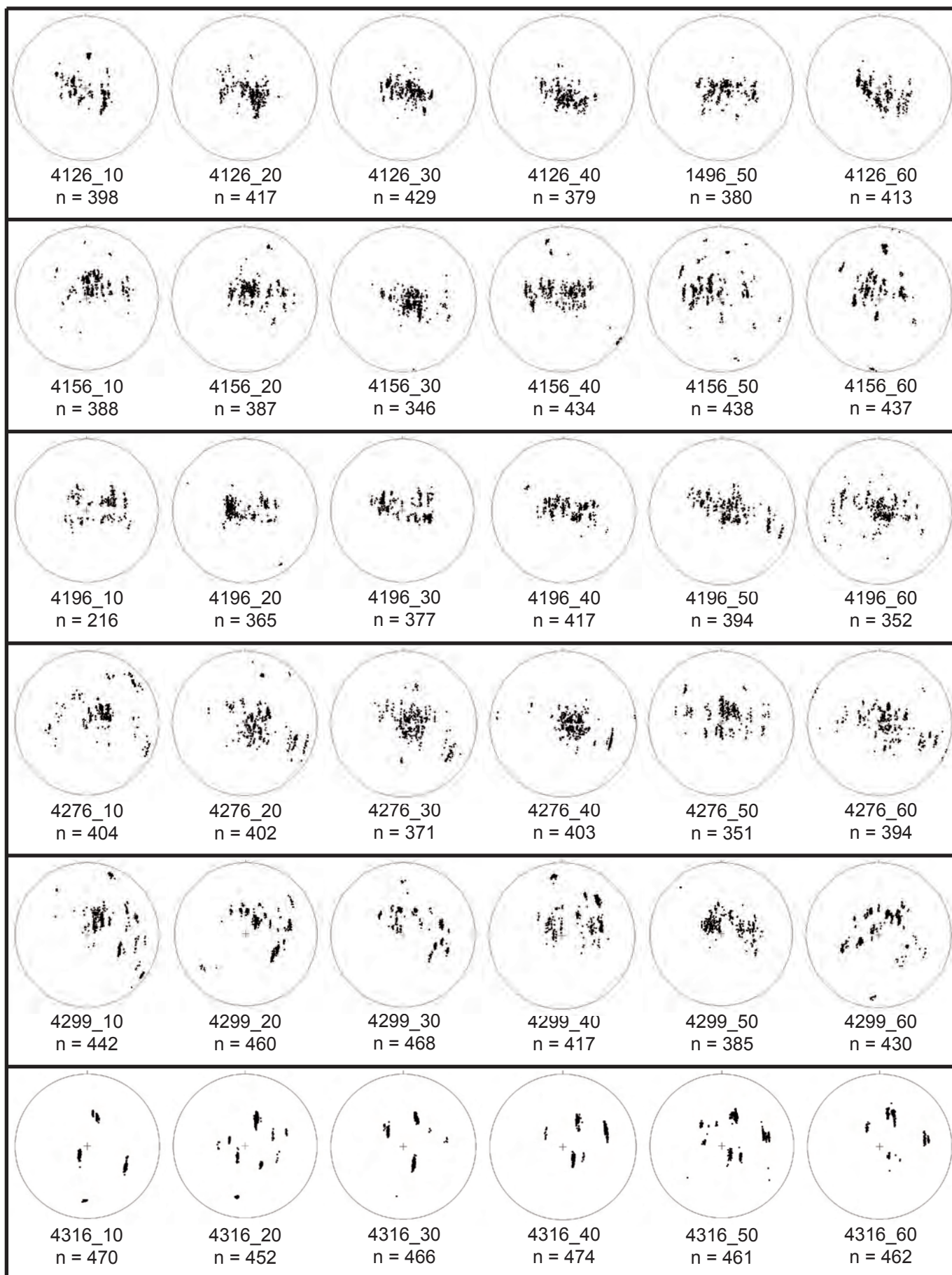
Schmidt-Diagramme: NEEM Bag 1866 - 3396



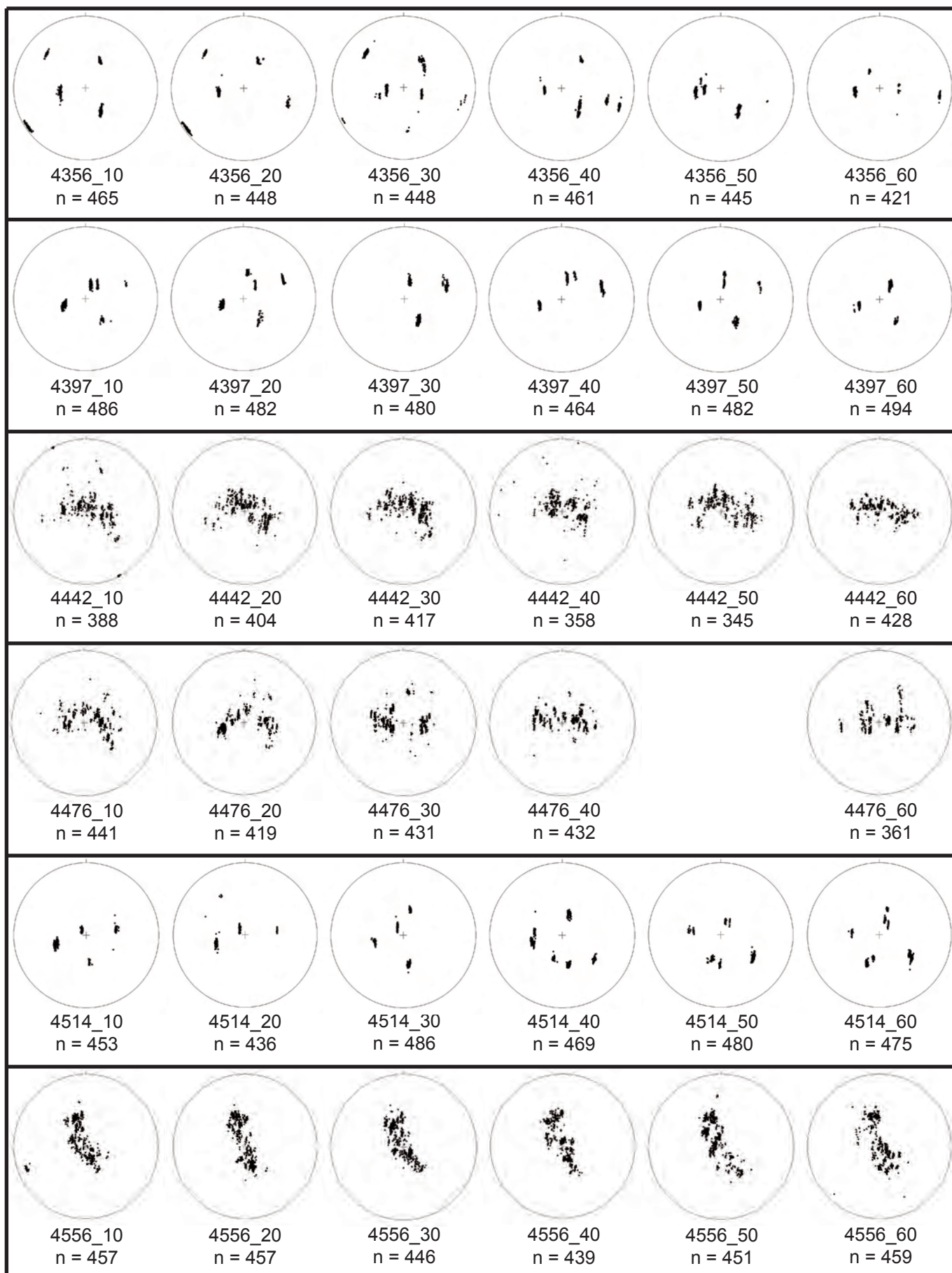
Schmidt-Diagramme: NEEM Bag 3476 - 4116



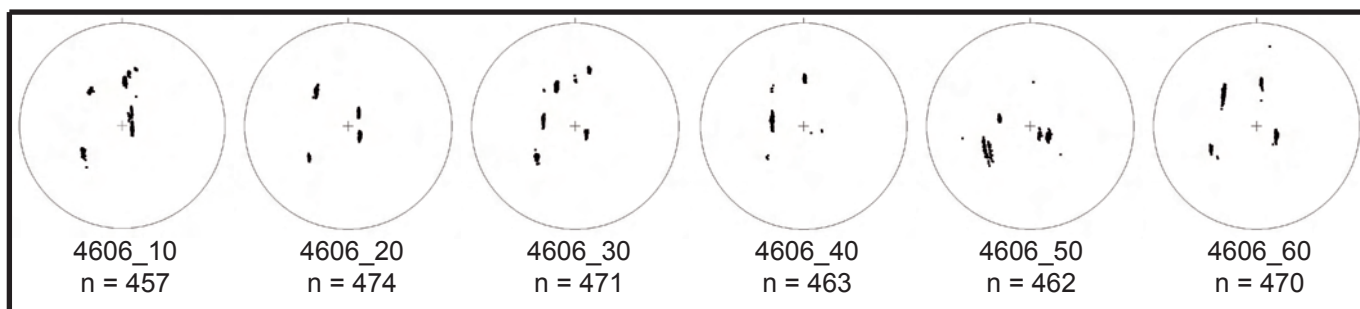
Schmidt-Diagramme: NEEM Bag 4126 - 4316



Schmidt-Diagramme: NEEM Bag 4356 - 4556



Schmidt-Diagramme: NEEM Bag 4606



9.2 Datentabelle

In diesem Teil ist die Datentabelle enthalten. Enthalten sind die im Zuge dieser Arbeit ermittelten statistischen Parameter, sowie - speziell hervorgehoben - fehlende Datensätze und Proben, welche mit einem verringerten Qualitätsfilter untersucht wurden.

Tiefe (m)	Probe	s ₁	s ₂	s ₃	S _{1, mittel}	S _{2, mittel}	S _{3, mittel}	R _%	R _{%, mittel}	α _s	α _{s, mittel}	k	k _{mittel}
652	1187_10	0,176598	0,221453	0,601949	0,169429	0,2220665	0,6085045	45,8059	47,72215	47,4059	46,306275	4,418074688	4,993290679
	1187_20												
	1187_30	0,15791	0,218388	0,623702				50,3631		44,792		3,236409296	
	1187_40	0,184494	0,205273	0,610233				48,1371		46,0676		10,20858946	
	1187_50												
	1187_60	0,158714	0,243152	0,598134				46,5825		46,9596		2,110089272	
674	1227_10	0,154368	0,25452	0,591112	0,161821167	0,221926333	0,6162525	45,4755	49,64015	47,5959	45,20665	1,685117182	3,862138851
	1227_20	0,169077	0,2318	0,599124				45,7985		47,4101		3,009608124	
	1227_30	0,171217	0,197819	0,630963				53,06		43,2456		8,031360084	
	1227_40	0,144181	0,205332	0,650487				54,0503		42,6768		3,261390669	
	1227_50	0,167836	0,227336	0,604828				48,3165		45,9648		3,224720728	
	1227_60	0,164248	0,214751	0,621001				51,1401		44,3467		3,960636316	
718	1306_10	0,17417	0,230001	0,595829	0,153903333	0,251935667	0,594160667	48,2361	47,82961667	46,0109	46,24633333	3,423354849	1,950654006
	1306_20	0,15137	0,266088	0,582542				45,068		47,8304		1,389069898	
	1306_30	0,139627	0,241706	0,618667				50,769		44,5594		1,712709398	
	1306_40	0,1636	0,2712	0,565199				44,3593		48,2388		1,452858414	
	1306_50	0,145338	0,217471	0,63719				54,7485		42,2752		2,667476896	
	1306_60	0,149315	0,285148	0,565537				43,7968		48,5633		1,058454584	
740	1346_10	0,170702	0,239179	0,590119	0,1620655	0,211453833	0,626480667	47,6819	51,60105	46,3286	44,08146667	2,677530541	5,471707919
	1346_20	0,17579	0,205668	0,618542				50,5132		44,7059		7,014588841	
	1346_30	0,151145	0,208473	0,640382				53,2772		43,121		3,489926615	
	1346_40	0,142293	0,21439	0,643317				52,063		43,8176		2,680697978	
	1346_50	0,167251	0,218942	0,613807				50,7226		44,586		3,827816229	
	1346_60	0,165212	0,182071	0,652717				55,3484		41,9297		13,13968731	
756	1375_10	0,153755	0,226694	0,619552	0,1490425	0,213131667	0,637826167	50,5951	52,4295	44,659	43,60326667	2,589619375	3,466826512
	1375_20	0,130364	0,192069	0,677568				59,5725		39,4813		3,253101133	
	1375_30	0,153309	0,218757	0,627934				50,1354		44,9224		2,966119968	
	1375_40	0,160039	0,209936	0,630025				50,8094		44,5362		4,049435386	
	1375_50	0,136732	0,236937	0,626331				51,0972		44,3713		1,768161395	
	1375_60	0,160056	0,194397	0,645547				52,3674		43,6494		6,174521816	
784	1426_10	0,125993	0,2057	0,668307	0,119650967	0,222246667	0,658102333	58,4116	56,01361667	40,1575	41,43331667	2,403808667	1,945857883
	1426_20	0,147272	0,203847	0,648881				55,007		42,1264		3,561736712	
	1426_30	0,120994	0,245787	0,633219				53,2651		43,1279		1,335287869	
	1426_40	0,0968068	0,208343	0,69485				60,5533		38,9076		1,571506465	
	1426_50	0,111546	0,231697	0,656757				55,5801		41,7962		1,425298194	
	1426_60	0,115294	0,238106	0,6466				53,2646		42,4843		1,377509389	

Tiefe (m)	Probe	s ₁	s ₂	s ₃	S _{1_mittel}	S _{2_mittel}	S _{3_mittel}	R _%	R _{%_mittel}	α _s	α _{s_mittel}	k	k_mittel
823	1496_10												
	1496_20	0,125784	0,237406	0,63681	0,129177333	0,237487167	0,633333333	52,3912	52,94395	43,6294	43,30935	1,553354652	2,161534732
	1496_30	0,117025	0,235635	0,64734				55,5005		41,842			
	1496_40	0,107226	0,278882	0,613892				48,1783		46,044			
	1496_50	0,117808	0,264416	0,617775				50,9834		44,4365			
	1496_60	0,157226	0,203586	0,639188				53,2654		43,1278			
850	1496_10	0,149995	0,204998	0,645007				57,3449		40,7764			
	1546_10	0,158504	0,229346	0,61215	0,137945833	0,215882167	0,646172	49,8246	55,46238333	45,1005	41,71453333	2,65730244	2,694595
	1546_20	0,134293	0,202281	0,663426				59,0968		39,7587			
	1546_30	0,143963	0,228905	0,627132				52,3693		43,2744			
	1546_40	0,132876	0,17877	0,688354				61,0225		38,1599			
	1546_50	0,111384	0,233463	0,655153				56,3462		41,354			
888	1546_60	0,146655	0,222528	0,650817				54,1149		42,6397			
	1616_10	0,112816	0,197222	0,689962	0,123843167	0,2034235	0,672733333	61,8853	59,21778333	38,1244	39,66718333	2,241979402	2,746391918
	1616_20	0,138773	0,233772	0,627455				52,7198		43,4409			
	1616_30	0,126288	0,162971	0,710741				65,8381		35,7664			
	1616_40	0,129046	0,210031	0,660923				57,545		40,6605			
	1616_50	0,115956	0,194613	0,689431				61,4364		38,3889			
921	1616_60	0,12018	0,221932	0,657888				55,8821		41,622			
	1676_10	0,138036	0,235388	0,626576	0,114000467	0,226701167	0,659298667	52,7556	56,68783333	43,4203	41,14565	1,834358059	1,59141546
	1676_20	0,104477	0,255343	0,64018				53,254		43,1343			
	1676_30	0,115318	0,221466	0,663216				56,4198		41,3116			
	1676_40	0,102844	0,202851	0,694306				62,0045		38,0541			
	1676_50	0,0934908	0,215466	0,691043				60,909		38,6989			
971	1676_60	0,129837	0,229693	0,640471				54,7841		42,2547			
	1766_10	0,150962	0,165633	0,683405	0,103198283	0,210906667	0,685895333	60,5959	60,2134	38,8826	39,0301	15,28160612	3,705725043
	1766_20	0,0826149	0,227591	0,689795				60,9561		38,2256			
	1766_30	0,0911105	0,215929	0,692961				61,3376		38,447			
	1766_40	0,0801603	0,22924	0,6906				61,4473		38,3825			
	1766_50	0,102169	0,224489	0,673342				57,4382		40,7224			
998	1766_60	0,112173	0,202558	0,685269				59,5053		39,5205			
	1815_10	0,128208	0,171555	0,700236	0,1239565	0,180172167	0,695871333	63,9995	61,84316667	36,8702	38,13061667	4,829231422	3,790345556
	1815_20	0,129453	0,182064	0,688483				60,3351		39,0354			
	1815_30	0,130026	0,171613	0,698931				62,6887		37,6489			
	1815_40	0,104271	0,163156	0,732573				67,4561		34,7832			
	1815_50	0,124746	0,19081	0,684444				60,6574		38,8466			
1815_60	0,127035	0,201835	0,671131				55,9212		41,5994				

Tiefe (m)	Probe	s ₁	s ₂	s ₃	s _{1, mittel}	s _{2, mittel}	s _{3, mittel}	R _%	R _{%, mittel}	α _s	α _{s, mittel}	k	k _{mittel}
1026	1866_10												
	1866_20	0,112408	0,25244	0,635152	0,093496167	0,219690667	0,686813	52,2215	60,6546	43,7268	38,81143333	1,140478182	1,343203606
	1866_30	0,0916553	0,230282	0,678063				59,2728		39,6561		1,172225018	
	1866_40	0,0806836	0,18773	0,731386				68,5156		34,1326		1,61072737	
	1866_50	0,0846209	0,19287	0,722509				65,6955		35,8525		1,603128442	
	1866_60	0,102515	0,226792	0,670692				58,7368		39,9684		1,365546239	
1157	2106_10	0,0890942	0,22803	0,682876				59,4854		39,5322		1,167116383	
	2106_20				0,07806065	0,1960405	0,7258985	67,9709	64,9363	34,4678	35,9625		1,421401056
	2106_30	0,0702366	0,187032	0,742732				40,8978		50,2444		1,408046985	
	2106_40	0,087284	0,318202	0,584514				64,1331		36,7904		0,513137314	
	2106_50	0,0807496	0,201416	0,717834				51,32		44,2436		1,390414587	
	2106_60	0,109025	0,270251	0,620724				65,7395		35,1346		0,916015918	
1211	2204_10	0,0786885	0,193755	0,727556	0,0669633	0,213858667	0,719178333	66,3476	64,7207	35,458	36,43103333	1,468316764	1,063156512
	2204_20	0,0708257	0,19748	0,731695				67,0014		35,0607		1,277264285	
	2204_30	0,0941579	0,288438	0,617404				47,2647		46,568		0,679802301	
	2204_40	0,131594	0,244915	0,623491				50,7154		44,5901		1,504247396	
	2204_50	0,0718489	0,218396	0,709755				65,063		36,2333		1,060144465	
	2204_60	0,0582153	0,2257	0,716085				62,0977		37,9991		0,852060786	
1251	2275_10	0,0778021	0,256219	0,665979	0,0671133	0,1924135	0,7404725	55,901	67,2675	41,6111	34,84825	0,801455108	1,462326921
	2275_20	0,0593863	0,22458	0,716033				62,7103		37,6368		0,871689808	
	2275_30	0,0748403	0,160247	0,764912				71,8248		32,0597		2,052964034	
	2275_40	0,0878182	0,239763	0,672418				59,1974		39,7001		1,026729933	
	2275_50												
	2275_60	0,0687747	0,289529	0,641696				63,9499		41,8423		0,553672185	
1801	3276_10	0,027368	0,0583048	0,914327	0,0147217	0,0311404	0,9541375	93,2813	93,083	19,9918	12,7354	3,639385891	5,021709024
	3276_20	0,0137384	0,0244222	0,961839				95,1397		11,2577		6,385136557	
	3276_30	0,0250685	0,407806	0,567126				61,6132		45,9658		0,118239049	
	3276_40	0,0192492	0,3786	0,602151				61,0389		42,6618		0,155765805	
	3276_50	0,015705	0,0378586	0,946436				91,0263		14,2131		3,658281492	
	3276_60	0,0210258	0,378754	0,60022				62,6503		43,4546		0,159248555	
1867	3396_10	0,012503	0,0456502	0,941847	0,01192082	0,03353115	0,954548	93,8829	95,42683333	14,5198	12,35076667	2,33725315	3,390904116
	3396_20	0,0135158	0,03646	0,950024				95,0528		12,8514		3,285383644	
	3396_30	0,0150791	0,0346312	0,95029				94,7735		13,2155		3,983439523	
	3396_40	0,0107161	0,029669	0,959615				96,1059		11,714		3,413768194	
	3396_50	0,0097288	0,0315988	0,958672				95,9988		11,3866		2,896729237	
	3396_60	0,00998212	0,0231777	0,96684				96,7471		10,4173		4,428850948	

Tiefe (m)	Probe	s ₁	s ₂	s ₃	s _{1, mittel}	s _{2, mittel}	s _{3, mittel}	R _s	R _{s, mittel}	α _s	α _{s, mittel}	k	k _{mittel}
1911	3476_10	0,0347404	0,324449	0,640811	0,013337	0,04612335	0,94054	58,9624	93,77315	41,9749	14,262	0,304627411	2,866929402
	3476_20	0,0136393	0,0610409	0,92532				91,7515		16,6906		1,814103704	
	3476_30	0,0240717	0,374831	0,601097				59,546		43,7283		0,172023916	
	3476_40	0,042367	0,383612	0,574021				51,4357		45,4806		0,182926216	
	3476_50	0,026292	0,0437809	0,929927				90,1055		18,3339		5,992765336	
	3476_60	0,0130347	0,0312058	0,95576				95,7948		11,8334		3,9197551	
1955	3556_10	0,0199126	0,306561	0,673526	0,020199633	0,0425961	0,937204333	85,6902	94,607	41,0952	13,4239	0,287890051	2,928981406
	3556_20	0,0114253	0,0397762	0,948798				94,205		13,9295		2,54275225	
	3556_30	0,0129853	0,0370368	0,949978				94,8087		13,1702		3,095644679	
	3556_40	0,0222008	0,236943	0,740856				94,2734		37,5128		0,48147606	
	3556_50	0,0362326	0,0515559	0,912212				90,5083		17,9439		8,146145633	
	3556_60	0,012941	0,0364562	0,950603				94,8073		13,172		3,148547289	
Tiefe (m)	Probe	s ₁	s ₂	s ₃	s _{1, mittel}	s _{2, mittel}	s _{3, mittel}	R _s	R _{s, mittel}	α _s	α _{s, mittel}	k	k _{mittel}
1999	3636_10	0,0242359	0,406755	0,56901	0,0185943	0,0688272	0,912578	51,2573	89,7702	57,1873	18,6533	0,119022062	1,974927623
	3636_20	0,0312358	0,377921	0,590843				48,4446		44,719		0,179239305	
	3636_30	0,041714	0,0847871	0,873499				84,5987		23,1067		3,28823045	
	3636_40	0,0185943	0,0688272	0,912578				89,7702		18,6533		1,974927623	
	3636_50	0,0543706	0,36254	0,583089				81,2383		46,1468		0,250462343	
	3636_60	0,0256815	0,379251	0,595067				88,72		44,1604		0,167312127	
2099	3817_10	0,0271907	0,0336778	0,939132	0,0233047	0,033896475	0,94279875	93,5282	94,0909	14,7378	14,04515	15,55457601	10,96884593
	3817_20												
	3817_30	0,0220114	0,0410695	0,936919				93,3698		14,9213		5,01411695	
	3817_40												
	3817_50	0,0209576	0,0266491	0,952393				95,0846		12,8093		14,88517128	
	3817_60	0,0230591	0,0341895	0,942751				94,381		13,7122		8,421519498	
2203	4006_10	0,0136233	0,0269022	0,959474	0,015275233	0,0407977	0,943927	94,8893	93,43508333	11,4415	13,80645	5,252848208	4,019723449
	4006_20	0,0157395	0,0495076	0,934753				90,2129		15,6414		2,563941851	
	4006_30	0,0136208	0,0279204	0,958459				93,9946		11,5449		4,926397833	
	4006_40	0,0116095	0,0233261	0,965064				96,8353		10,2472		5,335185821	
	4006_50	0,0198596	0,0406558	0,939485				93,5528		14,7092		4,382961628	
	4006_60	0,0171987	0,0764741	0,906327				89,1256		19,2545		1,657005353	

Tiefe (m)	Probe	s ₁	s ₂	s ₃	S _{1_mittel}	S _{2_mittel}	S _{3_mittel}	R _%	R _{%_mittel}	α _s	α _{s_mittel}	k	k_mittel
2263	4116_10												
	4116_20	0,0625352	0,101425	0,83604	0,06121535	0,13654425	0,8022405	82,9942	78,40983333	24,3545	27,5329	4,361870184	2,380512215
	4116_30	0,0245553	0,0993495	0,876095				86,235		21,778		1,557419572	
	4116_40	0,0742576	0,161653	0,76409				74,6241		30,2481		1,99667013	
	4116_50	0,0663671	0,156317	0,777316				75,5832		29,6126		1,872288899	
	4116_60	0,0623934	0,123491	0,814116				79,0632		27,2302		2,762429081	
2269	4126_10												
	4126_20	0,0442147	0,120286	0,835499	0,023971317	0,087517117	0,8885115	82,6249	88,56966667	24,6349	19,61273333	1,936578739	1,87842566
	4126_30	0,0275165	0,0654334	0,90705				90,5123		17,94		3,035121303	
	4126_40	0,0168609	0,0719895	0,91115				91,1122		17,345		1,748637371	
	4126_50	0,0175024	0,0682535	0,914244				91,4309		17,0215		1,906742973	
	4126_60	0,0191847	0,108505	0,87231				86,8653		21,2488		1,202960038	
2285	4156_10												
	4156_20	0,0349941	0,0730019	0,892004	0,051717133	0,11433135	0,8339515	88,4806	81,06175	19,8404	25,30616667	3,404004829	2,518458459
	4156_30	0,0395519	0,0884356	0,872013				86,1534		21,8458		2,844092231	
	4156_40	0,0225031	0,0626656	0,914831				91,0756		17,3817		2,617684549	
	4156_50	0,0567171	0,142585	0,800698				76,3991		29,0654		1,871803464	
	4156_60	0,0697418	0,151757	0,778501				74,0243		30,6414		2,103061472	
2307	4196_10												
	4196_20	0,0454205	0,119712	0,834867	0,02820565	0,132079233	0,839715167	83,029	82,5824	24,3279	24,54905	2,004058243	1,280045433
	4196_30	0,0245067	0,0946214	0,880872				87,2128		20,9524		1,651467439	
	4196_40	0,0253986	0,164647	0,809954				80,1668		26,4454		0,852370323	
	4196_50	0,0152532	0,107392	0,877355				87,2395		20,9295		1,076205313	
	4196_60	0,0236995	0,166721	0,80958				77,6943		28,183		0,809995343	
2351	4276_10												
	4276_20	0,0693567	0,144978	0,785665	0,05036985	0,135992333	0,813637667	73,2939	78,07613333	31,1165	27,83293333	2,292017303	1,928276213
	4276_30	0,0735922	0,140837	0,785571				74,6524		30,2295		2,648132153	
	4276_40	0,0437996	0,117021	0,839179				81,6084		25,3949		2,004694261	
	4276_50	0,0205642	0,129114	0,850321				82,8647		24,4531		1,026004578	
	4276_60	0,0524332	0,116245	0,831322				81,1932		25,7006		2,471007131	
2364	4299_10												
	4299_20	0,08602	0,228566	0,685414	0,0659768	0,157482667	0,776540167	60,0636	73,99048333	39,1943	30,44571667	1,12376919	6,647657165
	4299_30	0,062633	0,134756	0,802611				77,5018		28,3152		2,328982362	
	4299_40	0,0311522	0,179741	0,789106				76,5885		28,9374		0,844092591	
	4299_50	0,125439	0,132313	0,742247				71,3039		32,3906		32,32404351	
	4299_60	0,0235794	0,119499	0,856921				84,6086		23,0989		1,213873797	

Tiefe (m)	Probe	s ₁	s ₂	s ₃	S _{1, mittel}	S _{2, mittel}	S _{3, mittel}	R _%	R _{%, mittel}	α _s	α _{s, mittel}	k	k _{mittel}
2373	4316_10												
	4316_20	0,105747	0,148214	0,746039	0,062718433	0,157298833	0,7799825	70,9014	75,49098333	32,6449	29,57491667	4,786977829	2,227329928
	4316_30	0,0469215	0,200807	0,752271				69,1742		33,7252		0,90844021	
	4316_40	0,0578268	0,152308	0,789865				77,8718		28,0607		1,699574675	
	4316_50	0,0627292	0,116672	0,820599				81,0904		25,7759		3,143503174	
	4316_60	0,0762598	0,168335	0,755405				73,3444		31,0837		1,896032861	
2395	4316_10												
	4316_20	0,0268263	0,157457	0,815716				80,5637		26,1591		0,929450816	
	4316_30												
	4316_40	0,176907	0,268346	0,554747	0,070318167	0,249425167	0,680256667	42,5789	55,90828333	49,2678	41,26088333	1,743020987	0,834933486
	4316_50	0,0907794	0,300616	0,608605				39,7644		50,9063		0,589055433	
	4316_60	0,0932009	0,225091	0,681708				59,443		39,5569		1,256705339	
2418	4397_10												
	4397_20	0,0446036	0,229927	0,725469	0,036892717	0,160701667	0,8024055	69,4131	78,62865	21,4777	27,17096667	1,448767888	1,664077693
	4397_30	0,058239	0,116406	0,825355				81,7542		25,2869		2,82872457	
	4397_40	0,0187853	0,294065	0,68715				65,5311		35,9516		0,308555531	
	4397_50	0,0557025	0,100708	0,843589				82,7057		24,5737		3,589056755	
	4397_60	0,0197994	0,11848	0,861721				85,7735		22,1591		1,109046817	
2443	4442_10												
	4442_20	0,06059	0,152857	0,786553	0,03059845	0,11388985	0,855511667	70,6916	83,71493333	32,7771	23,52535	1,770267014	1,534059483
	4442_30	0,0264952	0,0968759	0,876629				87,1757		20,9842		1,698965545	
	4442_40	0,0241746	0,105091	0,870734				86,5887		21,4823		1,438907893	
	4442_50	0,0294469	0,0896352	0,880918				87,2133		20,952		2,052910235	
	4442_60	0,0316759	0,129218	0,839106				83,0573		24,3063		1,330661197	
2461	4476_10												
	4476_20	0,033515	0,112162	0,854323	0,031167	0,1287968	0,840036	84,7708	83,24776	22,9698	24,1424	1,680833765	1,337635186
	4476_30	0,0280724	0,148404	0,823523				81,5127		25,4656		1,02912756	
	4476_40	0,0419533	0,119295	0,838752				83,1279		24,2523		1,866255188	
	4476_50	0,0182923	0,154168	0,827539				81,9182		25,1651		0,788348056	
	4476_60	0,034002	0,109955	0,856043				84,9092		22,8592		1,748601595	
2482	4514_10												
	4514_20	0,0263653	0,205413	0,768221	0,054874183	0,149126667	0,795999167	74,8846	77,84655	30,0763	27,92313333	0,642509341	2,602161664
	4514_30	0,014522	0,109031	0,876447				86,5753		21,4936		1,03386785	
	4514_40	0,0363742	0,162322	0,801304				78,9343		27,3209		1,067483182	
	4514_50	0,102688	0,148896	0,748416				72,7842		31,4455		4,345844926	
	4514_60	0,0386586	0,128448	0,832894				81,1125		25,7597		1,556839152	

Tiefe (m)	Probe	s ₁	s ₂	s ₃	s _{1, mittel}	s _{2, mittel}	s _{3, mittel}	R _%	R _{%, mittel}	α _s	α _{s, mittel}	k	k _{mittel}
2505	4556_10	0,0578223	0,11373	0,828447	0,020517398	0,1340775	0,845405	79,9983	83,39796667	25,5663	23,9949	2,935498128	1,138257776
	4556_20	0,00858309	0,159342	0,832075				82,4849		24,7406		0,565807356	
	4556_30	0,0127005	0,114119	0,87318				86,9495		21,1773		0,926807973	
	4556_40	0,0112401	0,134278	0,854482				84,912		22,857		0,746075171	
	4556_50	0,0144766	0,128413	0,857111				84,4964		23,1878		0,869702697	
	4556_60	0,0182818	0,154583	0,827135				81,5467		25,4404		0,785655332	
2533	4606_10	0,0609226	0,114087	0,824991	0,03137208	0,142423167	0,826204833	81,1835	81,5645	25,7077	25,27171667	3,153564585	1,327291718
	4606_20	0,034404	0,120064	0,845532				83,6434		23,8556		1,561737653	
	4606_30	0,0363562	0,19558	0,768064				74,8687		30,0868		0,812967847	
	4606_40	0,00371978	0,123445	0,872835				87,0673		21,0769		0,558503014	
	4606_50	0,0146702	0,119012	0,866318				85,8827		22,0694		0,948228686	
	4606_60	0,0381597	0,182351	0,779489				76,7414		28,8339		0,928748523	

Fehlende Proben

Qualität: 55%

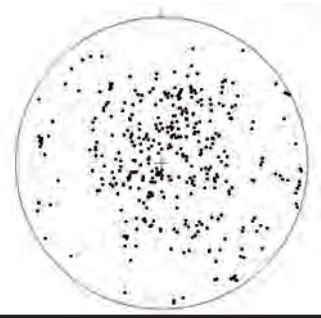
9.3 Falschfarbenbilder der NEEM Proben

Die in diesem Teil dargestellten Abbildungen bestehen aus den zusammengesetzten Falschfarbenaufnahmen (Trend) der NEEM Dünnschnitte (mittlere Spalte). Die Bezeichnungen der einzelnen Proben, sowie die Stichprobenzahl (n) sind in der linken Spalte zu sehen, die entsprechenden Schmidt-Diagramme (in horizontale Projektion rotiert) in der rechten Spalte.

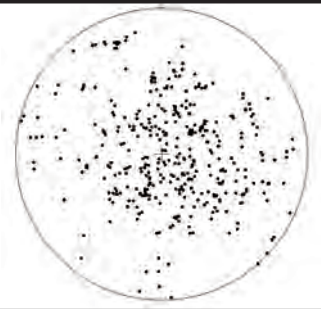
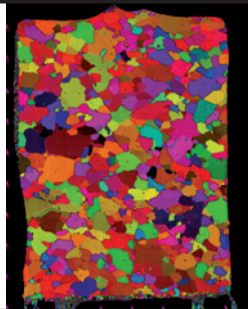
Zum besseren Verständnis der Falschfarbenaufnahmen ist eine Legende für den Orientierungsfarbcode oben links im Bild gegeben.



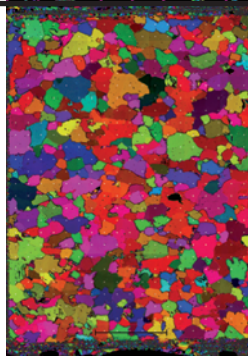
1187_10 (n=391)



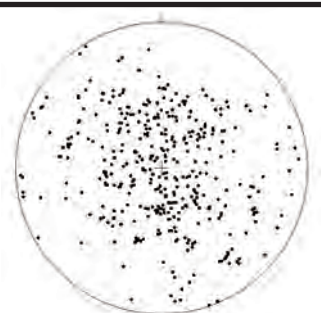
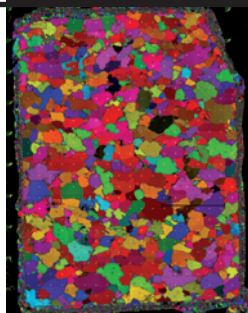
1187_30 (n=388)



1187_40 (n=394)

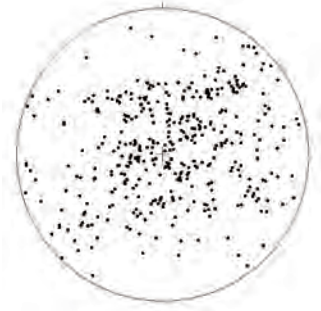
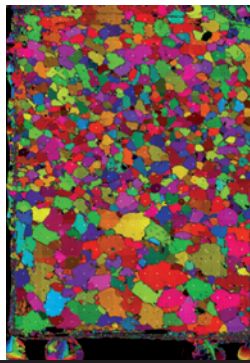


1187_60 (n=388)

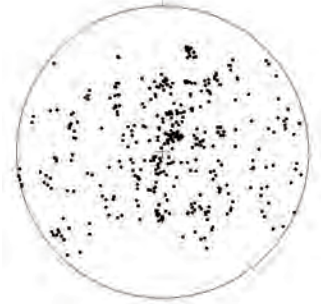
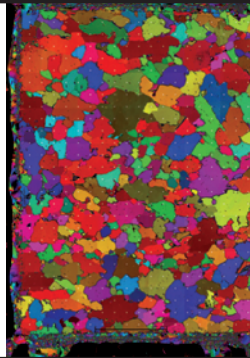




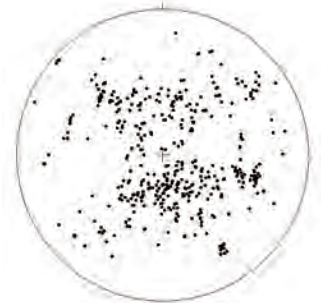
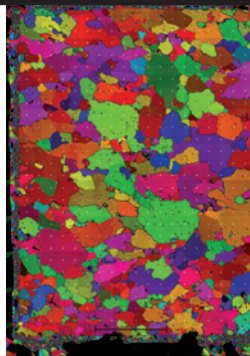
1227_10 (n=382)



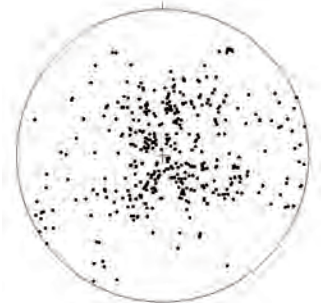
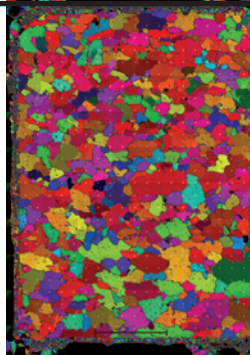
1227_20 (n=395)



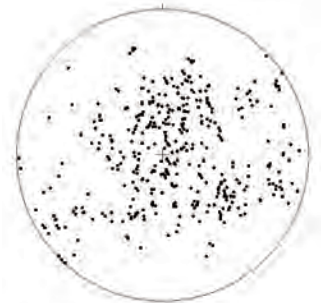
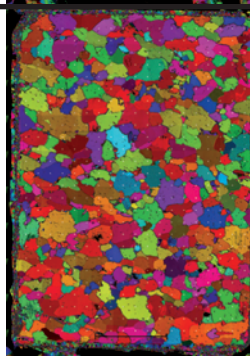
1227_30 (n=419)



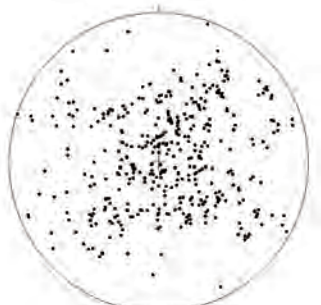
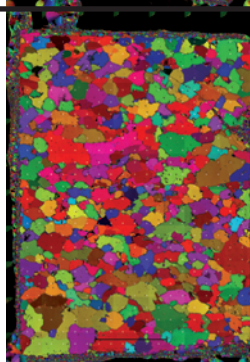
1227_40 (n=405)



1227_50 (n=400)

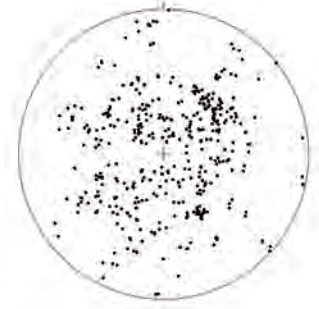
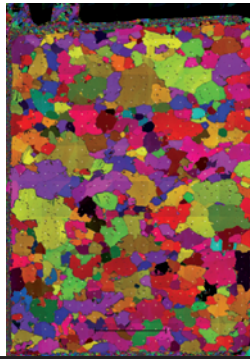


1227_60 (n=404)

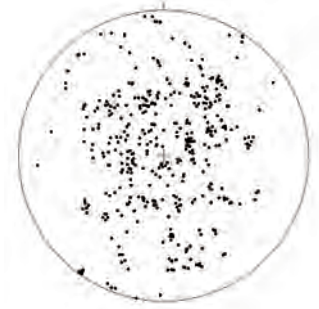
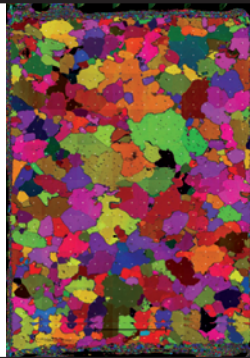




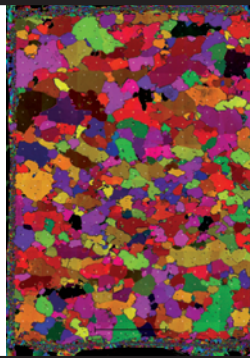
1306_10 (n=395)



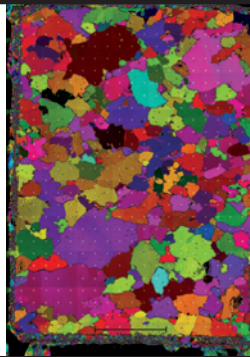
1306_20 (n=411)



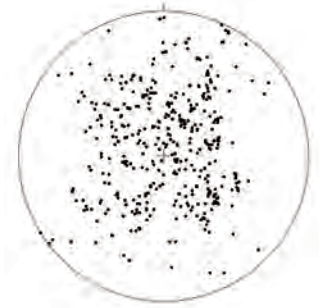
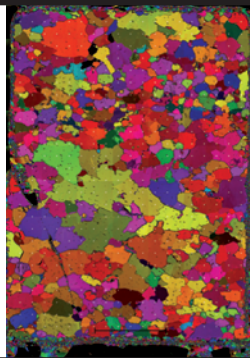
1306_30 (n=404)



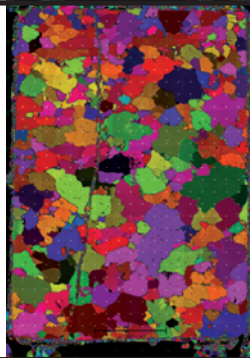
1306_40 (n=417)



1306_50 (n=408)

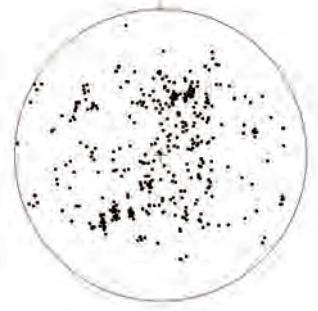
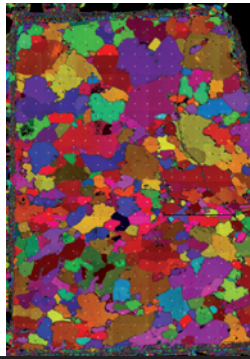


1306_60 (n=416)

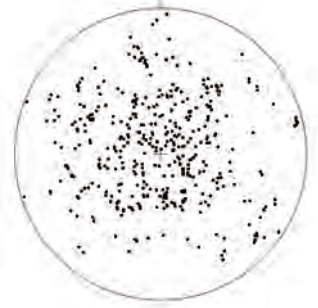
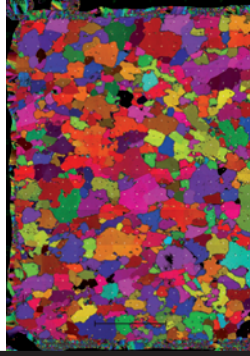




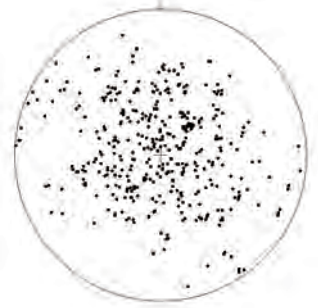
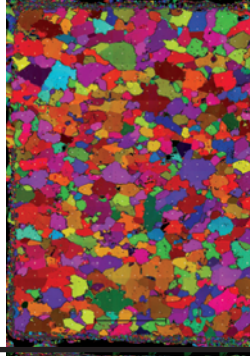
1346_10 (n=400)



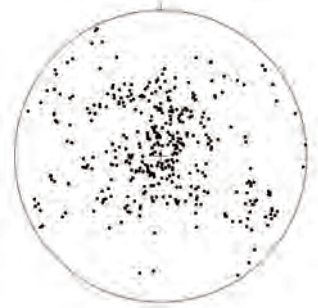
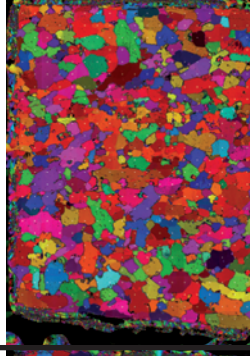
1346_20 (n=409)



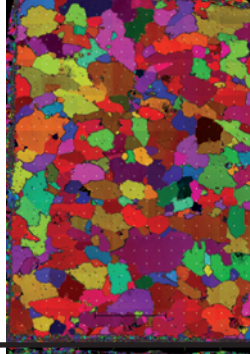
1346_30 (n=403)



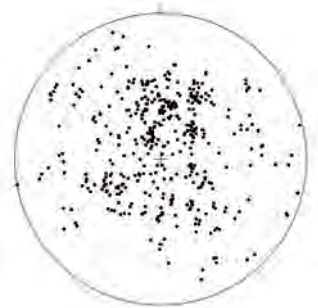
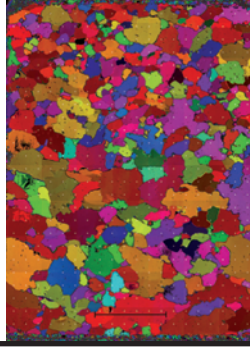
1346_40 (n=382)



1346_50 (n=422)

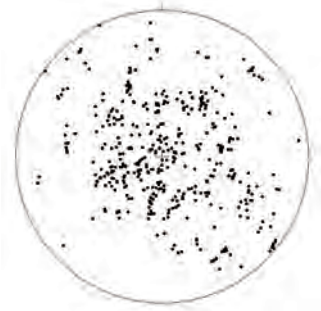
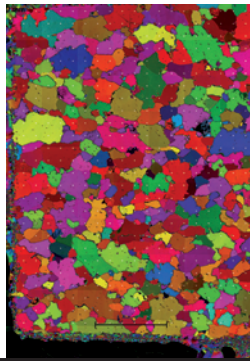


1346_60 (n=430)

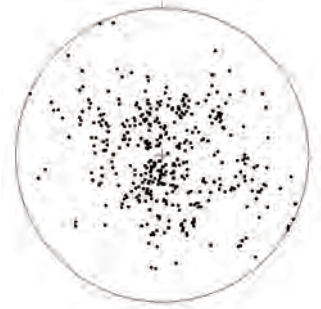
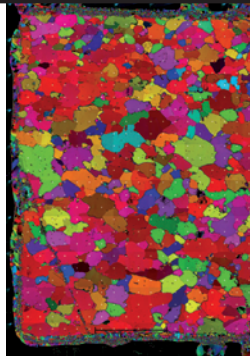




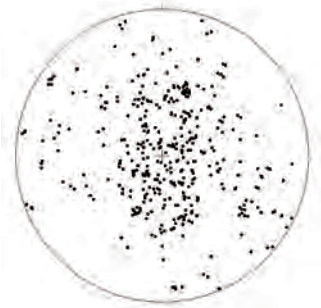
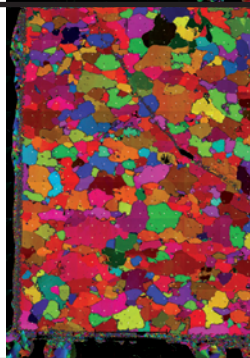
1375_10 (n=414)



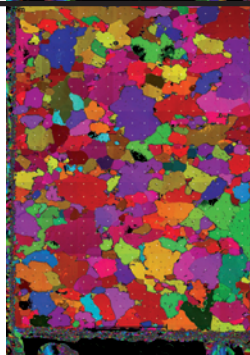
1375_20 (n=404)



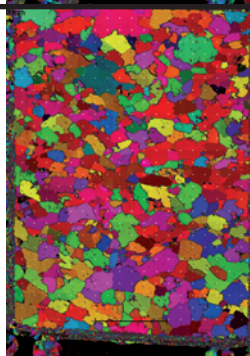
1375_30 (n=406)



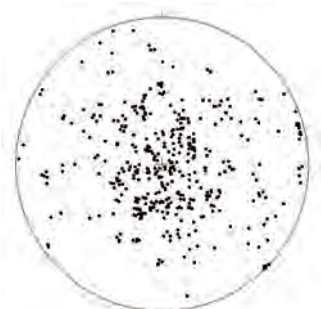
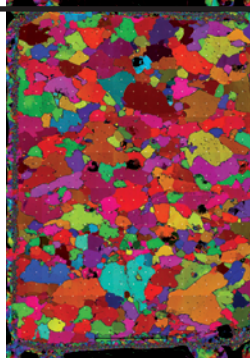
1375_40 (n=405)



1375_50 (n=393)

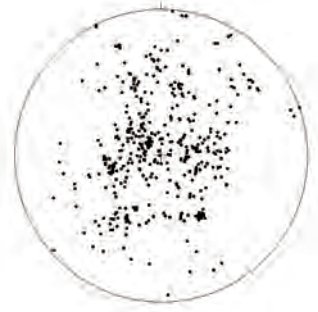
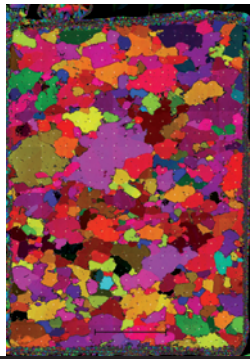


1375_60 (n=422)

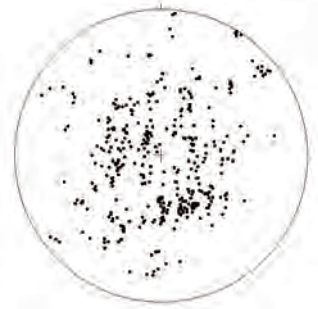
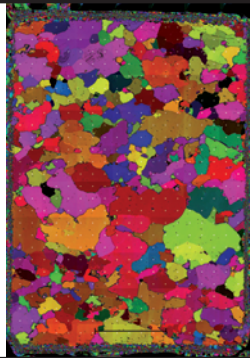




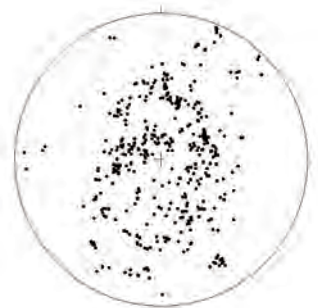
1426_10 (n=420)



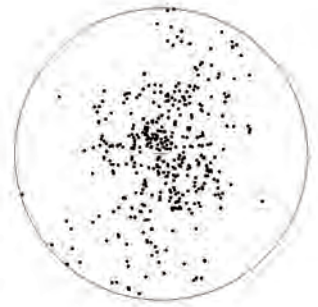
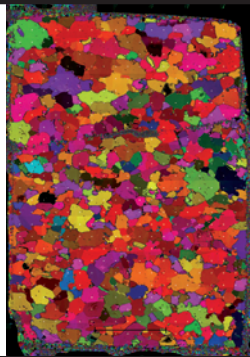
1426_20 (n=391)



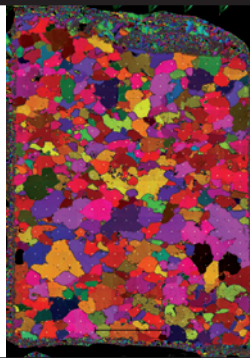
1426_30 (n=424)



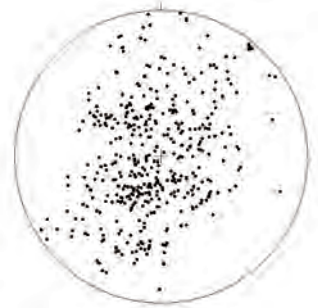
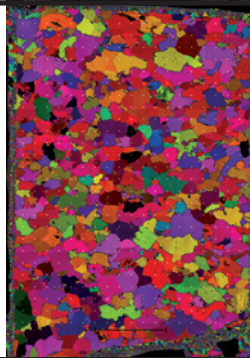
1426_40 (n=398)



1426_50 (n=422)



1426_60 (n=419)

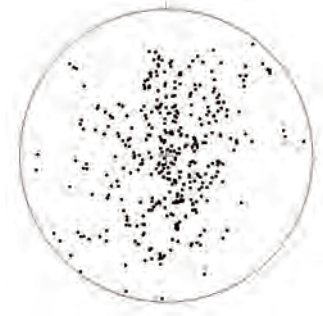




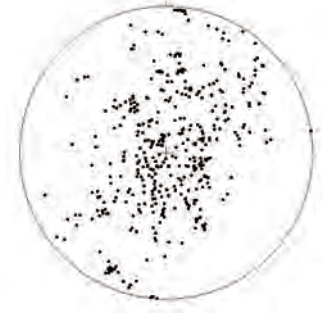
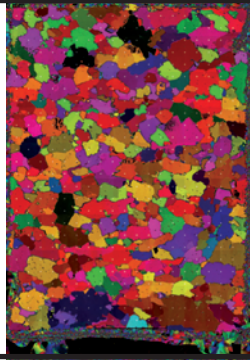
1426_10 (n=420)



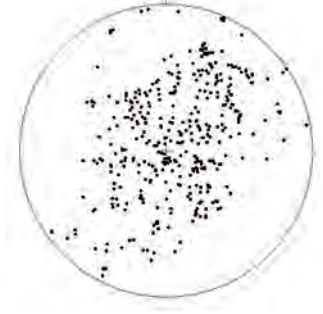
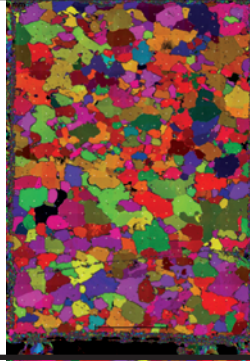
1496_20 (n=398)



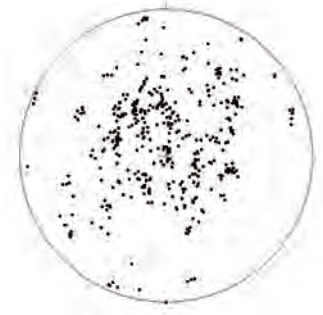
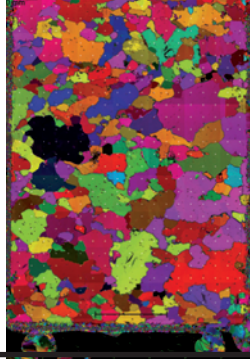
1496_30 (n=379)



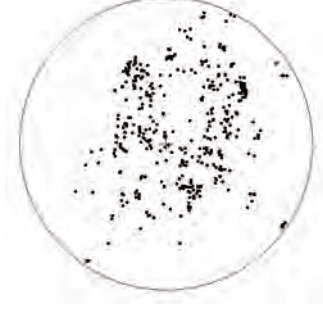
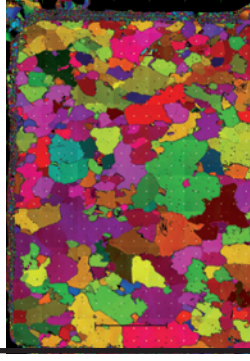
1496_40 (n=418)



1496_50 (n=411)

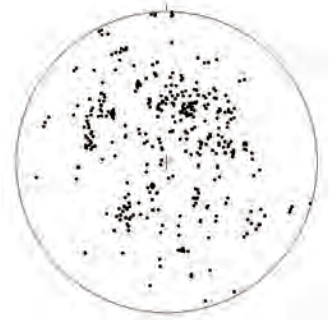
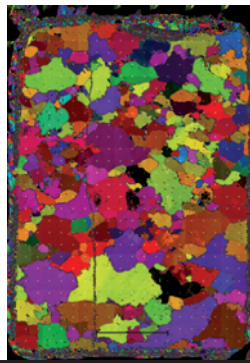


1496_60 (n=396)

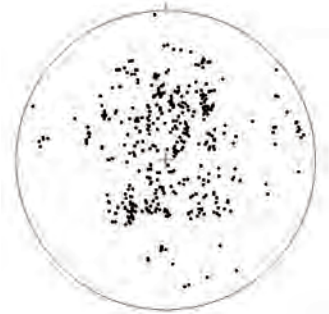
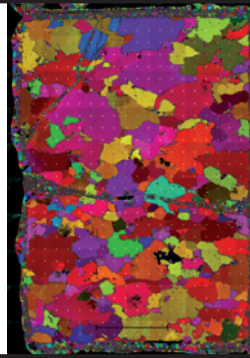




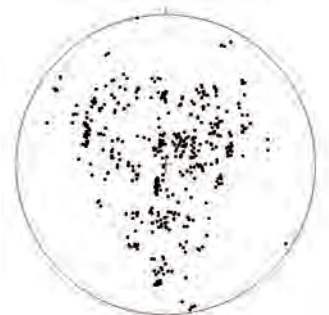
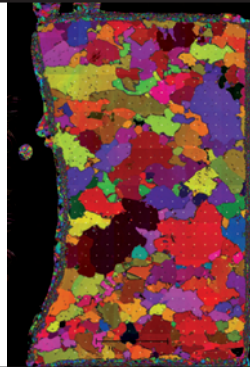
1546_10 (n=387)



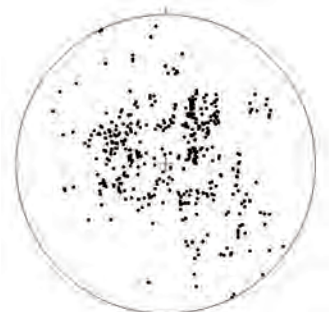
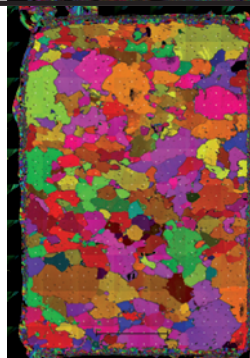
1546_20 (n=421)



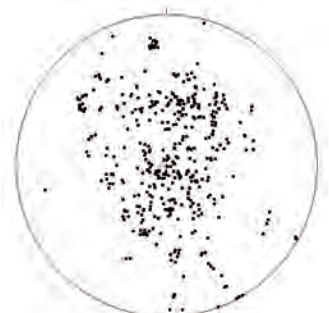
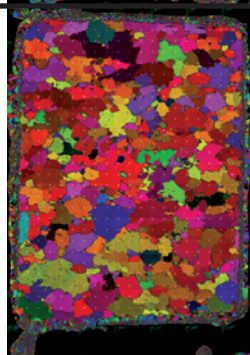
1546_30 (n=450)



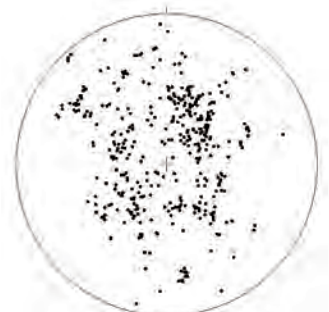
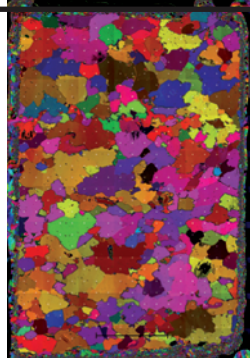
1546_40 (n=433)



1546_50 (n=408)

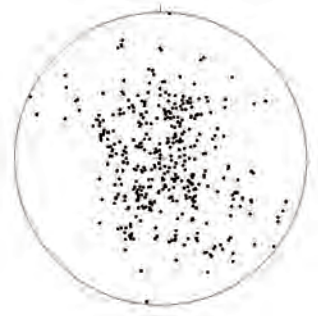
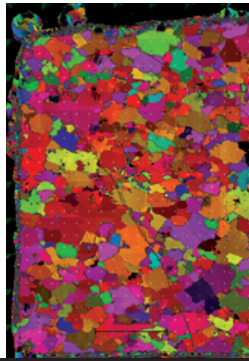


1546_60 (n=410)

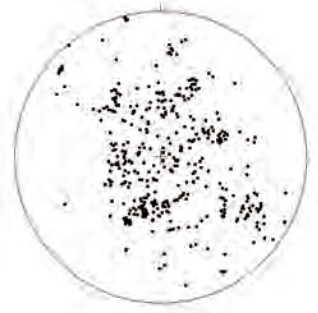
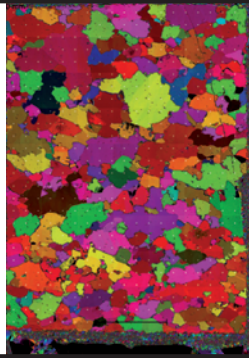




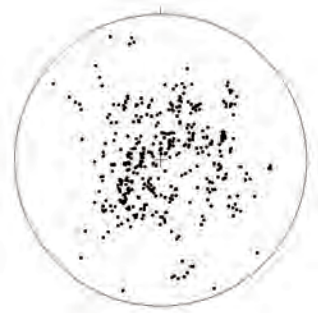
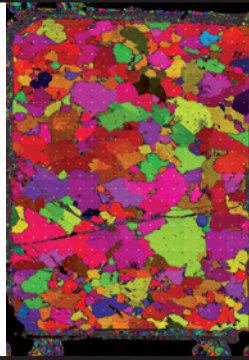
1616_10 (n=407)



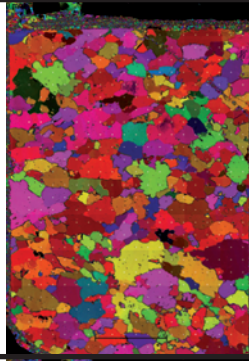
1616_20 (n=413)



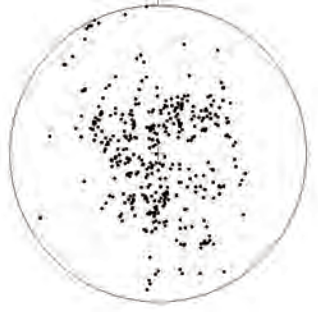
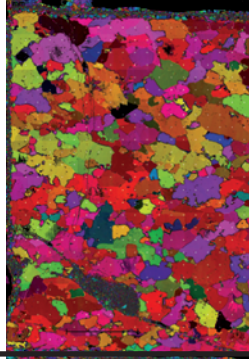
1616_30 (n=407)



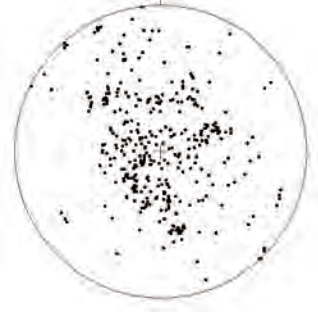
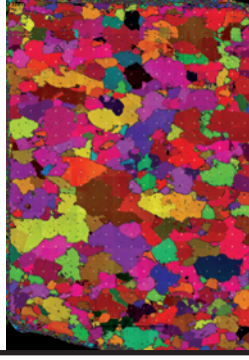
1616_40 (n=392)



1616_50 (n=382)

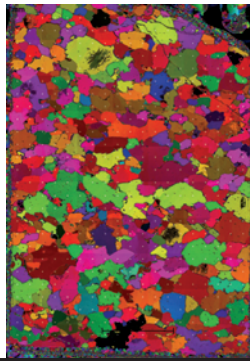


1616_60 (n=380)

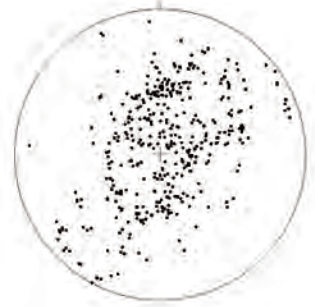
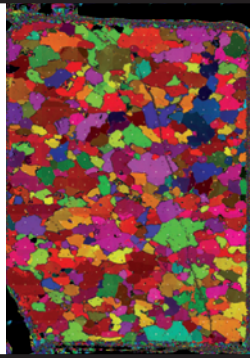




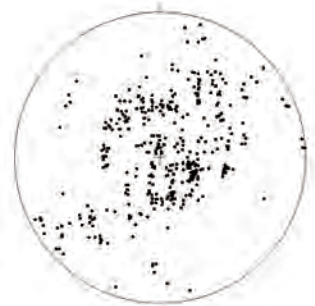
1676_10 (n=373)



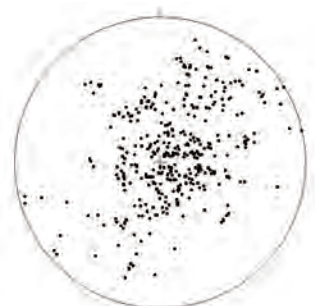
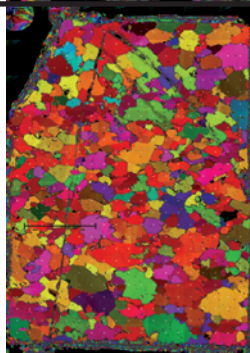
1676_20 (n=401)



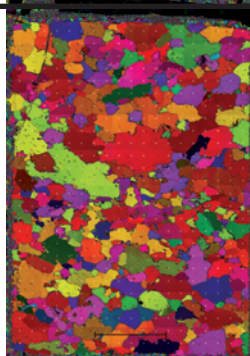
1676_30 (n=404)



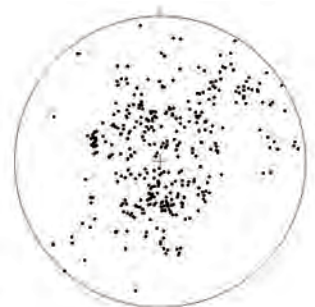
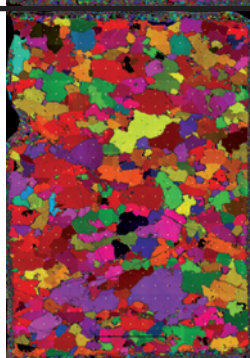
1676_40 (n=380)



1676_50 (n=404)

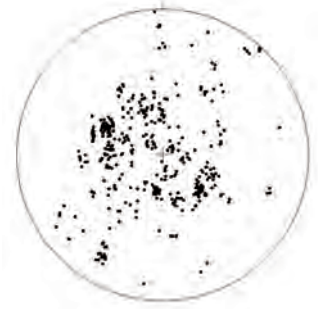
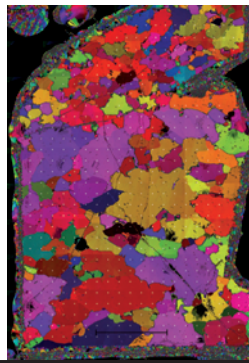


1676_60 (n=366)

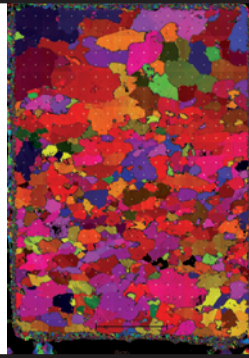




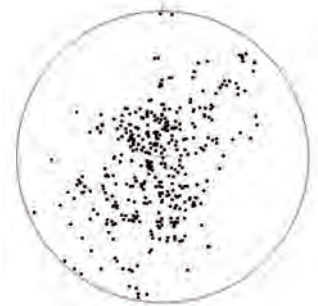
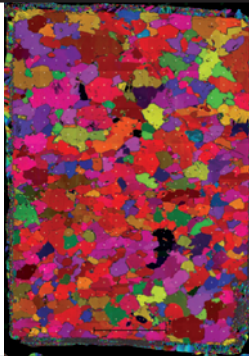
1766_10 (n=425)



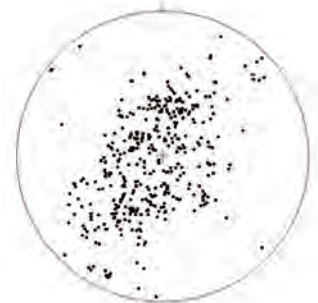
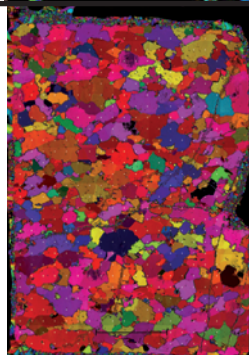
1766_20 (n=428)



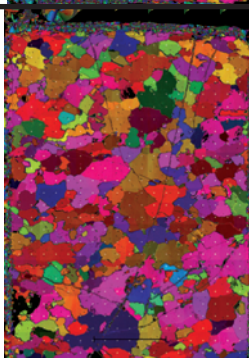
1766_30 (n=393)



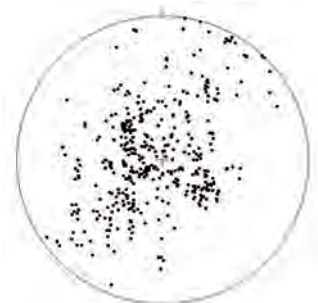
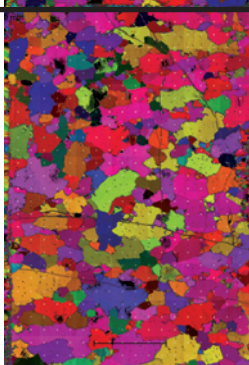
1766_40 (n=400)



1766_50 (n=387)

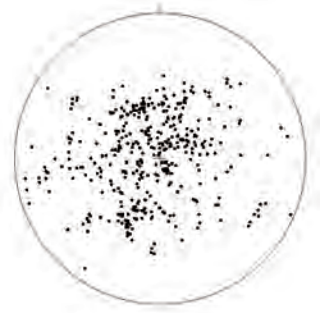


1766_60 (n=413)

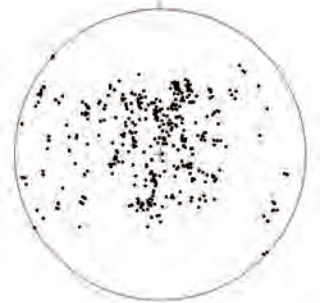
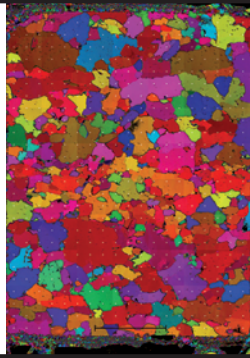




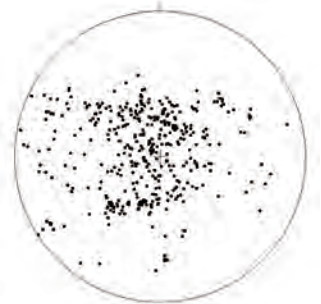
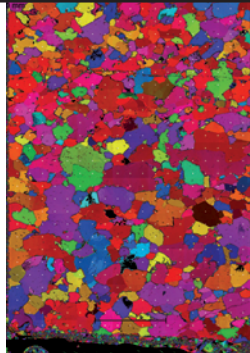
1815_10 (n=402)



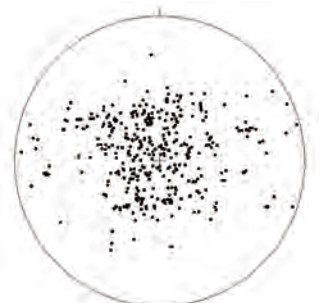
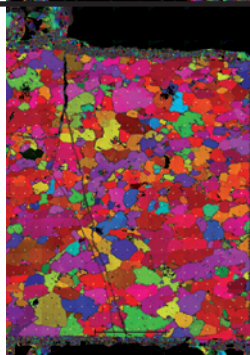
1815_20 (n=398)



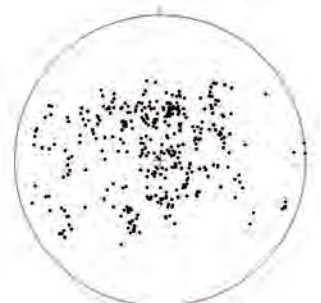
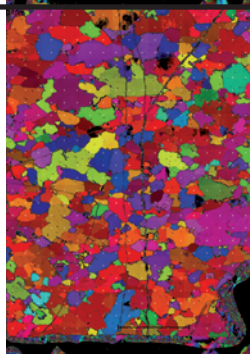
1815_30 (n=392)



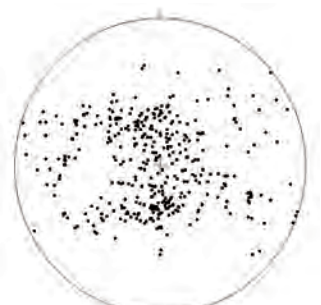
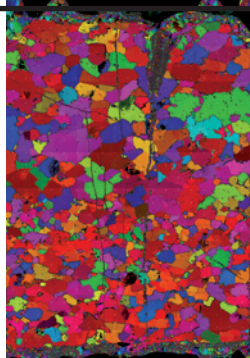
1815_40 (n=397)



1815_50 (n=371)

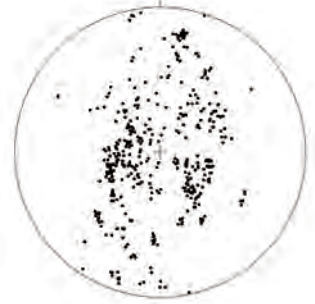
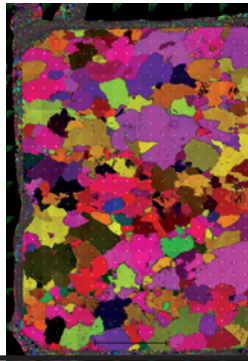


1815_60 (n=486)

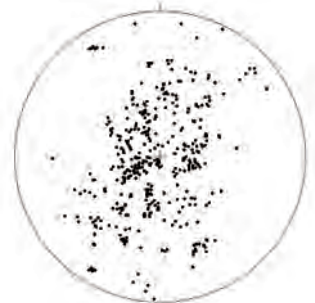
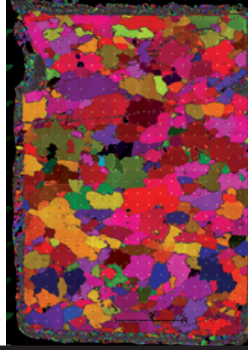




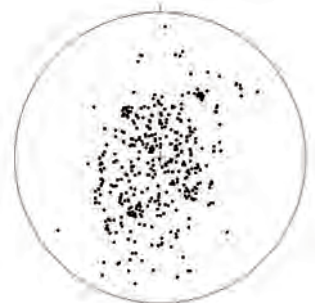
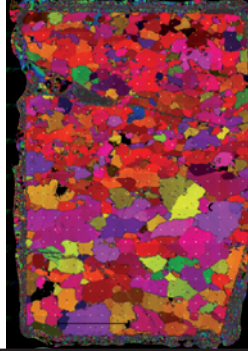
1866_10 (n=424)



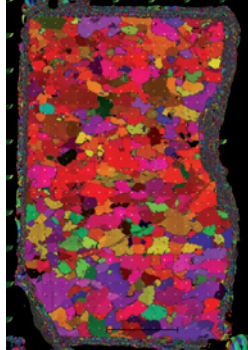
1866_20 (n=415)



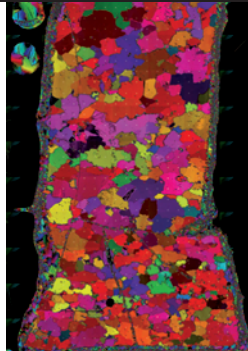
1866_30 (n=400)



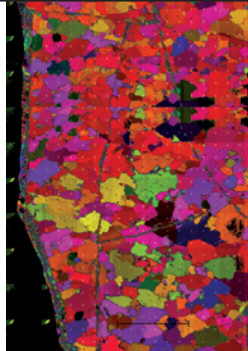
1866_40 (n=400)



1866_50 (n=398)

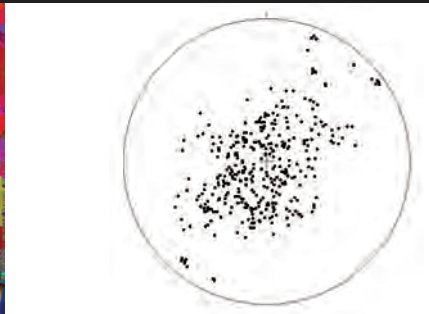
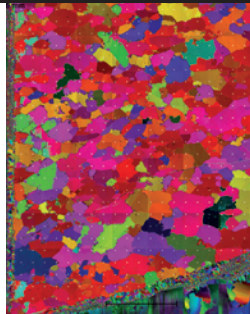


1866_60 (n=375)

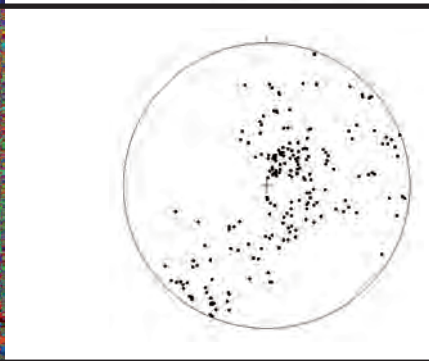
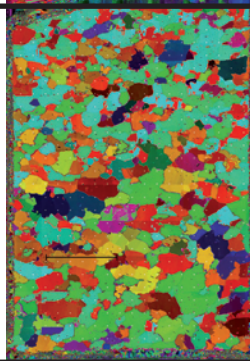




2106_20 (n=374)



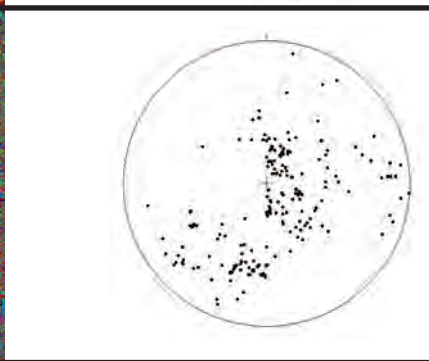
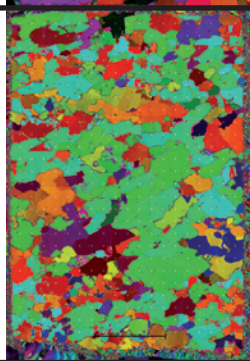
2106_30 (n=241)



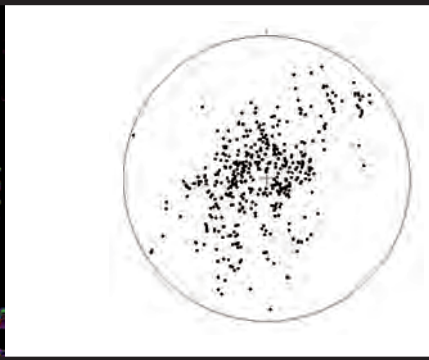
2106_40 (n=405)



2106_50 (n=196)

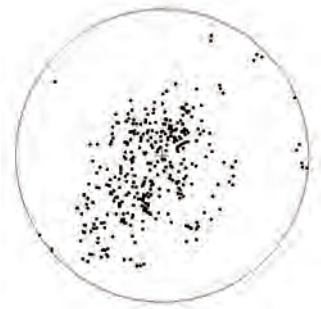
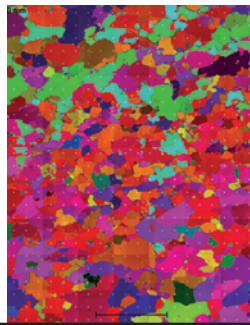


2106_60 (n=449)

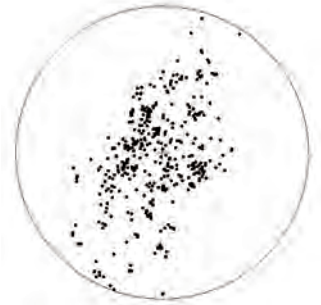
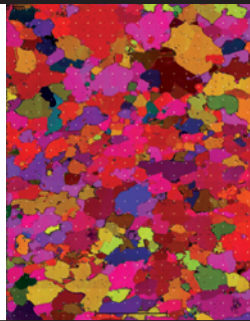




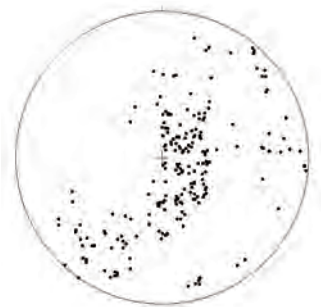
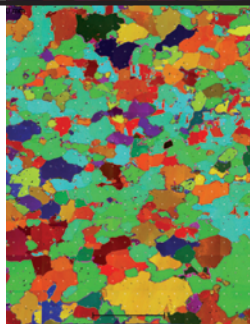
2204_10 (n=358)



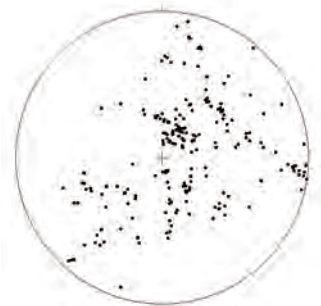
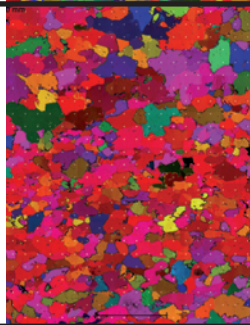
2204_20 (n=419)



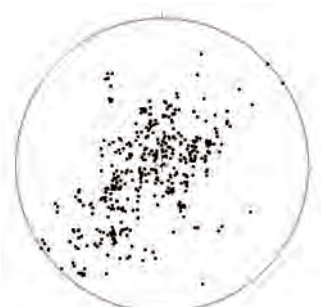
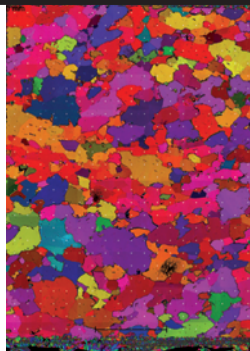
2204_30 (n=223)



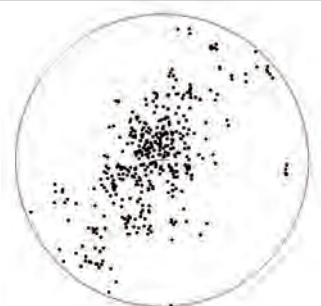
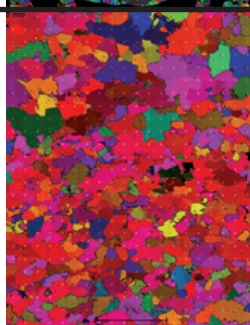
2204_40 (n=204)



2204_50 (n=413)

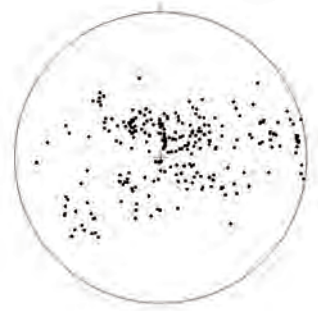
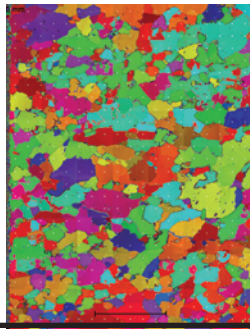


2204_60 (n=410)

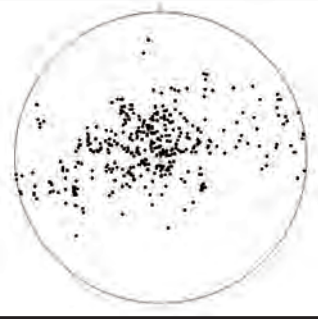
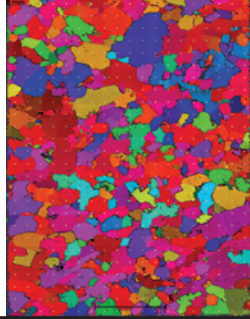




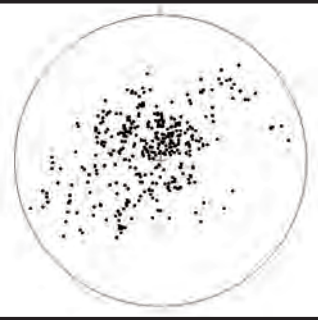
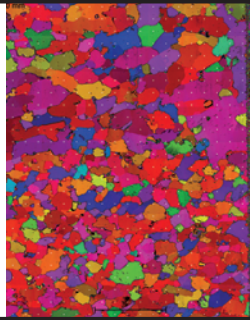
2275_10 (n=264)



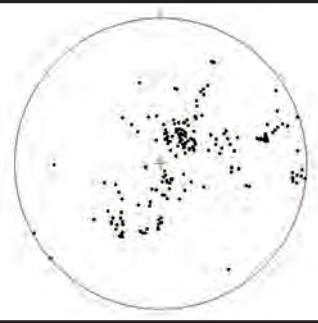
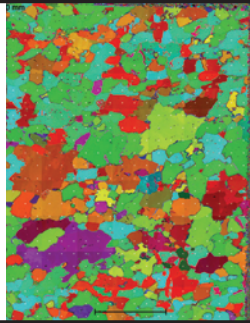
2275_20 (n=397)



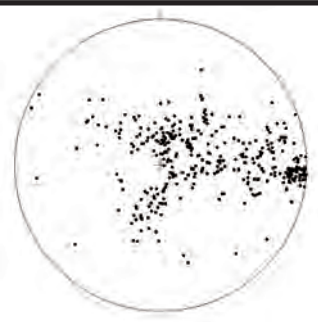
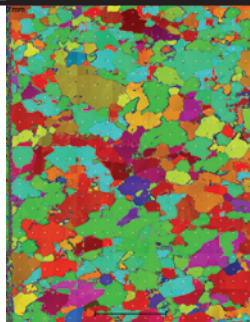
2275_30 (n=384)



2275_40 (n=190)

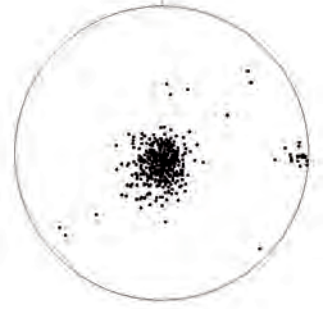
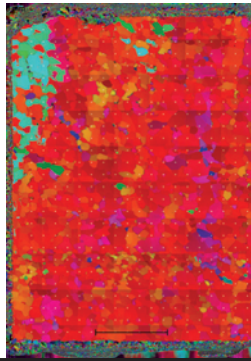


2275_60 (n=373)

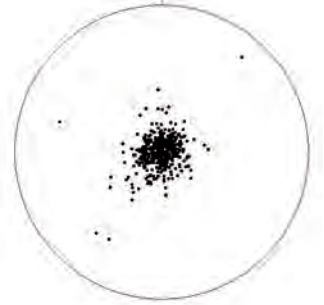
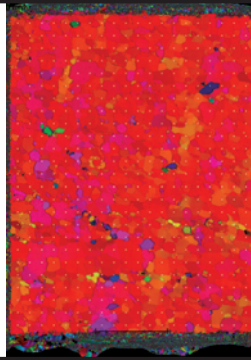




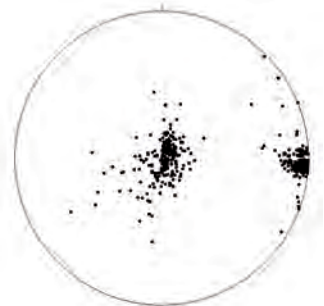
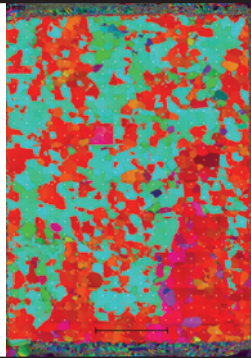
3276_10 (n=451)



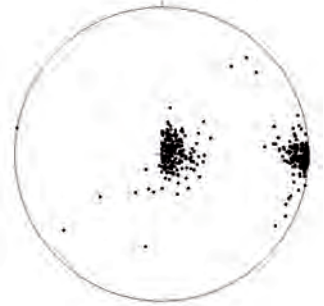
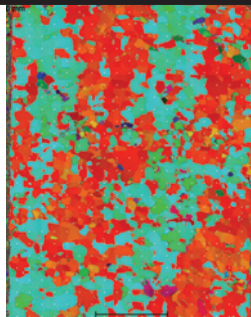
3276_20 (n=472)



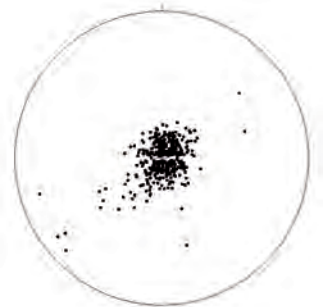
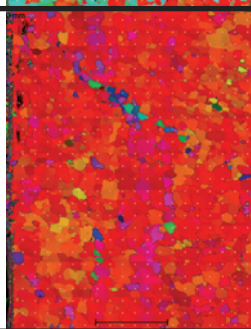
3276_30 (n=410)



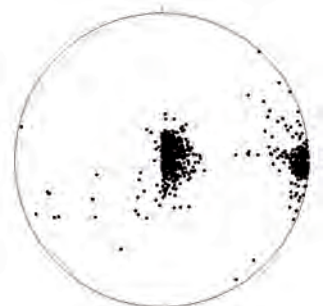
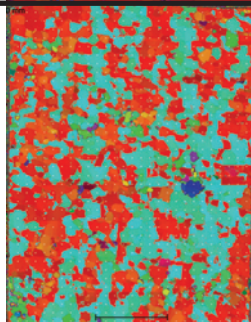
3276_40 (n=440)



3276_50 (n=429)

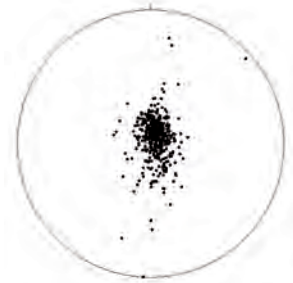
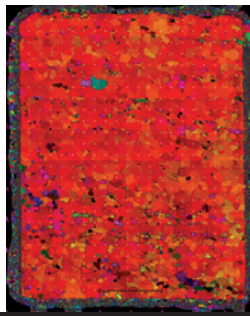


3276_60 (n=450)

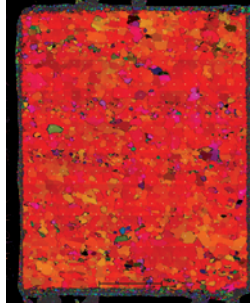




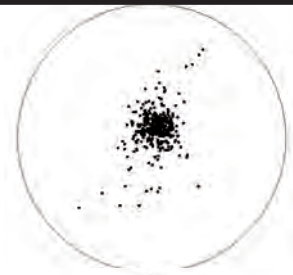
3396_10 (n=451)



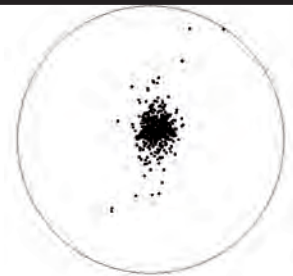
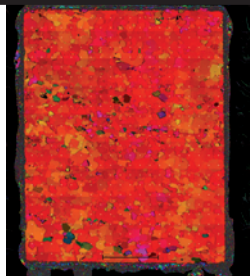
3396_20 (n=378)



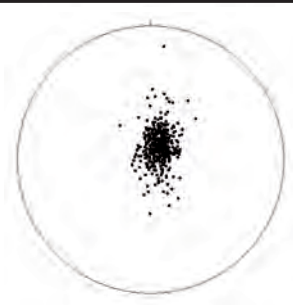
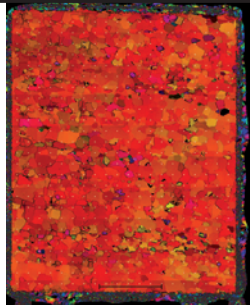
3396_30 (n=404)



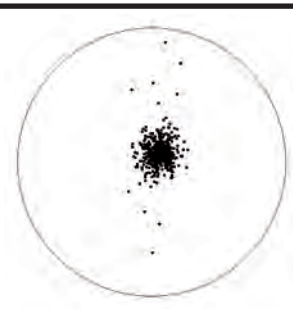
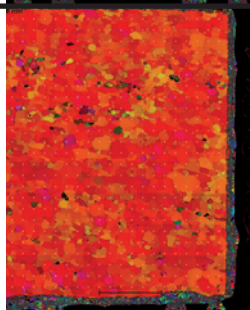
3396_40 (n=462)



3396_50 (n=433)

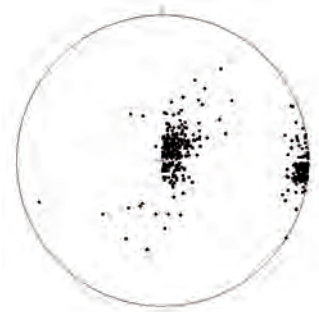
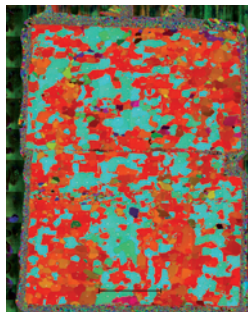


3396_60 (n=462)

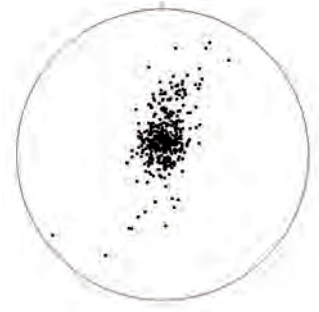
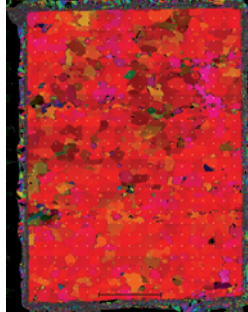




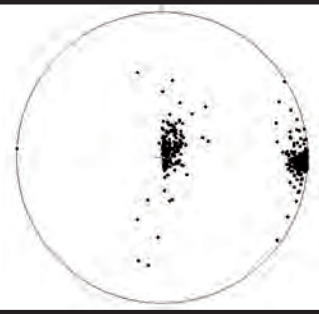
3476_10 (n=419)



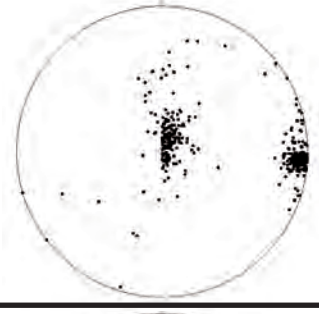
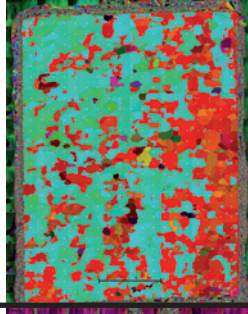
3476_20 (n=437)



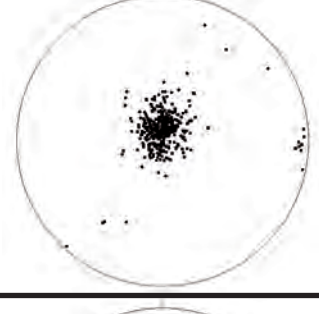
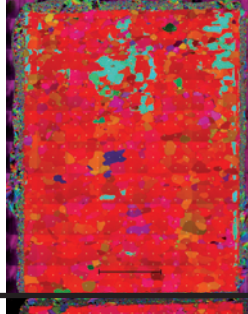
3476_30 (n=411)



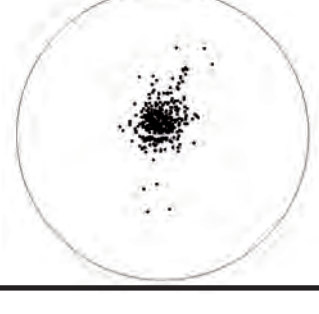
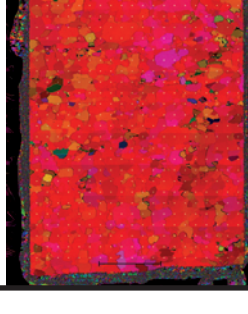
3476_40 (n=418)



3476_50 (n=388)

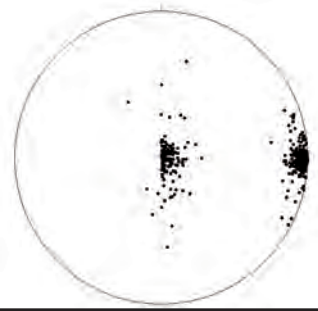
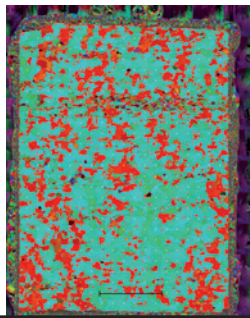


3476_60 (n=401)

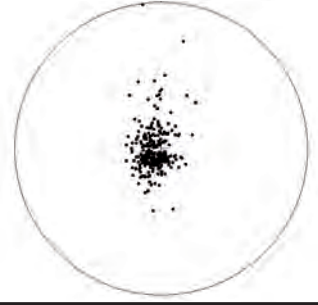
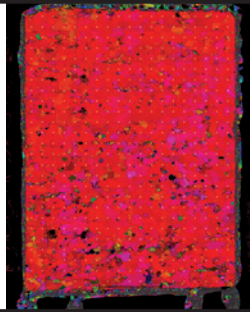




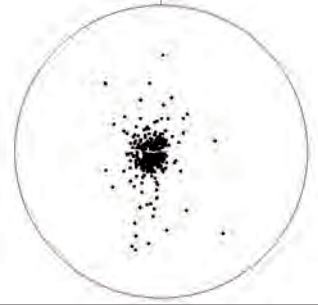
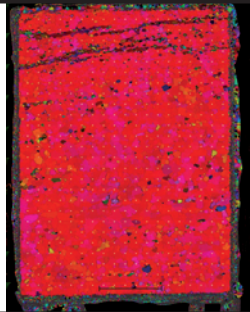
3556_10 (n=403)



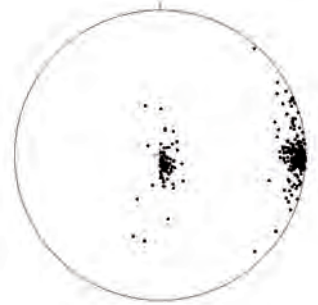
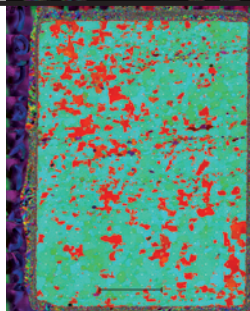
3556_20 (n=286)



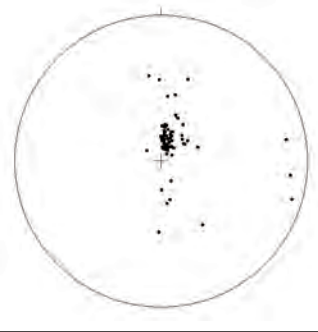
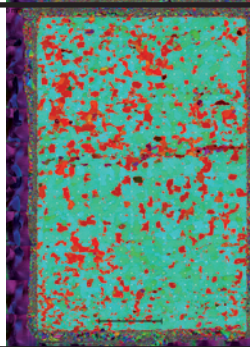
3556_30 (n=347)



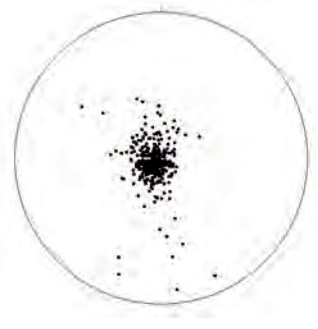
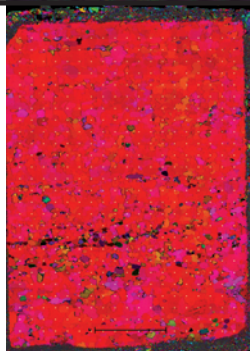
3556_40 (n=388)



3556_50 (n=83)

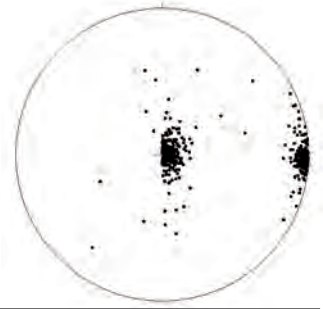
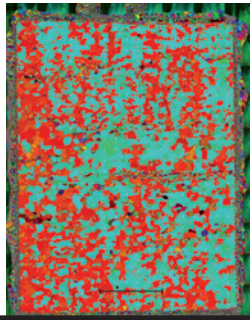


3556_60 (n=372)

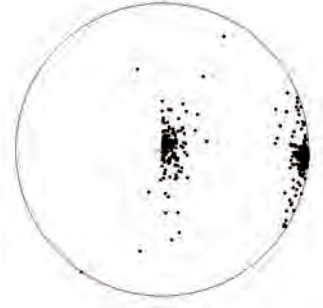
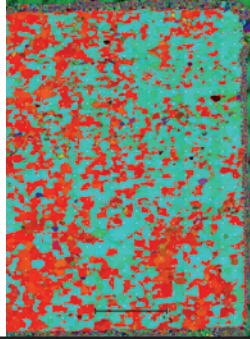




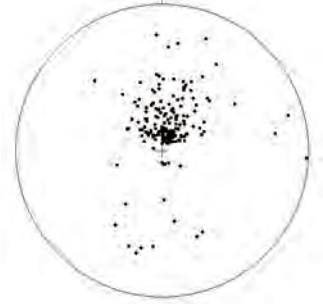
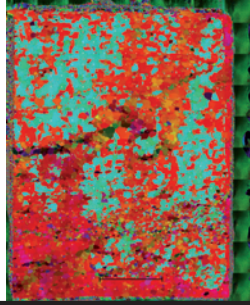
3636_10 (n=441)



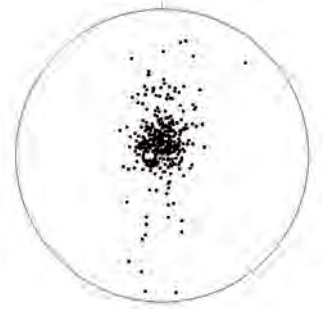
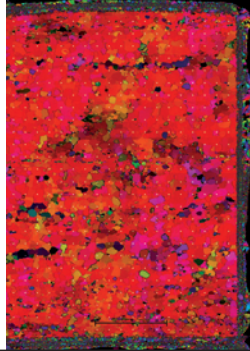
3636_20 (n=417)



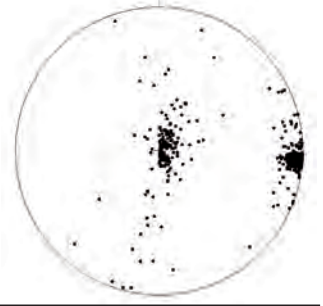
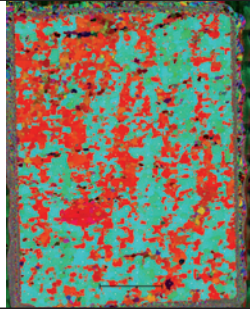
3636_30 (n=192)



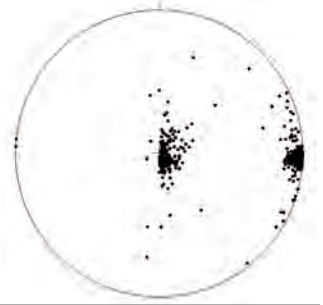
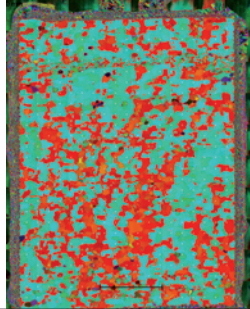
3636_40 (n=382)



3636_50 (n=403)

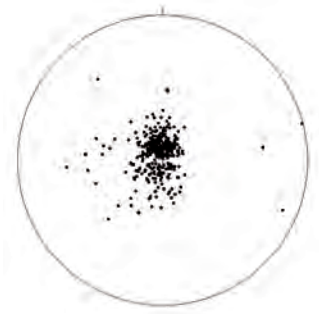
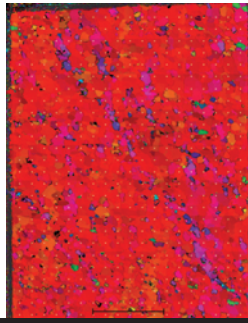


3636_60 (n=419)

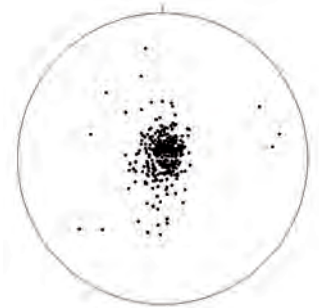
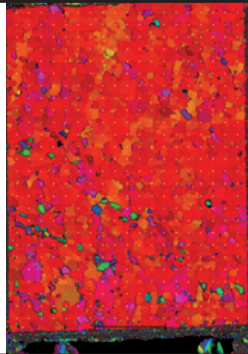




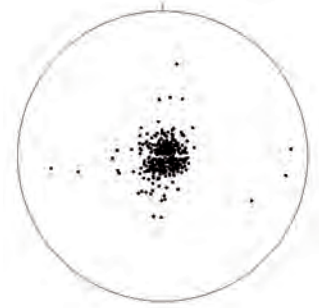
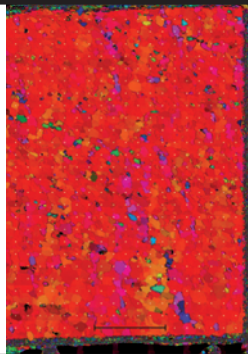
3817_10 (n=360)



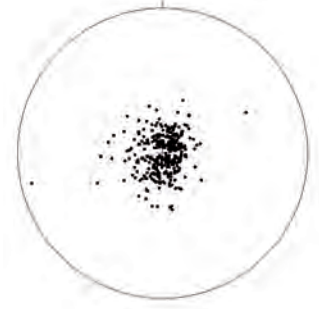
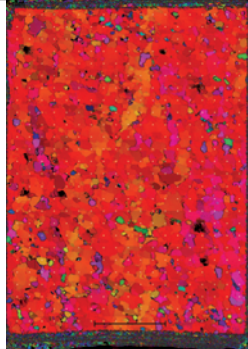
3817_30 (n=363)



3817_50 (n=348)

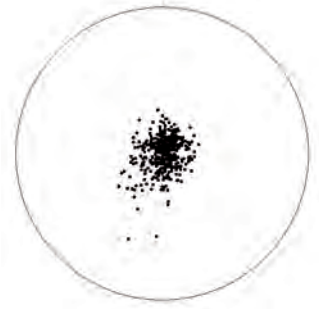
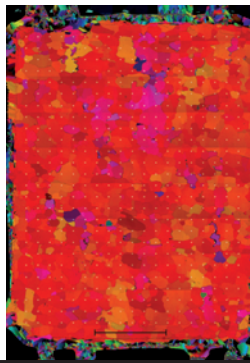


3817_60 (n=349)

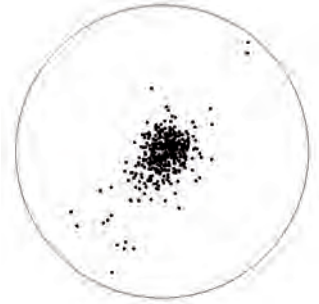
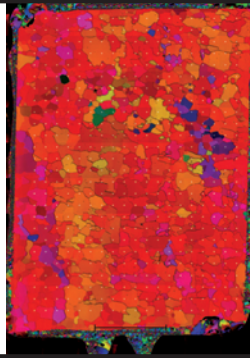




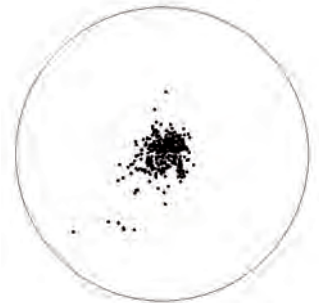
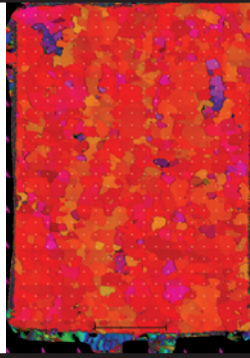
4006_10 (n=444)



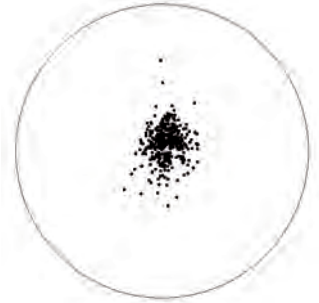
4006_20 (n=439)



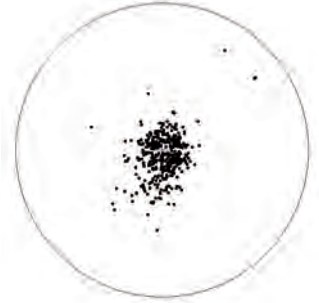
4006_30 (n=392)



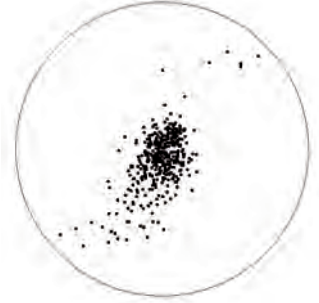
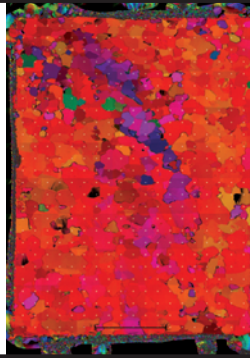
4006_40 (n=418)



4006_50 (n=377)

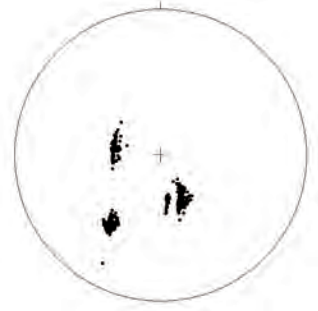
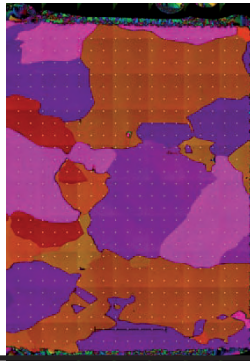


4006_60 (n=416)

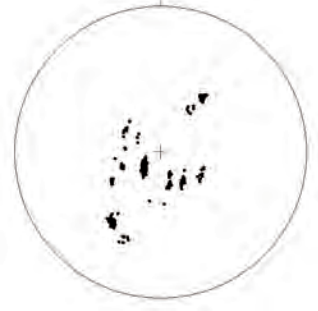
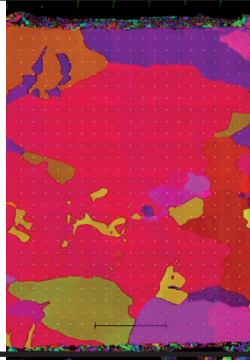




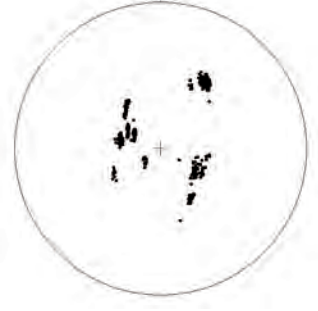
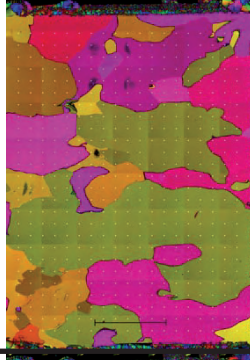
4116_10 (n=470)



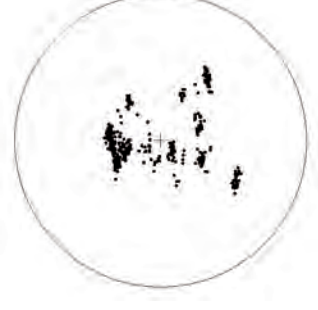
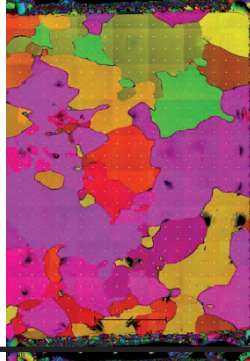
4116_20 (n=469)



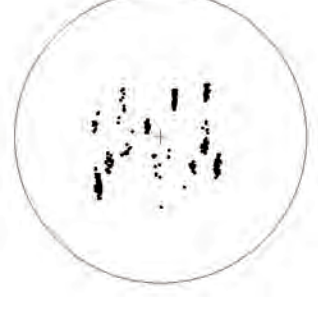
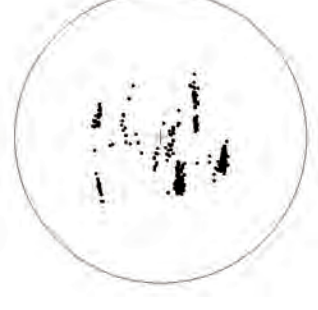
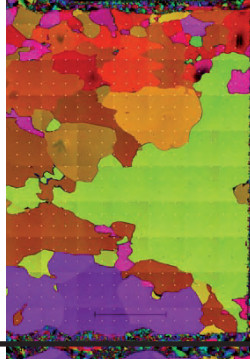
4116_30 (n=474)



4116_40 (n=431)

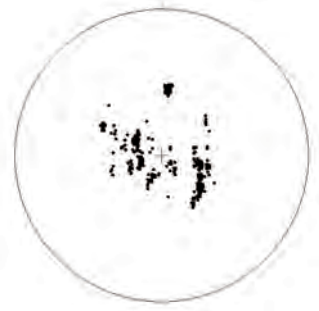
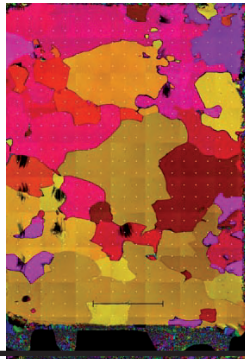


4116_50 (n=440)

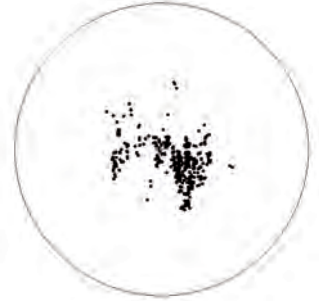
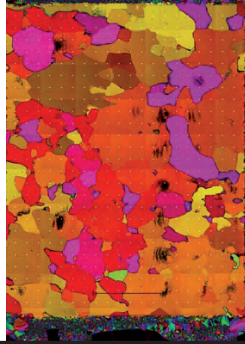




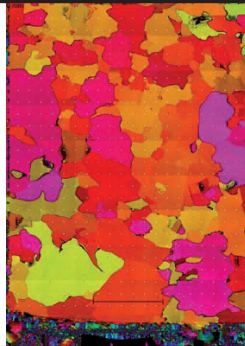
4126_10 (n=398)



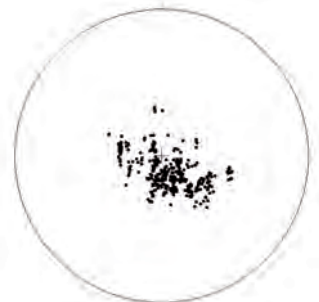
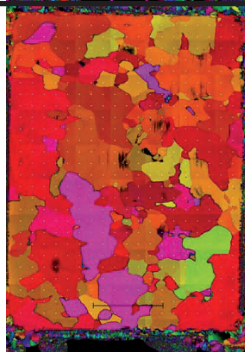
4126_20 (n=417)



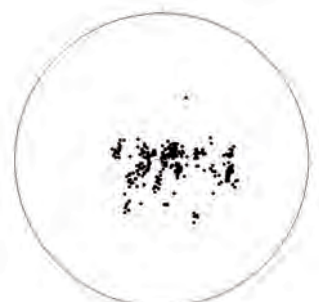
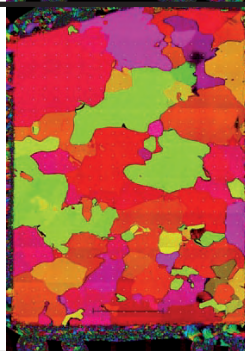
4126_30 (n=429)



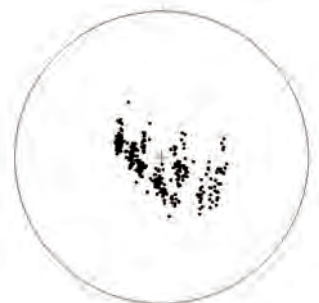
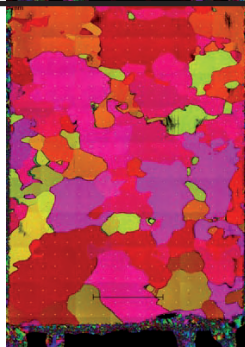
4126_40 (n=379)



4126_50 (n=380)

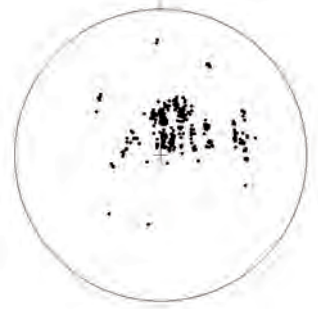
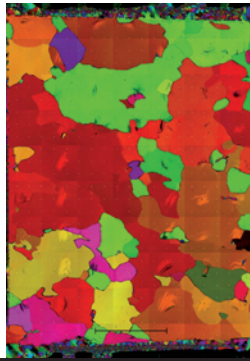


4126_60 (n=413)

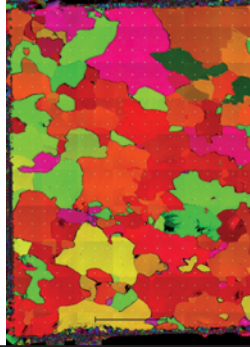




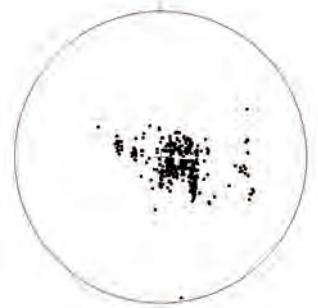
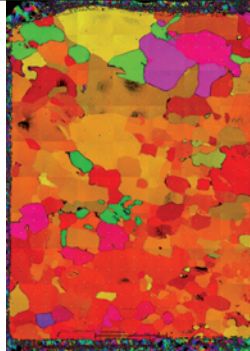
4156_10 (n=388)



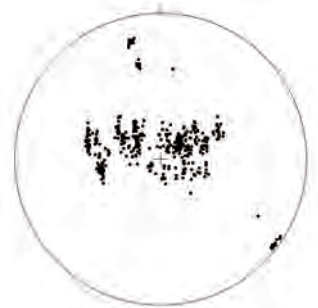
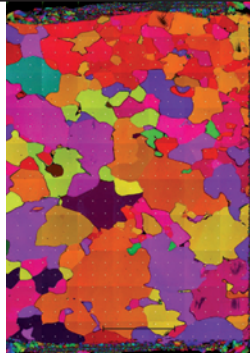
4156_20 (n=387)



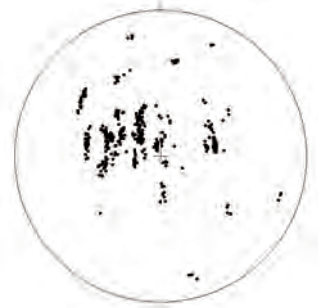
4156_30 (n=346)



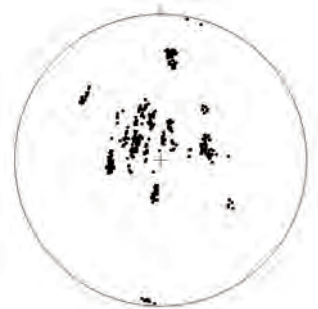
4156_40 (n=434)



4156_50 (n=438)

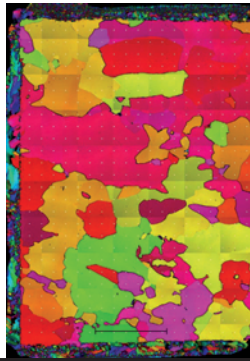


4156_60 (n=437)

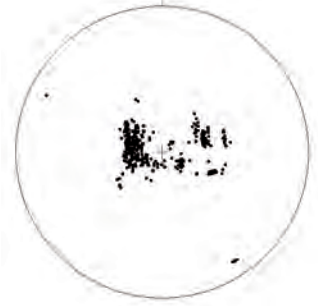
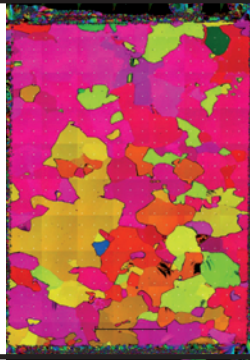




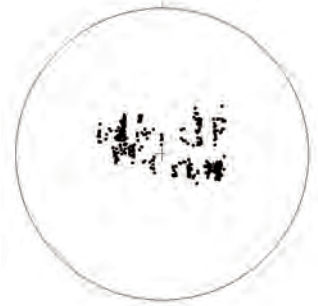
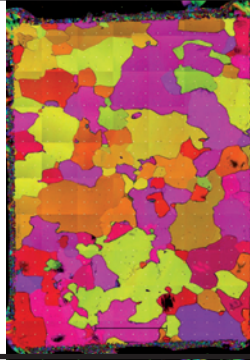
4196_10 (n=216)



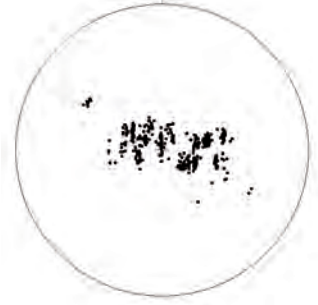
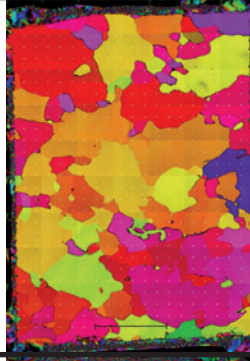
4196_20 (n=365)



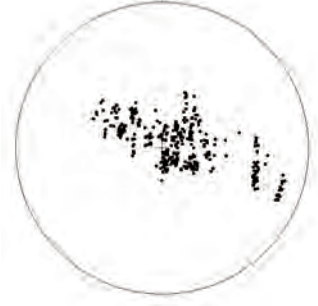
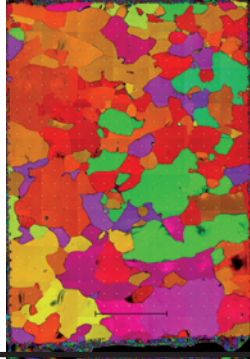
4196_30 (n=377)



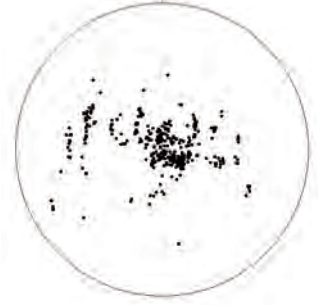
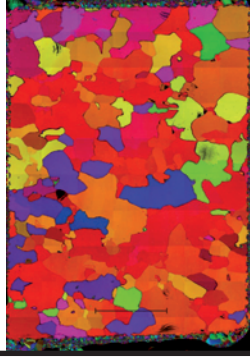
4196_40 (n=417)



4196_50 (n=394)

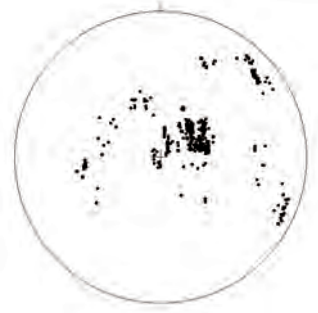
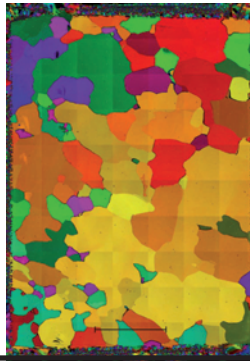


4196_60 (n=352)

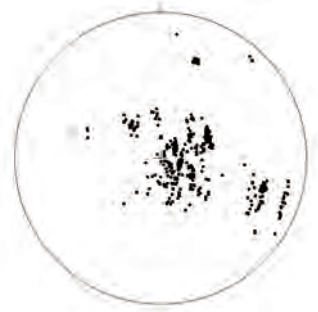
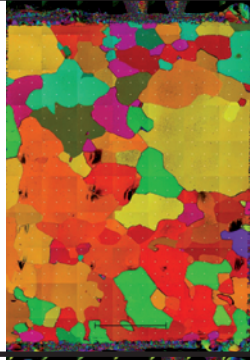




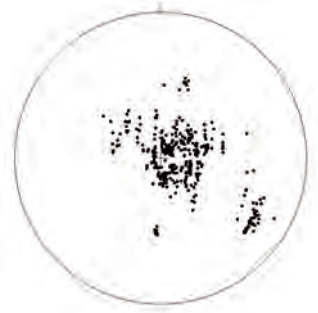
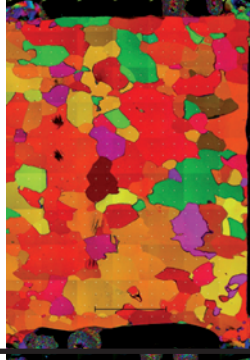
4276_10 (n=404)



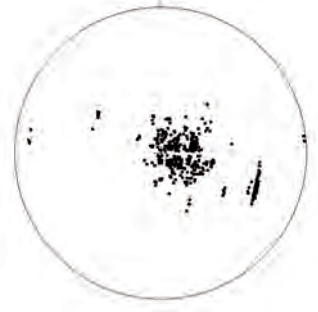
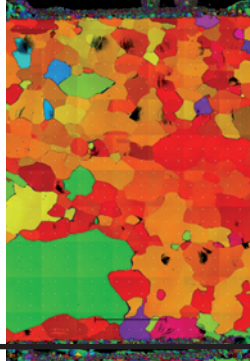
4276_20 (n=402)



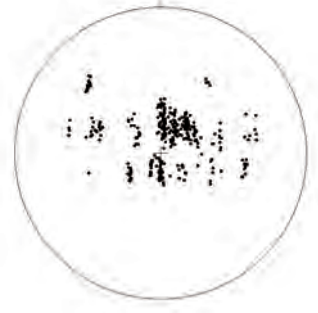
4276_30 (n=371)



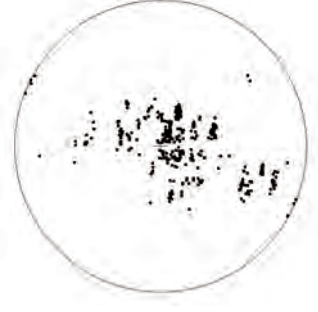
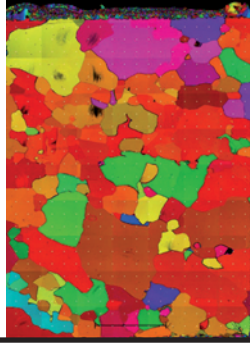
4276_40 (n=403)



4276_50 (n=351)

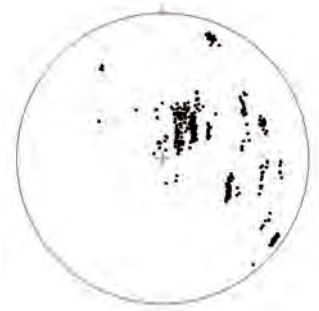
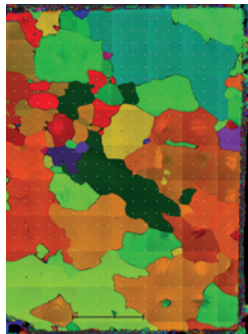


4276_60 (n=394)

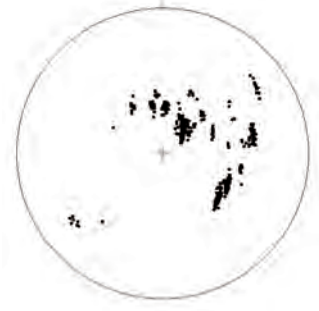
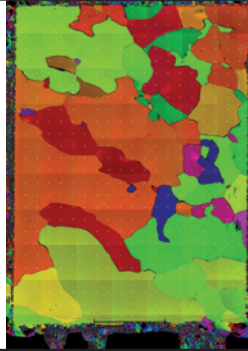




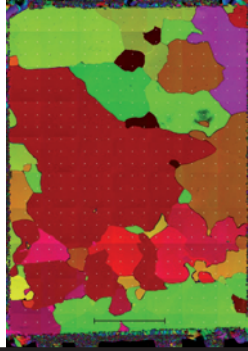
4299_10 (n=442)



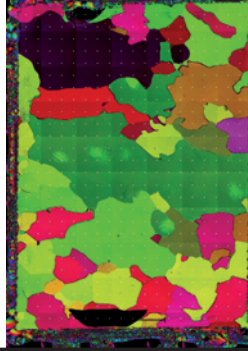
4299_20 (n=460)



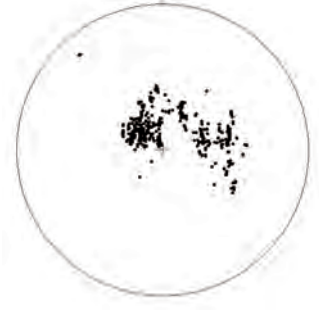
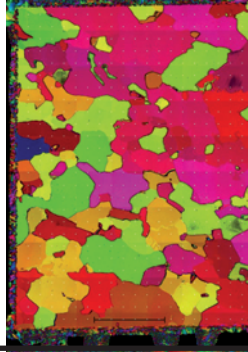
4299_30 (n=468)



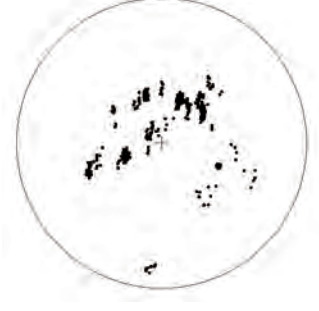
4299_40 (n=417)



4299_50 (n=385)

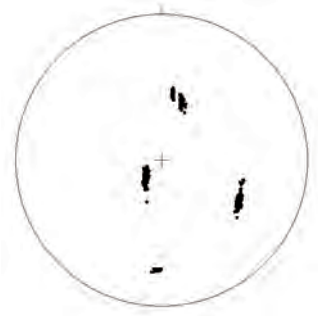


4299_60 (n=430)

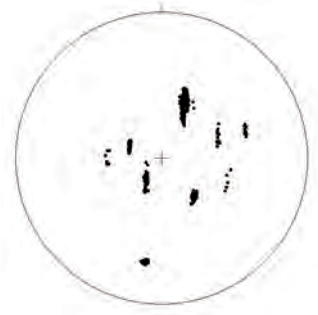
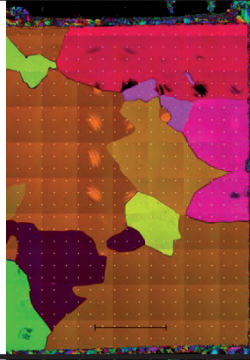




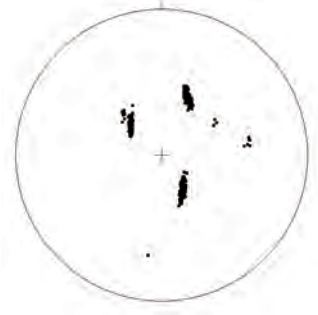
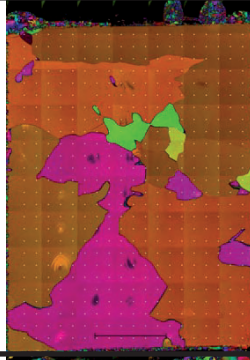
4316_10 (n=470)



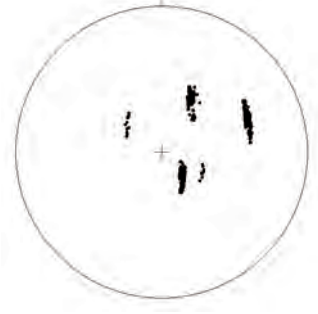
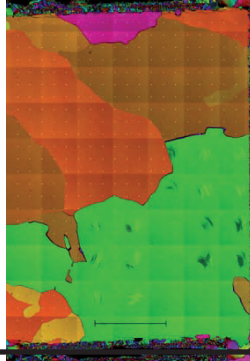
4316_20 (n=452)



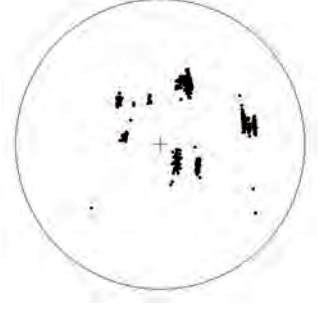
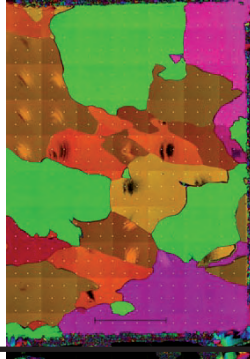
4316_30 (n=466)



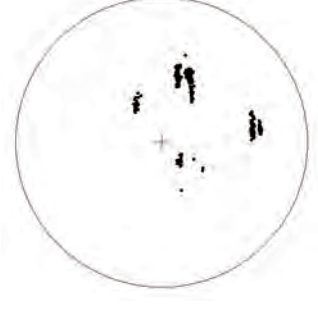
4316_40 (n=474)



4316_50 (n=461)

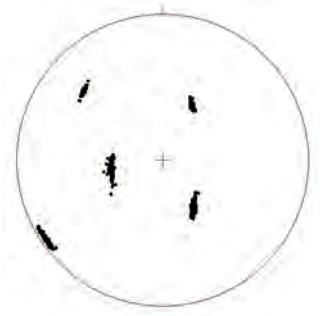


4316_60 (n=462)

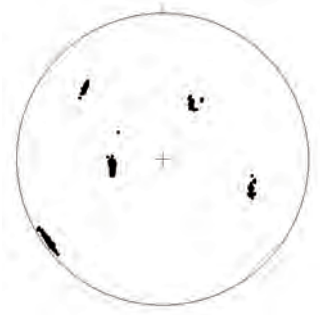
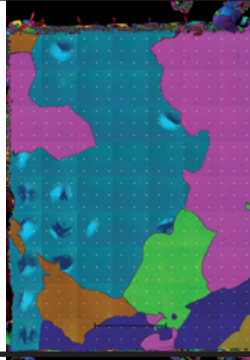




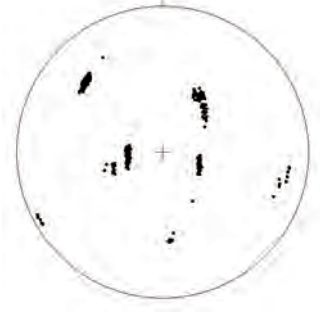
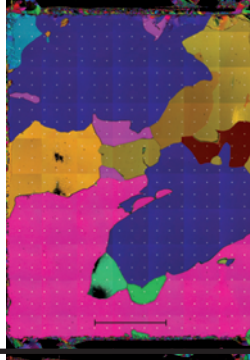
4356_10 (n=465)



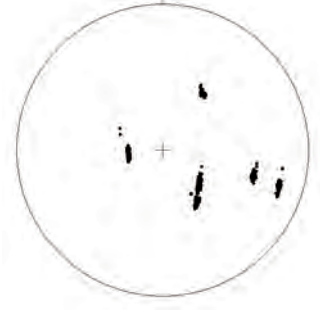
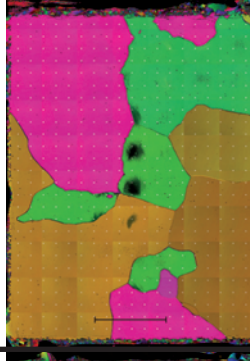
4356_20 (n=448)



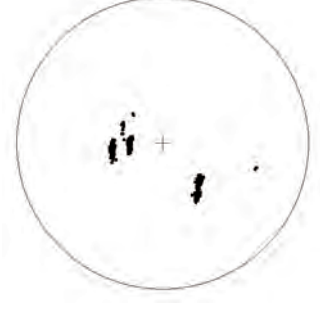
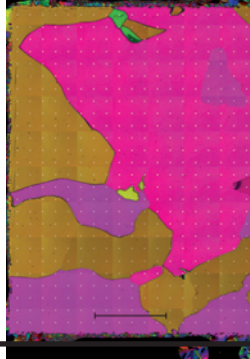
4356_30 (n=448)



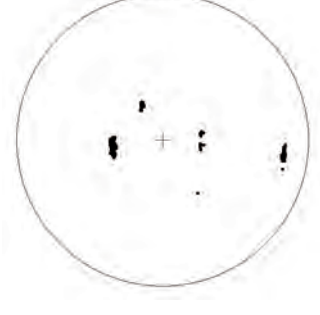
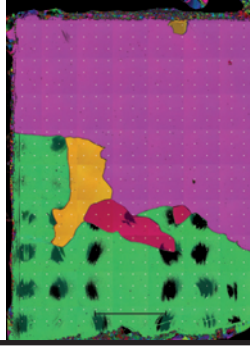
4356_40 (n=461)



4356_50 (n=445)

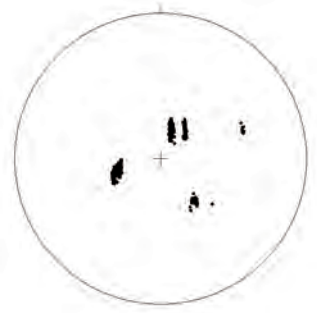
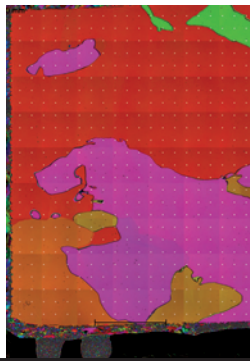


4356_60 (n=421)

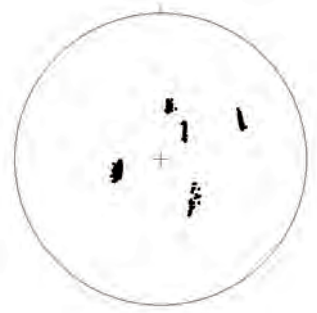
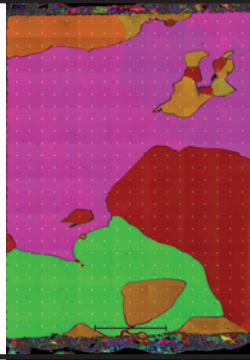




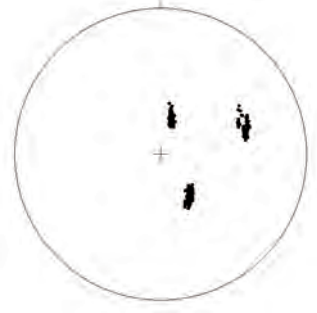
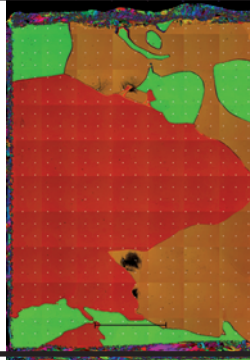
4397_10 (n=486)



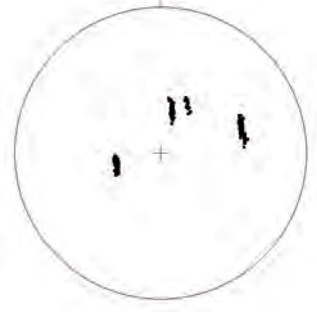
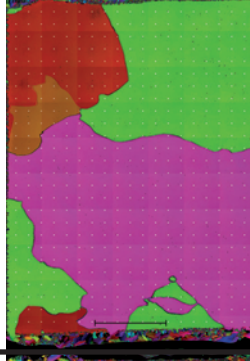
4397_20 (n=482)



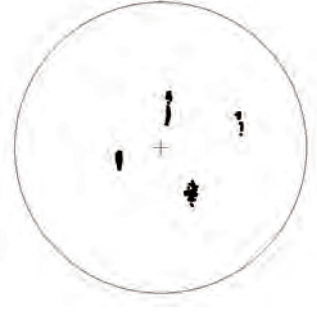
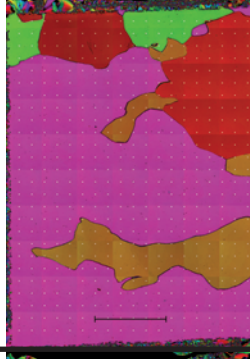
4397_30 (n=480)



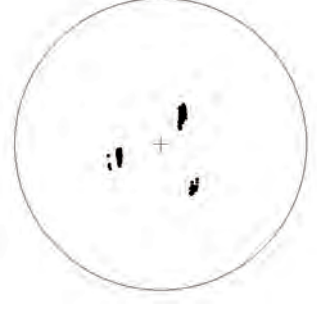
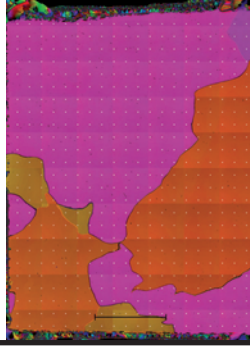
4397_40 (n=464)



4397_50 (n=482)

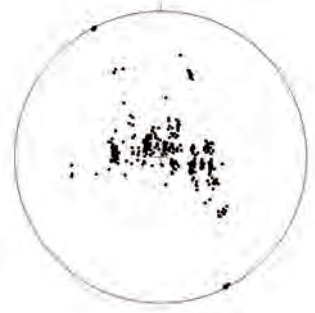
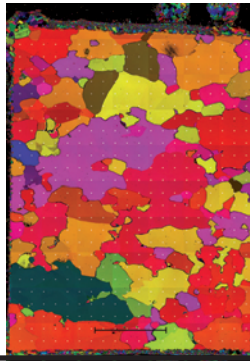


4397_60 (n=494)

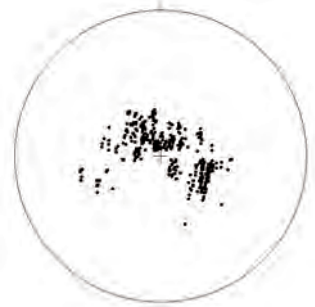
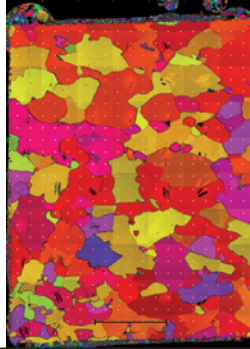




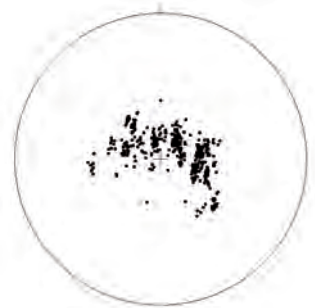
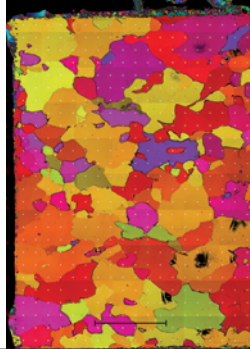
4442_10 (n=388)



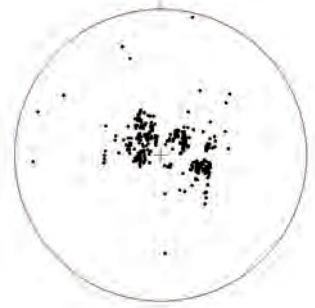
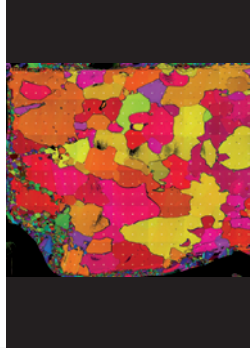
4442_20 (n=404)



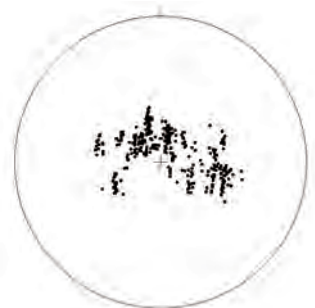
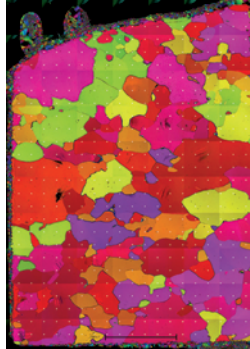
4442_30 (n=417)



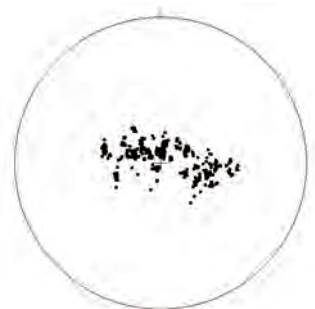
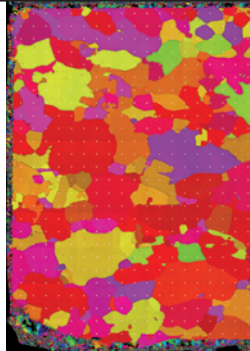
4442_40 (n=358)



4442_50 (n=345)

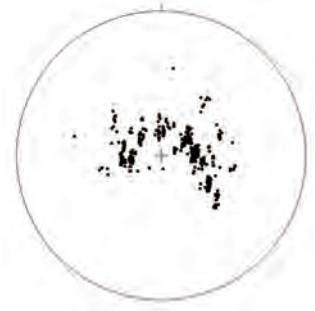
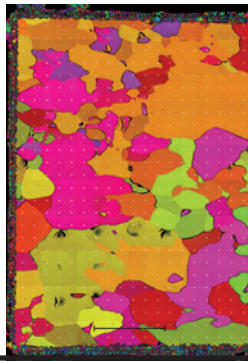


4442_60 (n=428)

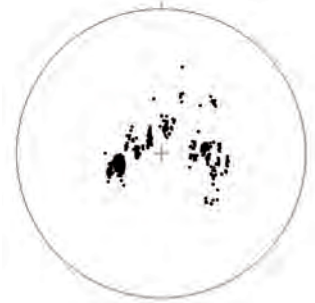
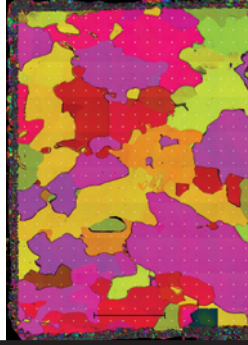




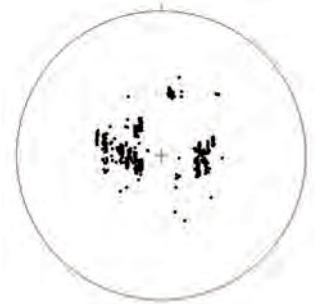
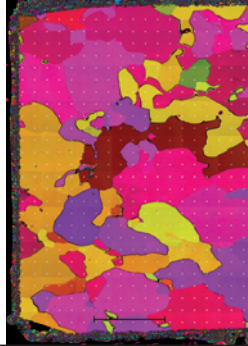
4476_10 (n=441)



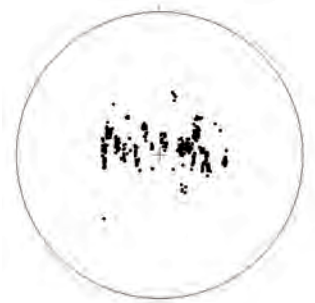
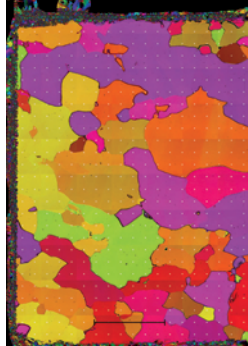
4476_20 (n=419)



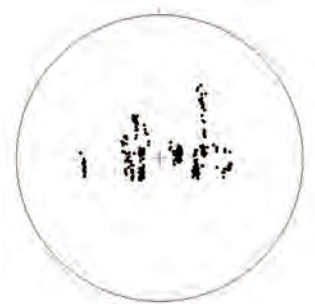
4476_30 (n=431)



4476_40 (n=432)

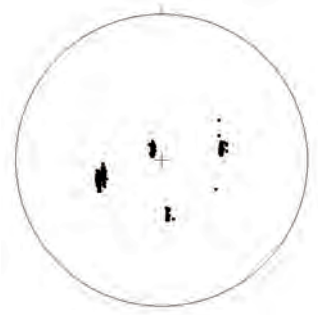


4476_60 (n=361)

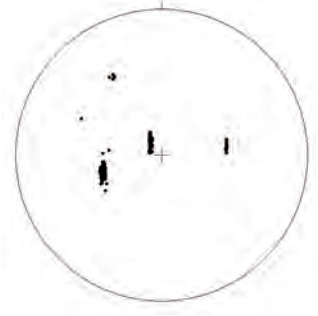




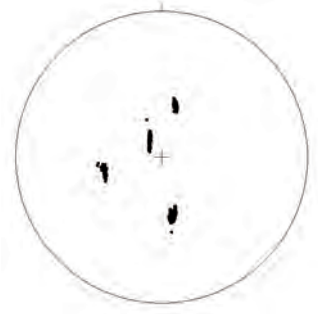
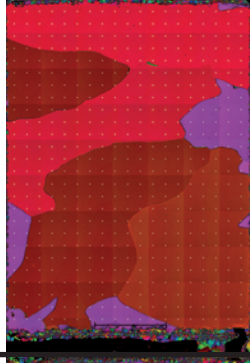
4514_10 (n=453)



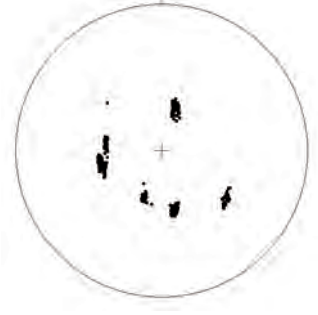
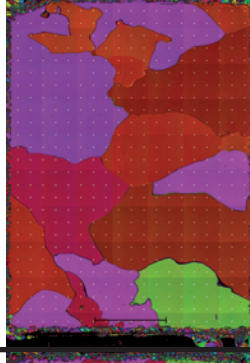
4514_20 (n=436)



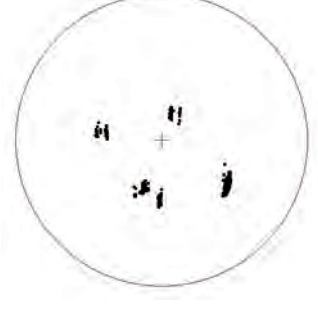
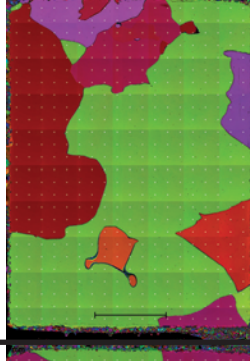
4514_30 (n=486)



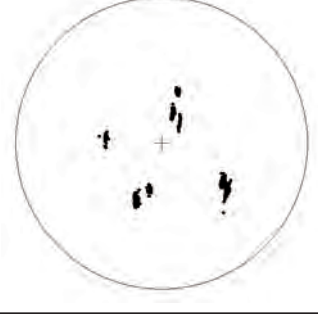
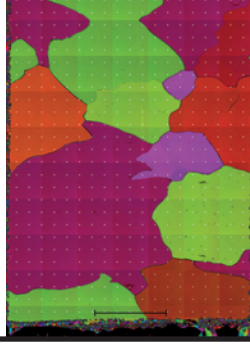
4514_40 (n=469)



4514_60 (n=480)

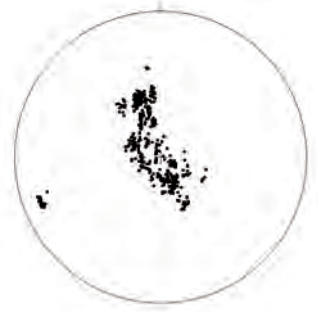
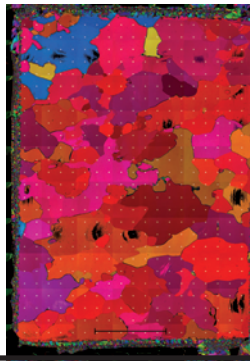


4514_60 (n=475)

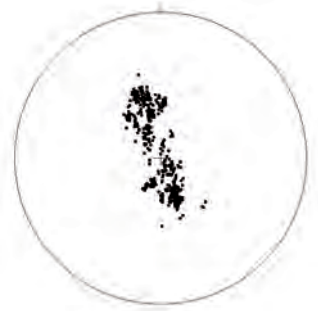
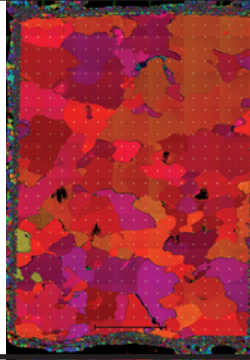




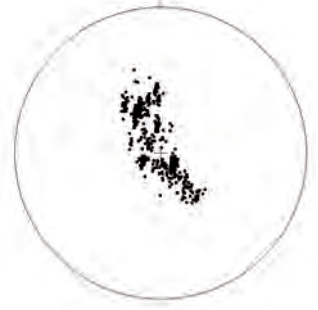
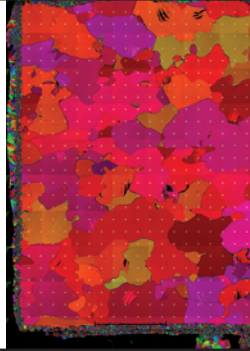
4556_10 (n=457)



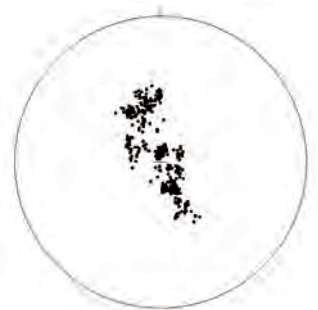
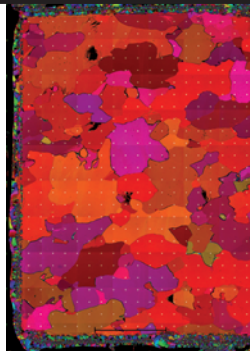
4556_20 (n=457)



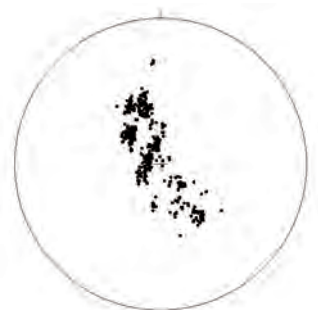
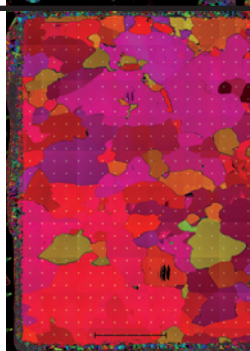
4556_30 (n=446)



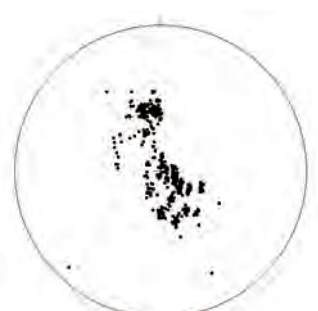
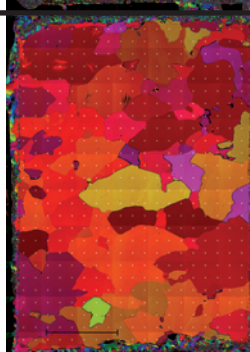
4556_40 (n=439)



4556_60 (n=451)

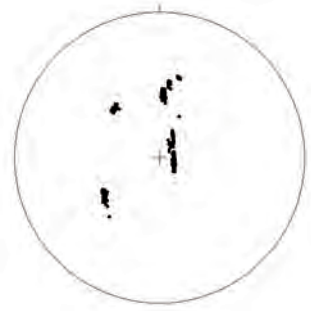
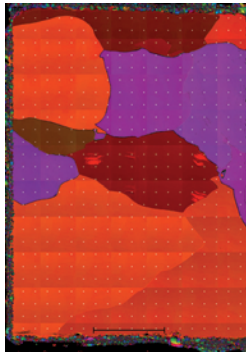


4556_60 (n=459)

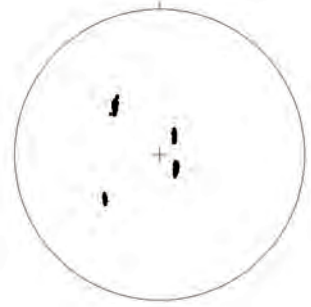




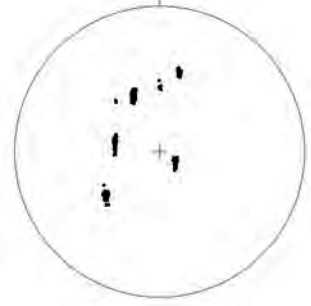
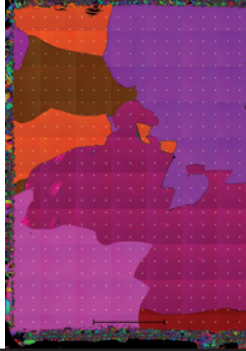
4606_10 (n=457)



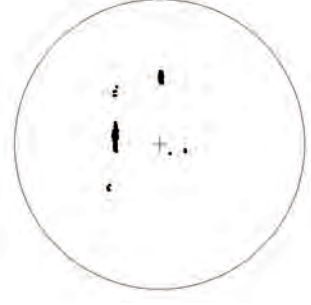
4606_20 (n=474)



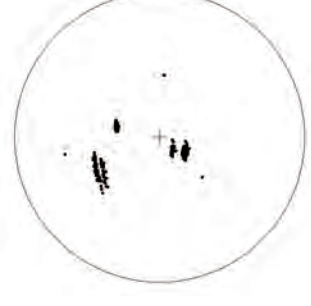
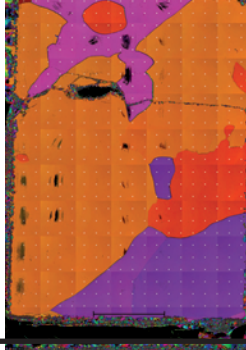
4606_30 (n=471)



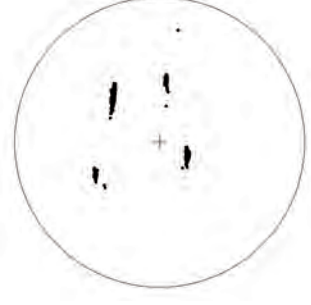
4606_40 (n=463)



4606_60 (n=462)



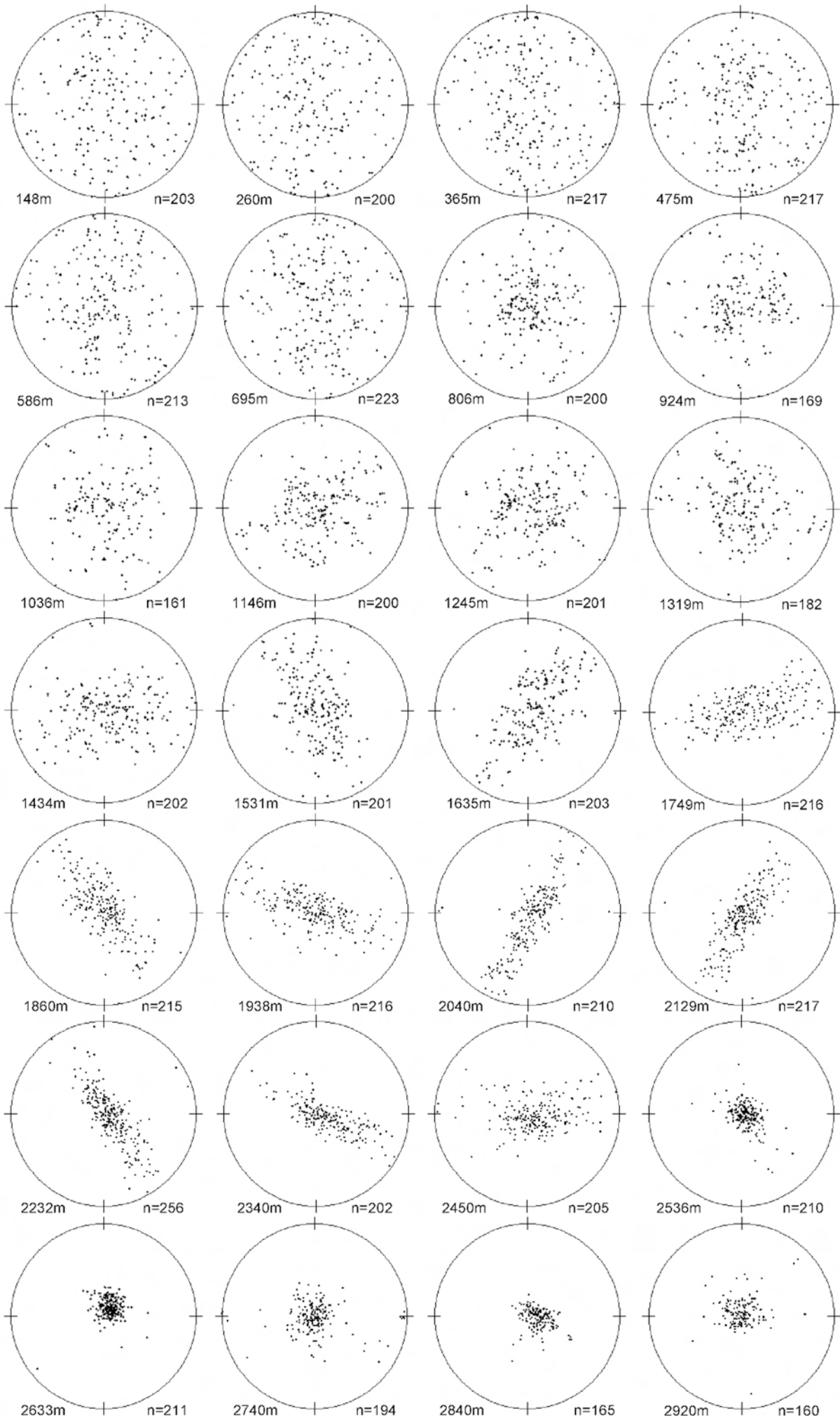
4606_60 (n=470)



9.4 Schmidt-Diagramme der NorthGRIP C-Achsenverteilungen

In diesem Abschnitt des Anhangs werden die Schmidt-Diagramme der NorthGRIP Bohrung von Wang et al. (2002) im Tiefenverlauf gezeigt.

Schmidt-Diagramme der NorthGRIP C-Achsenverteilungen



9.5 Poster: *Folds and other small scale microstructure variations in the NEEM ice core (Greenland)* (Weikusat, I. et al., 2011)

Folds and other small scale microstructure variations in the NEEM ice core (Greenland)

I. Weikusat (ika.weikusat@awi.de), J. Surma, S. Kipfstuhl, D. Samyn, A. Svensson, N. Azuma

AWI, Bremerhaven, Germany; University of Uppsala, Geocentrum, Sweden; Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, Denmark; Nagaoka University of Technology, Japan

Back ground

Drilling of the deep ice core NEEM (North Greenland Eemian Ice Drilling) in North-West Greenland (77.45°N 51.06°W) has reached the bed rock last year (Official NEEM website). As the name of the project indicates, the aim of the drilling was to retrieve an ice core through the last warm period (Eemian) resembling the Holocene. For the first time, it was possible to measure many parameters (chemical and physical) in the field, just after drilling. For example, microstructure and fabric data were obtained, as well as stable water isotopes (temperature proxy) and entrapped gases, which follow a certain sequence of peaks if their occurrence is caused by the global climate circulation system. First analyses of these measurements show that the record of the NEEM ice core is disturbed below ~2200 m depth, just where the first ice of Eemian oxygen isotopy signature occurs.

Introduction

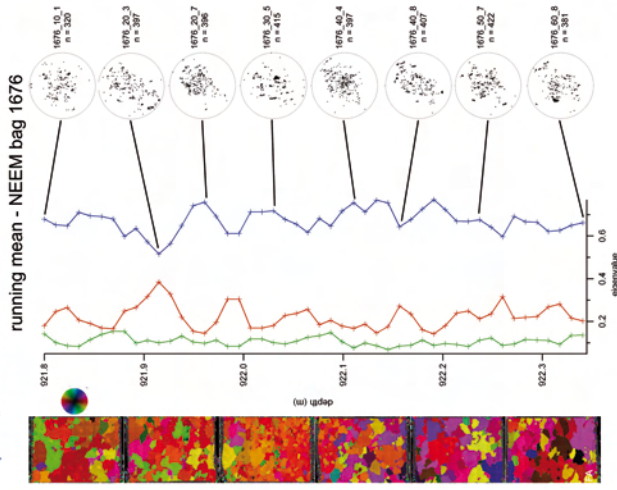
In order to validate and quantify features, which directly characterize disturbances of the stratigraphic layering, e.g. folding or faulting, the variation of microstructure in the disturbed, but as well in the presumably undisturbed part of the core has to be examined. In periodic depth intervals and additionally in depths of certain interest, surface etch features in light microscopy and c-axis orientations with an automated fabric analyser (FA; Russell-Head Instruments) were measured. The combination with visual stratigraphy (VS) allows the detailed analysis of the various structures regarding deformation and recrystallization processes and implications on ice flow history.

We present examples of variations in microstructure of probably undisturbed and disturbed regions to enhance our understanding on microstructure response to turbulent flow close to the bedrock of ice sheets.

References: Weikusat IKA, Surma J, Kipfstuhl S, et al. (2010) Russell-Head Instruments: NIW://www.niweheadinstruments.com/ Svensson et al. 2007. On the variability of fabric and microstructure in NorthGRIP glacial ice. *IPCR-2, Feb 2-8 2007, Sapporo.*

Small scale fabric variations

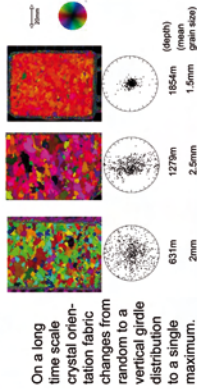
Example: „Shallow“ ice



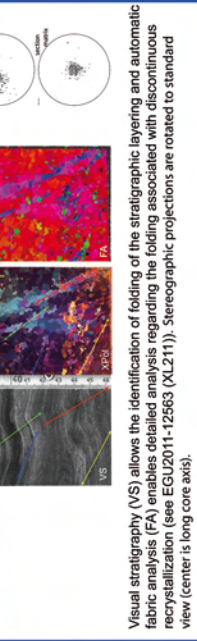
Eigenvalues for up to 500 grid points (area weighted data) in a 2 cm high window of FA data were calculated. The window is moved stepwise (1 cm) and overlapping along measurements of a whole bag (55 cm). Stereographic projections are rotated to standard view (center is long core axis).

The variability of c-axis orientation distributions on a high depth resolution is rather large, even in a presumably undisturbed part of the core (upper half of the ice thickness), as shown in this example from Holocene ice. This bag stems from the girdle fabric regime of the core, which is however not as pronounced as in e.g. NorthGRIP. In the example shown here, the variation indicates a fluctuation between a broad girdle and a disperse single maximum to random fabric.

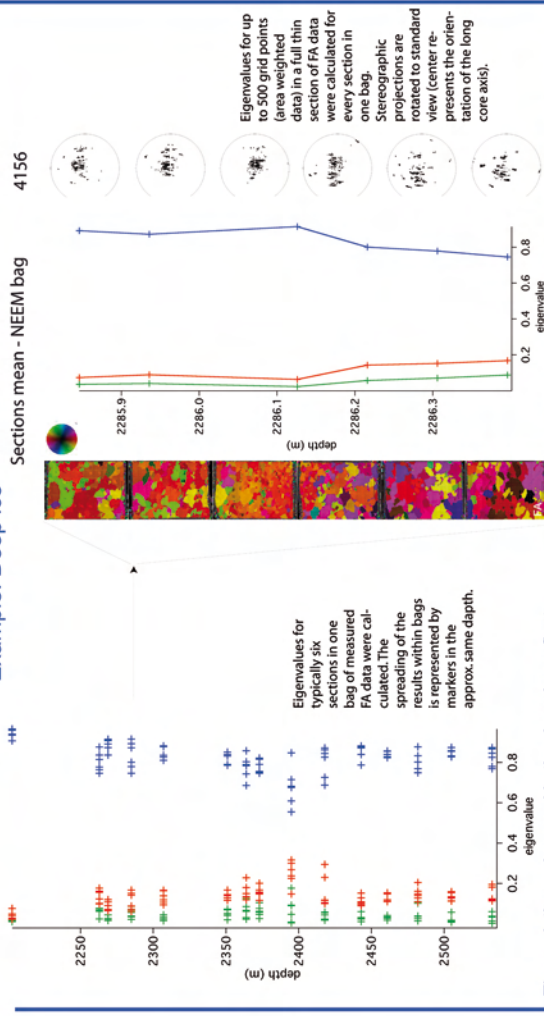
Fabrics overview



Folds



Example: Deep ice



The variations observed in the deep ice reflect fluctuations between single maximum fabrics, multiple maxima or „diamond“ or small circle girdle fabrics and elongated single maxima fabrics. These fluctuations can occur in very short depth intervals, even within bags (55cm).

Fabric variations are expected in the presumably disturbed part of the core. FA measurements of whole bags indeed support this. High depth resolution variability in fabrics have, however also, been attributed to the ice impurity content (Svensson EA, 2007).