

Computertomografie von Schnee und Eis

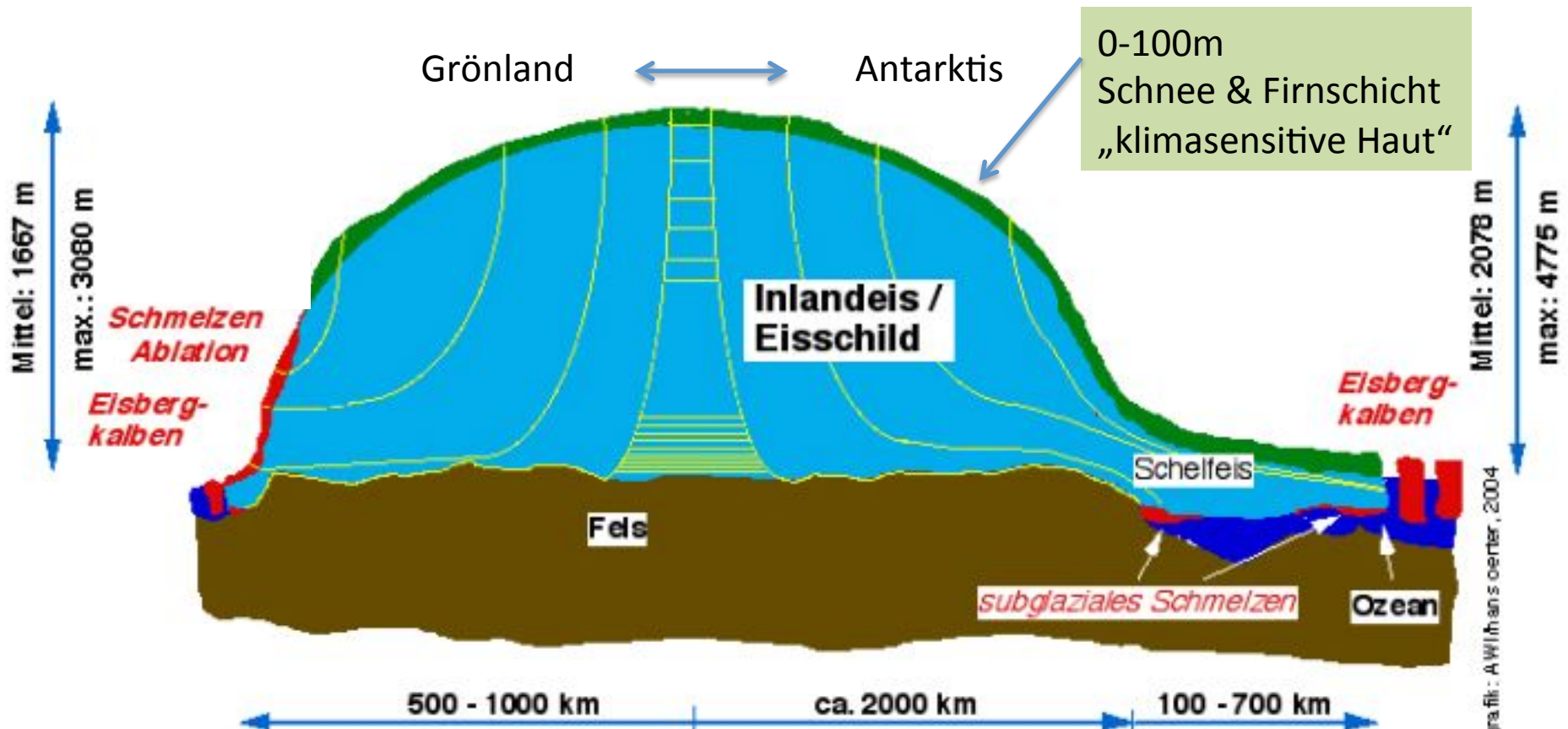


Johannes Freitag
Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für
Polar- und Meeresforschung

Motivation

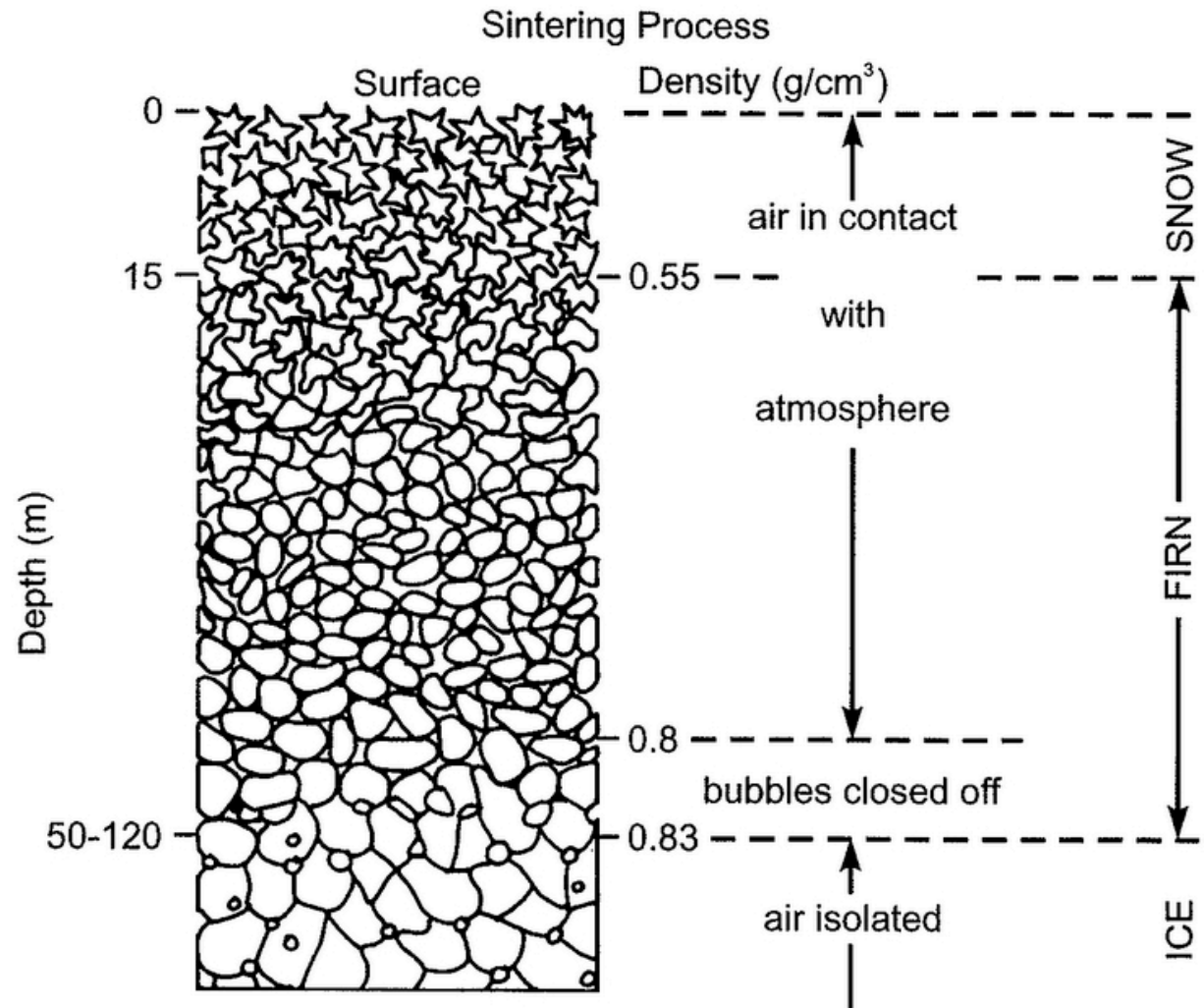
Polares Eis als Klimaarchiv

Monitoring der Eisschilde (Eisvolumen)



Leitfragen für die CT-Anwendung

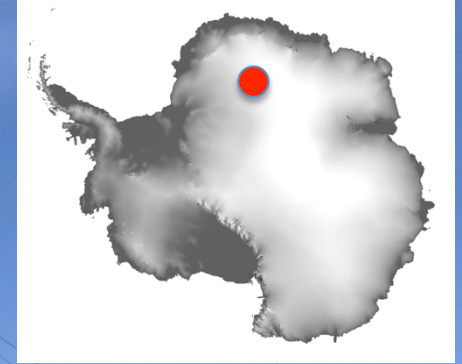
- Wie lässt sich die **Transformation von Schnee zu Eis** beschreiben?
Metamorphose und isothermale Drucksinterung, Verdichtung
- Wie funktioniert der **Lufteinschluss**?
Porenstrukturanalyse, Perkolation, Diffusion



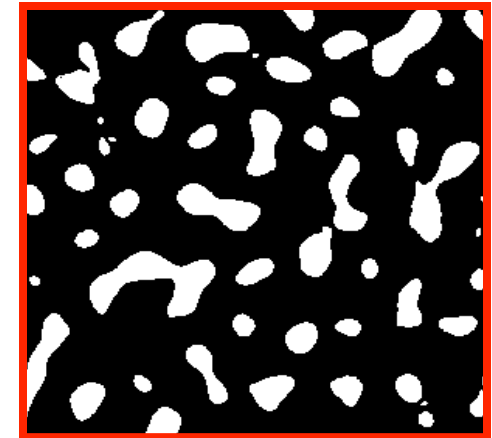
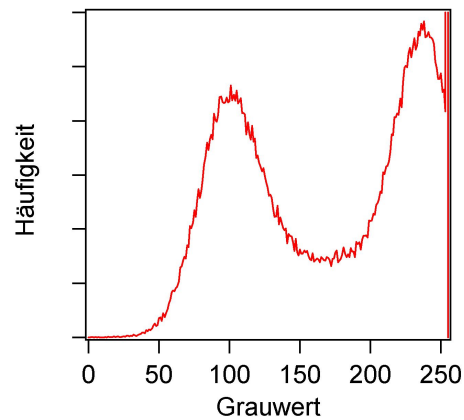
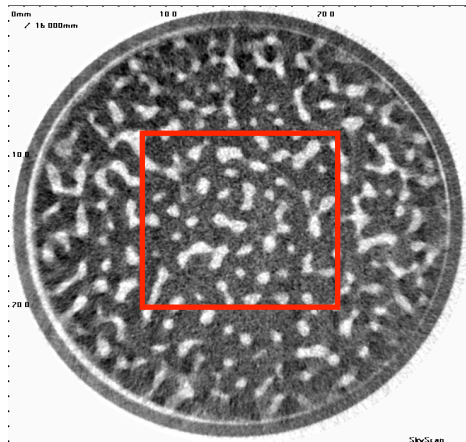
Gliederung

1. Methode (Probennahme & CT)
2. Drei Anwendungsbeispiele für CT
 - Verdichtung von Schnee zu Eis
 - Schneemetamorphose und Signalbildung
 - Lufteinschluss
3. Ausblick, aktuelle Fragen

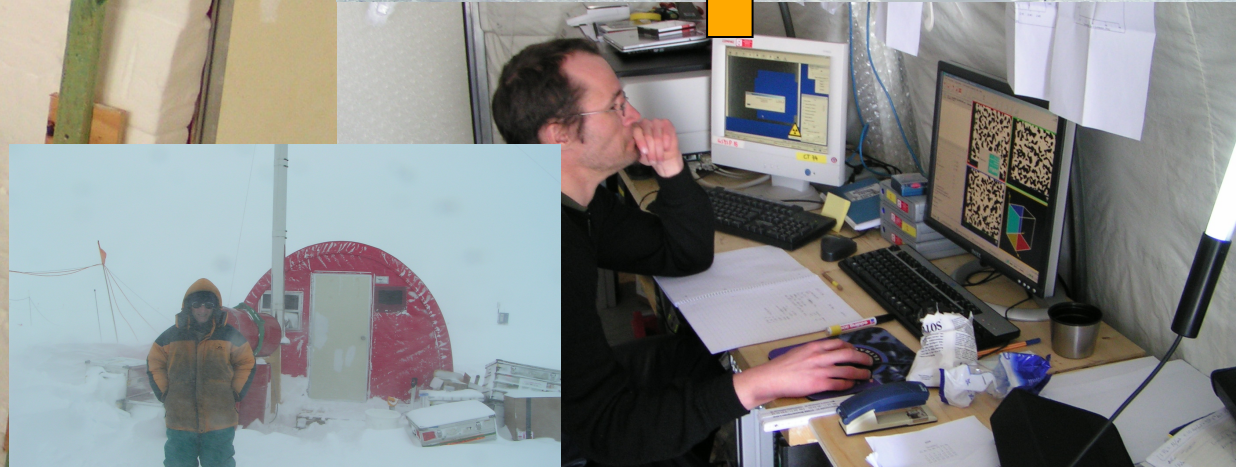
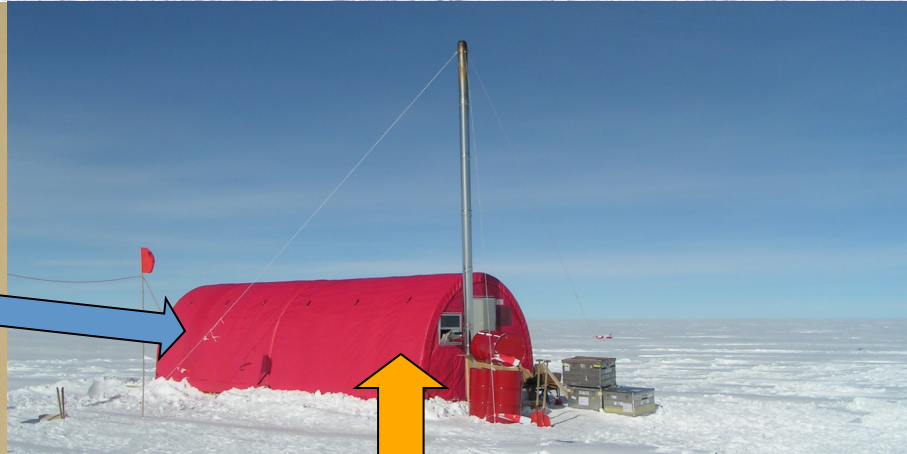
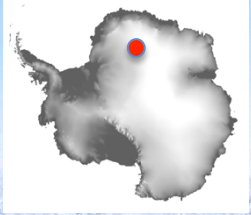
Probennahme im Feld



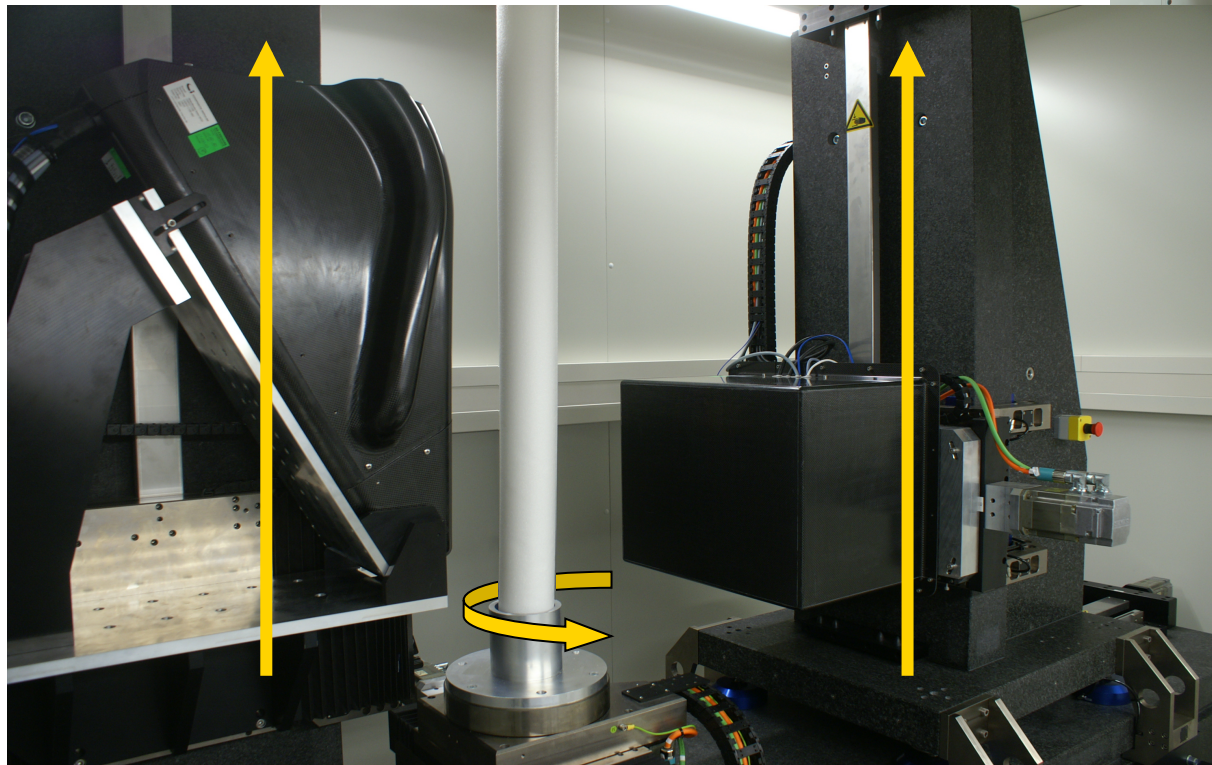
2001: Erstes CT im Kaltlabor (-15°C)



2006: Erstes CT im Feld (Kohnen station, Antarctica, -44°C)



2010: Erstes Kern-CT für Eisanwendungen



100 cm

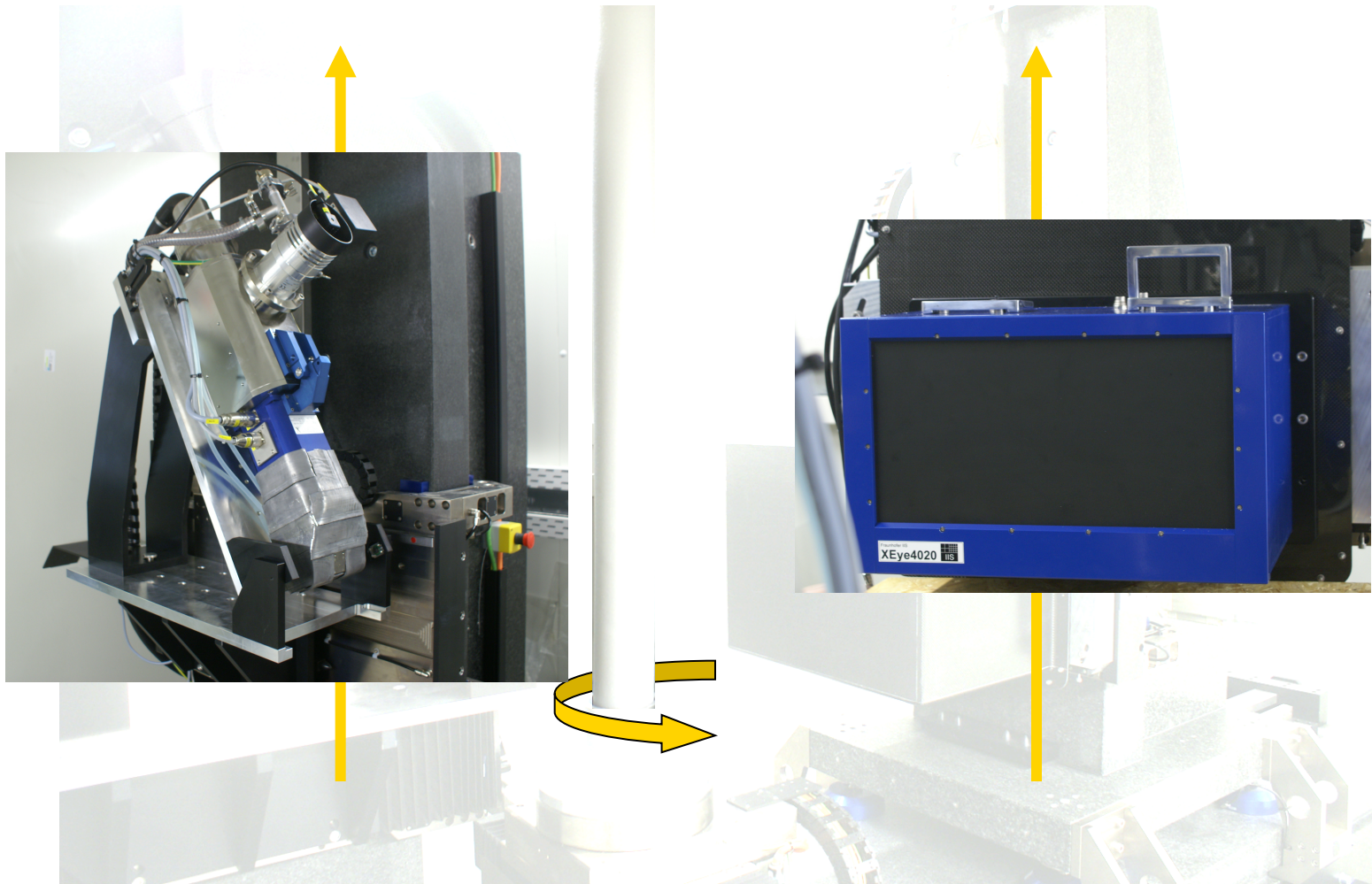
X-ray source

Ice core

Detector

Fraunhofer EZRT

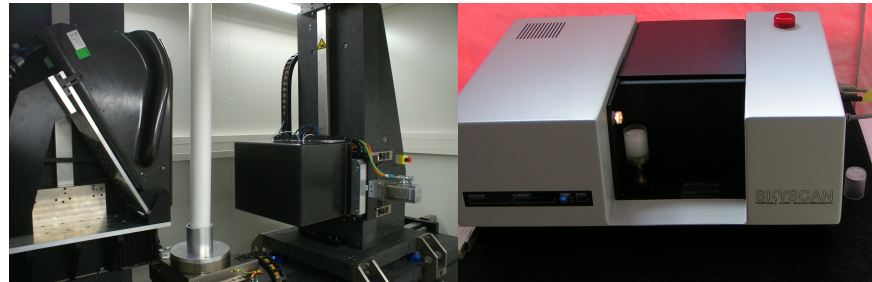
CT-Komponenten



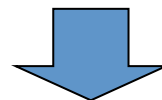
X-ray source

Detector

CT - Spezifikationen



	AWI-ICE-CT (2010)	SKYscan CT (2001)
X-ray source	40-225 kV	40 kV
Detector	8000 x 4000 pix	736 x 512 pix
Min. resolution	2 μm	40 μm
Max. sample size diameter	10 cm (13 μm)	2-3 cm
Max. sample size height	100 cm	2-3 cm



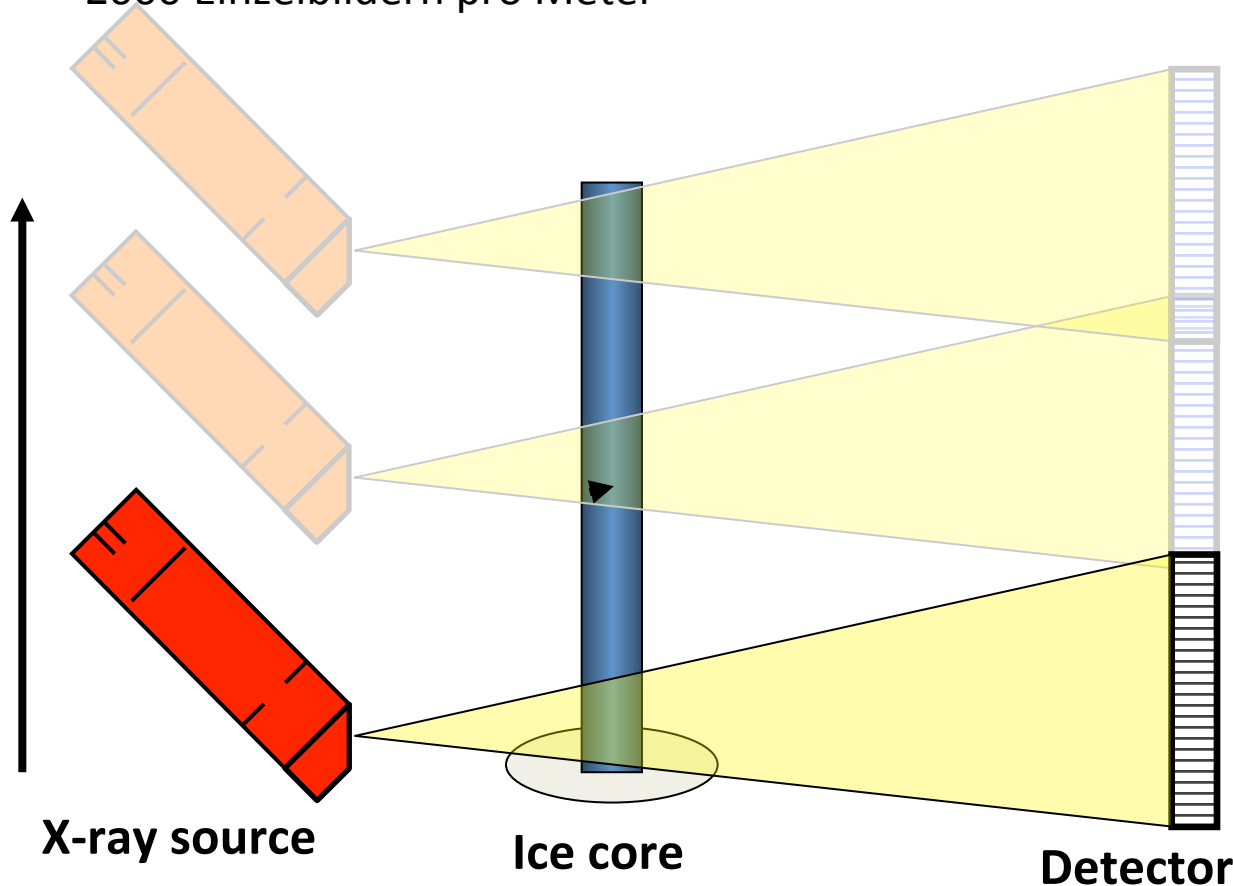
Representative volumes

1. Anwendungsbeispiel

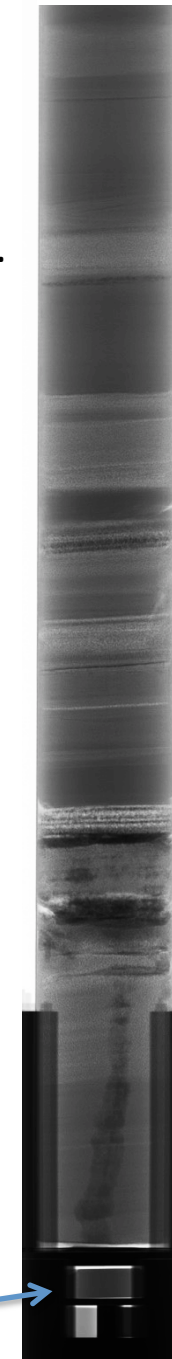
Verdichtung von Schnee zu Eis

AWI-ICE CT – Messvorschrift zur Dichtebestimmung (2D)

- Kontinuierliche Bildaufnahme während synchroner Aufwärtsbewegung von Röntgenquelle und Detektor bei ruhender Probe
- Gesamtbild des Eiskerns besteht aus den Zentralstrahllinien von ca. 2000 Einzelbildern pro Meter



Beispiel:
Ostgrönland
RECAP P4
Tiefen-
Intervall:
1-2m

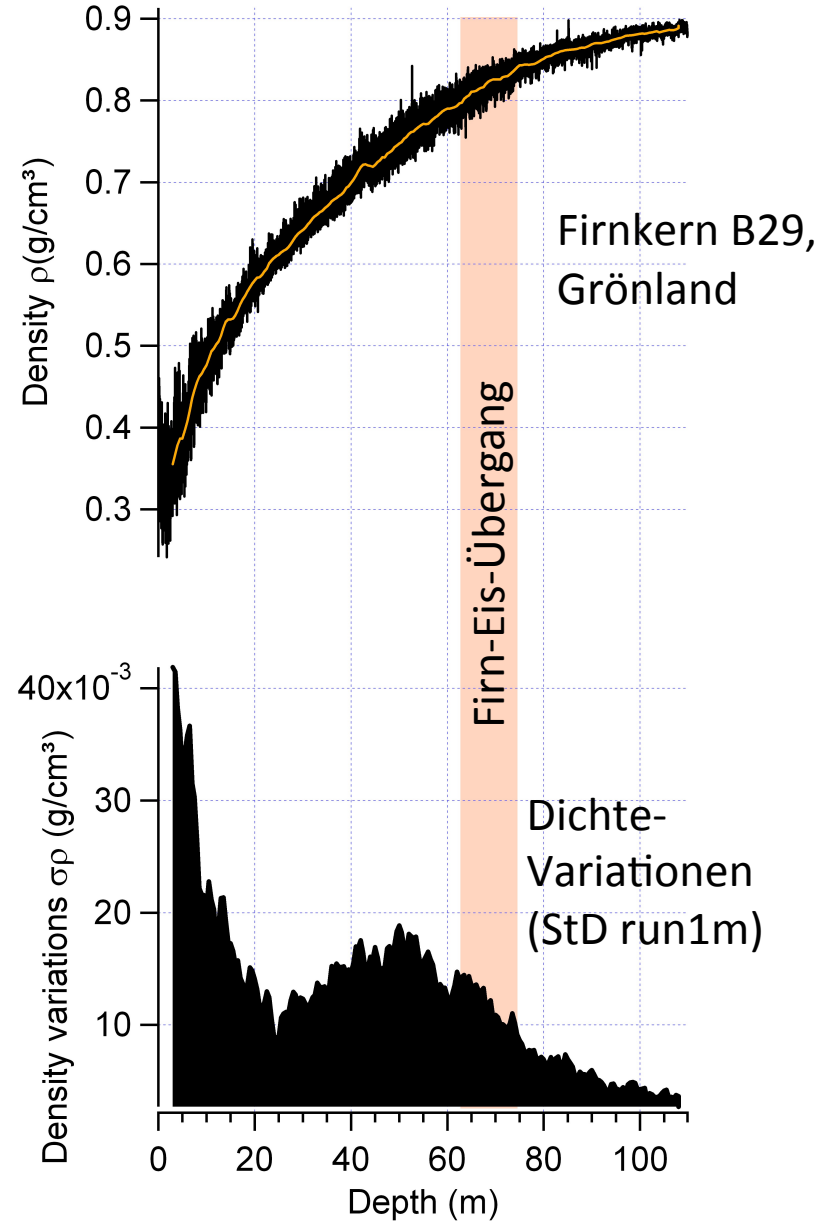
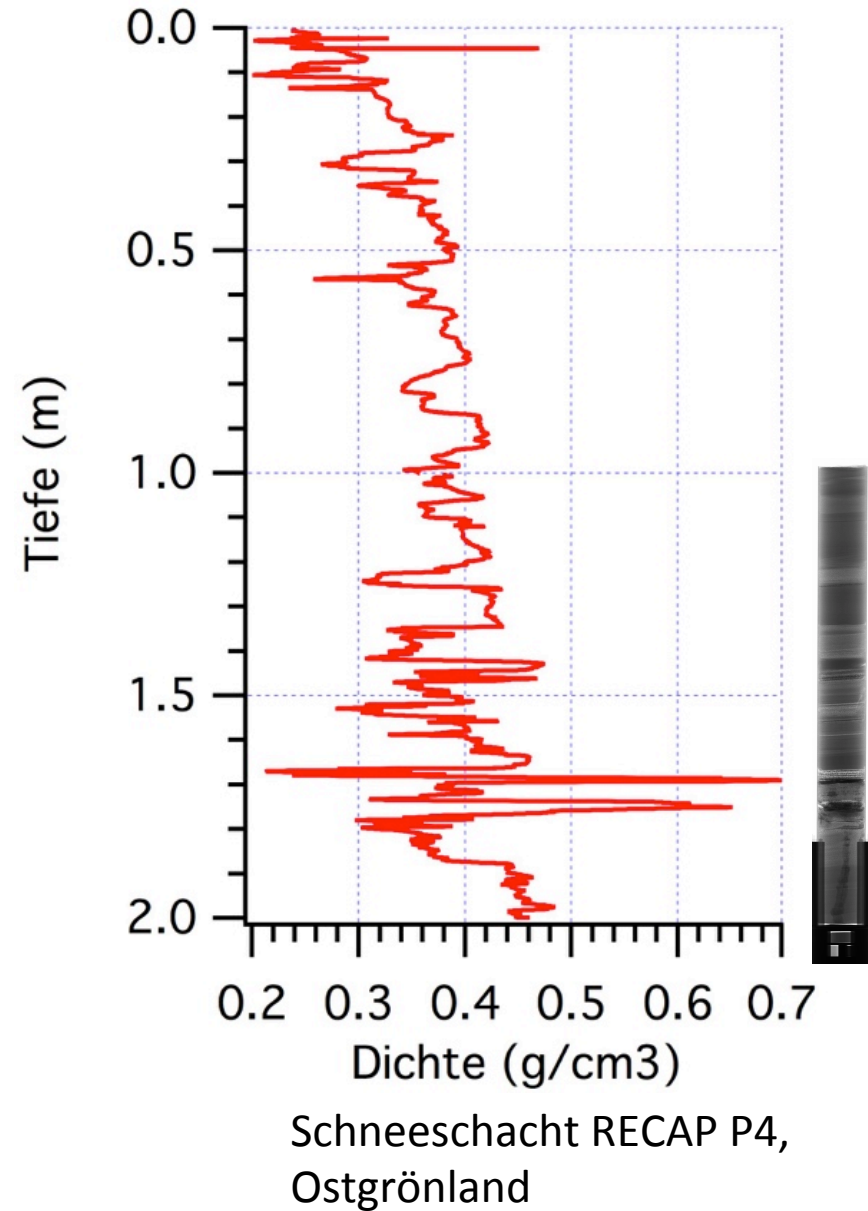


← gefrorenes
← Schmelz-
← wasser

- Dichtebestimmung aus Grauwertbild mit Hilfe von Kalibrierkurve (gleichzeitige Aufnahme von 3 Kalibriereinheiten)

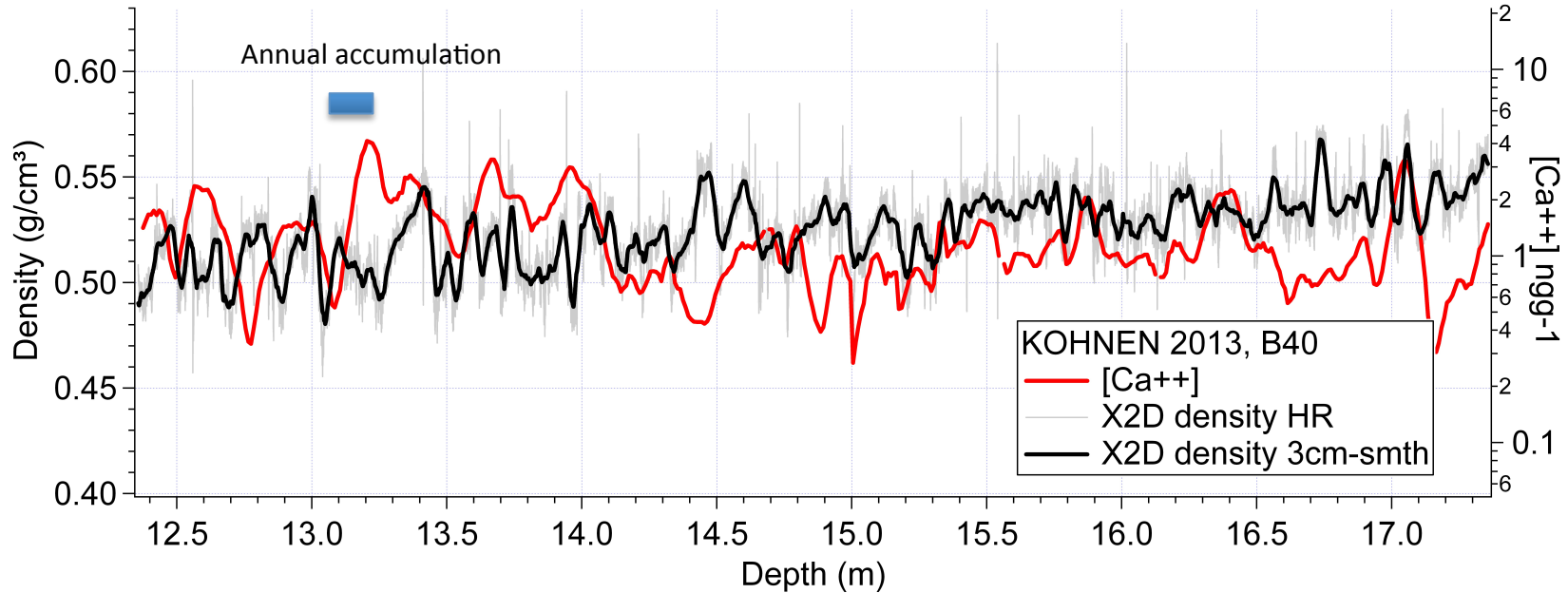
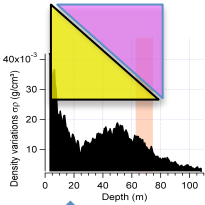


Dichteprofile von Schnee und Firnsäule

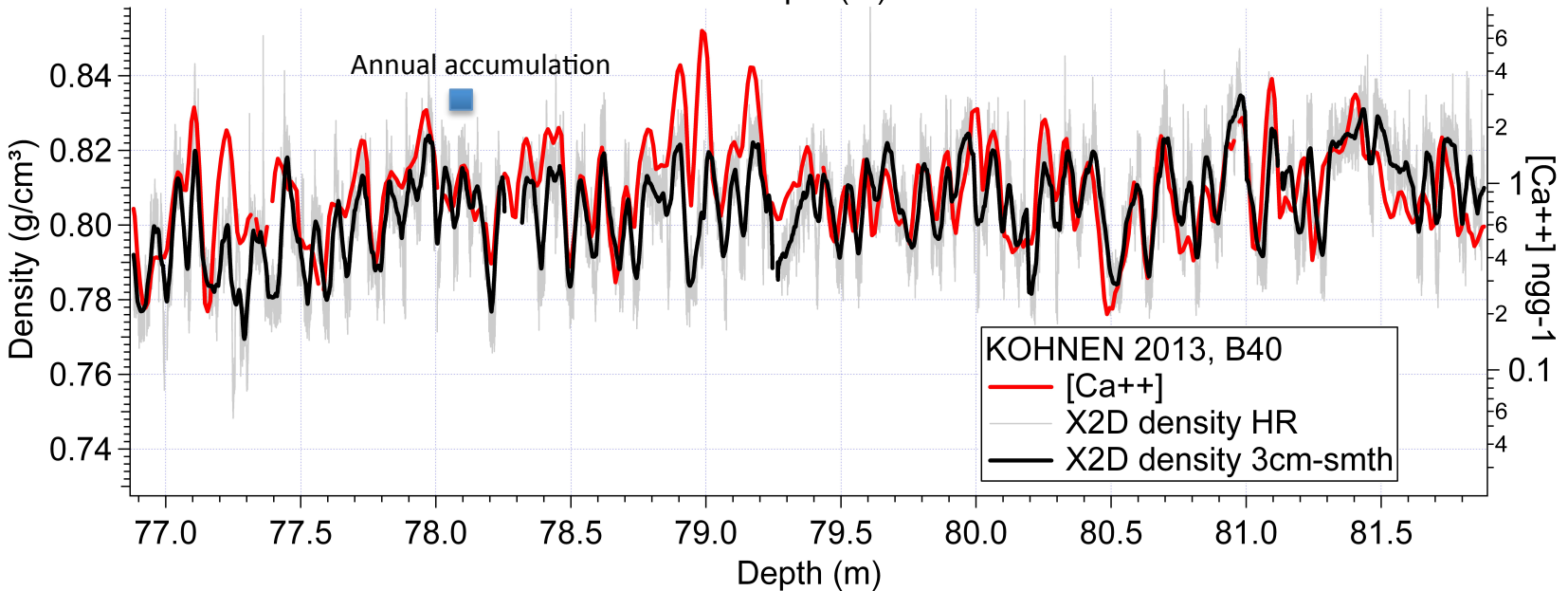
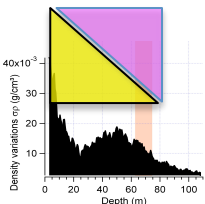


Synchronisation zwischen Dichte und [Ca⁺⁺] mit der Tiefe

Shallow
firn



Deep
firn

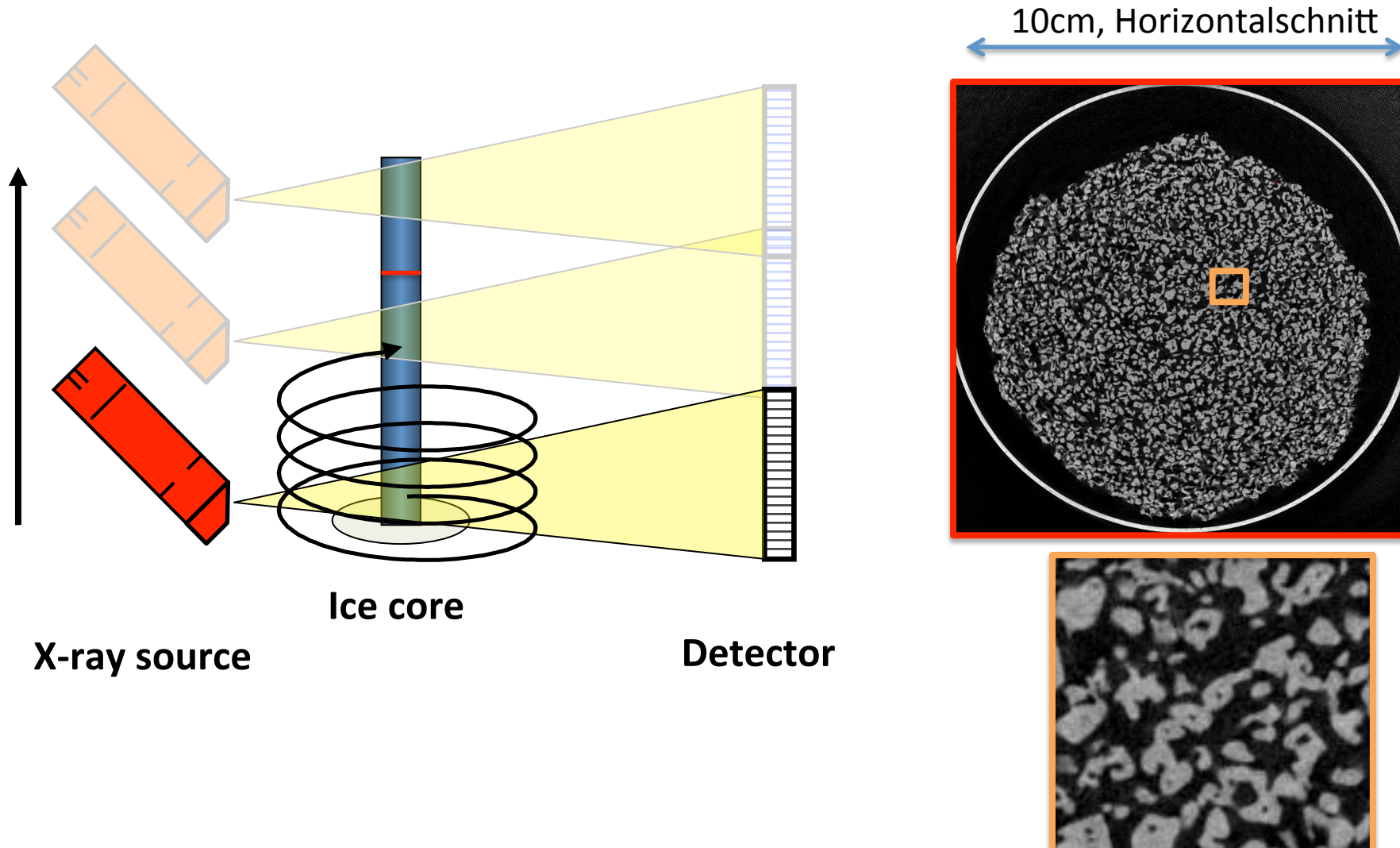


2. Anwendungsbeispiel

Schneemetamorphose und Signalbildung

AWI-ICE CT – Messvorschrift zur 3D-Volumenrekonstruktion

- Helixmethode: Kontinuierliches, synchrones vertikales Verfahren von Röntgenquelle und Detektor bei gleichzeitiger Rotation der Probe (Vertikales Verfahren um Strahlkegelhöhe nach 180° Drehung), ca. 3000 Projektionen pro Umdrehung



Bildverarbeitung von Volumendaten

Herausforderung: Erstellung von Profilen von Struktureigenschaften für große Datenvolumina (Tbyte, 25GByte-Pakete)

Segmentierung Eis/Luft

2-level Otsu-threshold: globaler 2-Level Schwellwert (Otsu) für „sichere“ Grauwerte(GW),
 $GW < GW_{Eis}$; $GW > GW_{Luft}$

Region-based segmentation: lokale Bewertung für kritisches Grauwertintervall
 $GW_{Eis} < GW < GW_{Luft}$

Bestimmung Struktureigenschaften (MAVI, TOOLIP; Fraunhofer ITWM)

Porosität (Dichte),

Interzeptlängen,

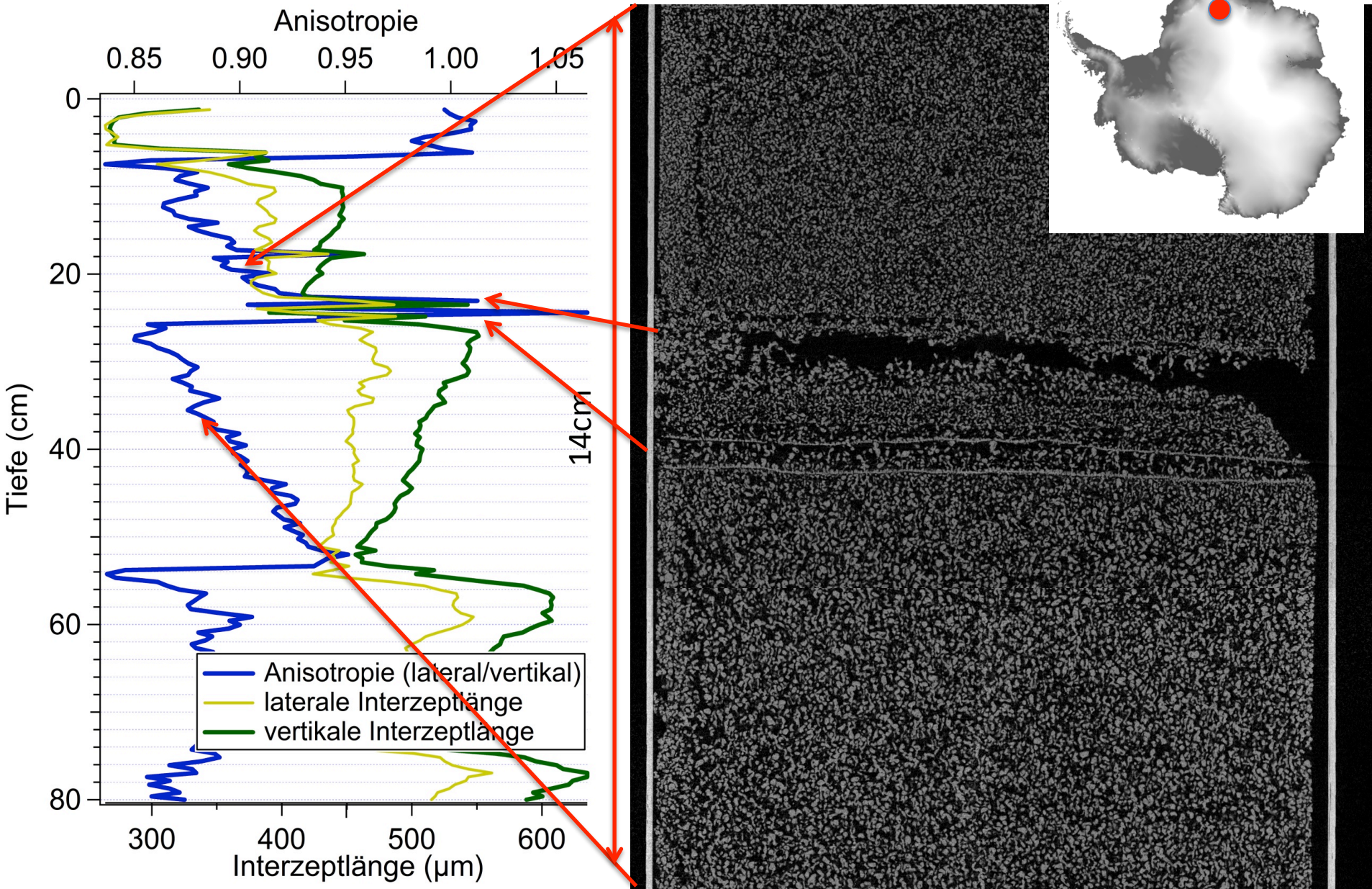
Spezifische Oberfläche,

Eulerzahl,

Objekt-labeling (Cluster),

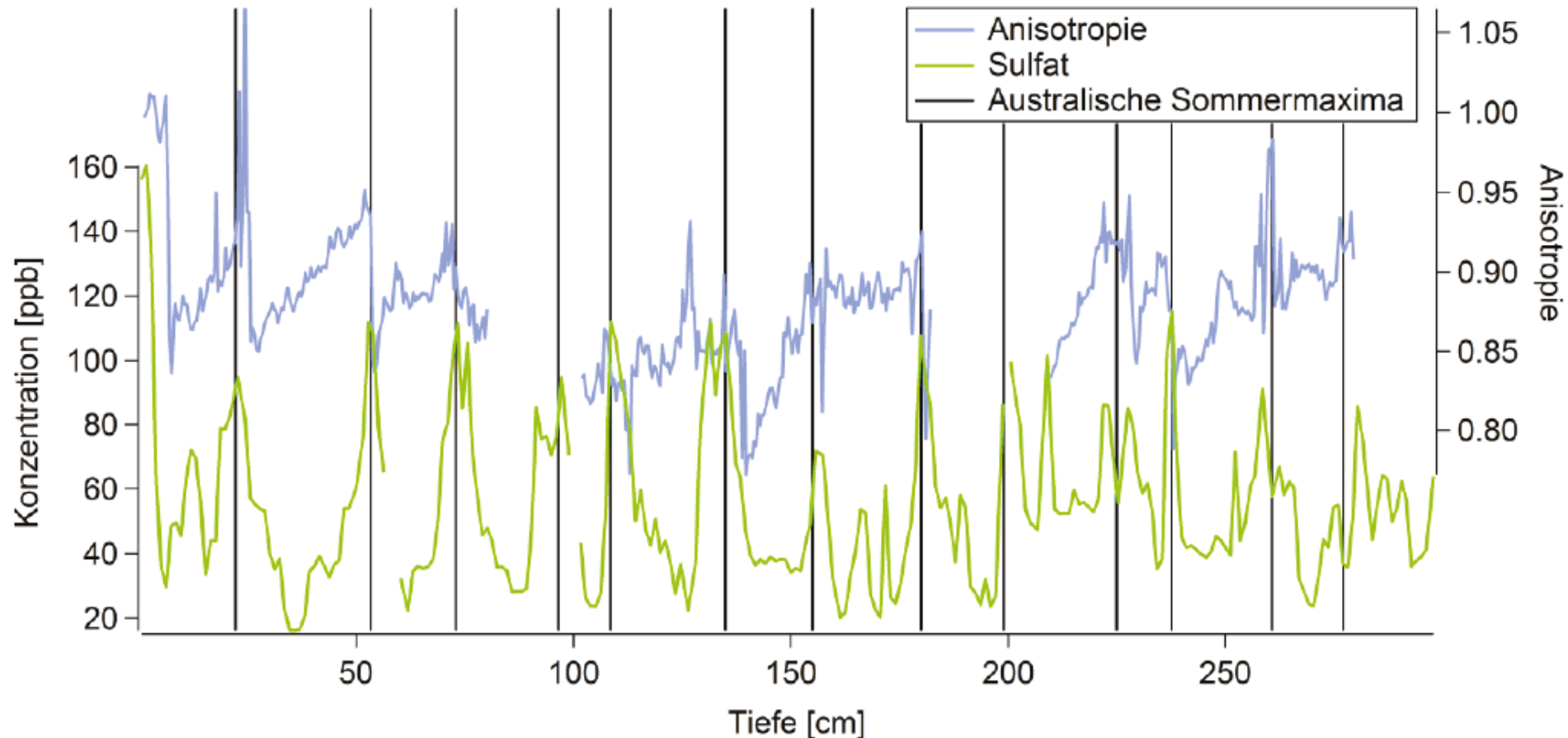
Strukturmodellindex,

Anisotropie:= (Interzeptlänge x + Interzeptlänge y)/Interzeptlänge Z



Schneestruktur, Schneeschacht KF10, Kohnenstation, Antarktis

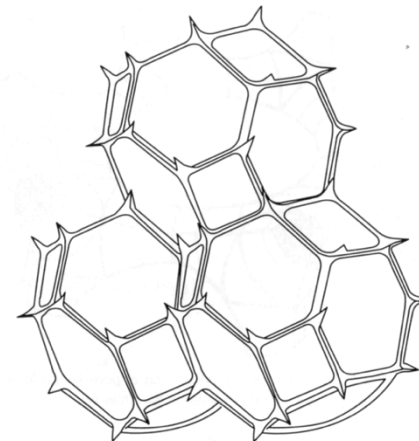
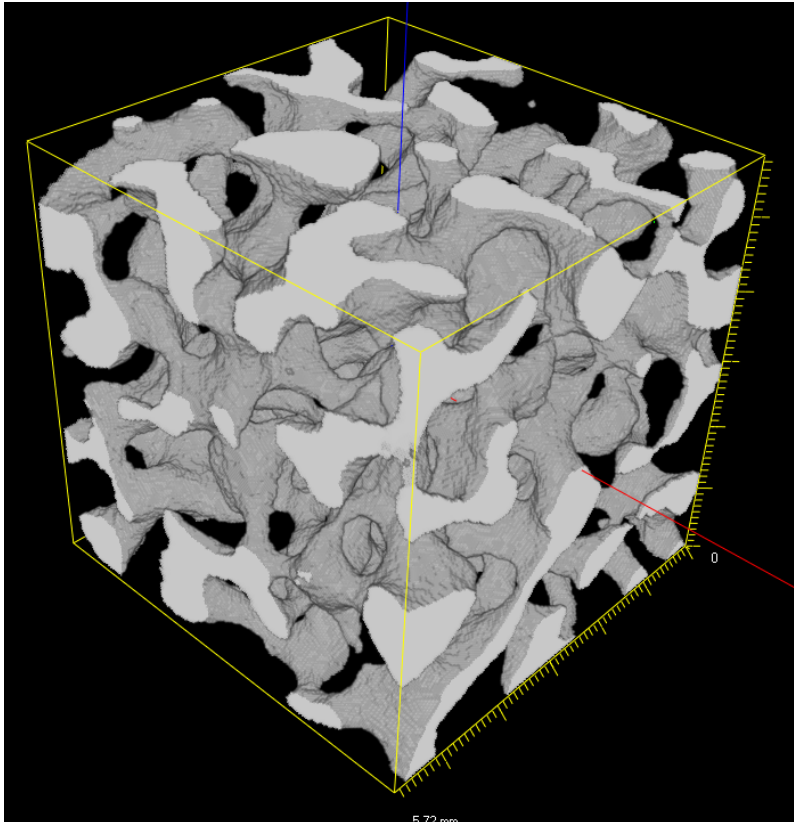
Zusammenhang zwischen Struktur- und Signalbildung



Schneeschart KF10-12, Kohnenstation, Antarktis

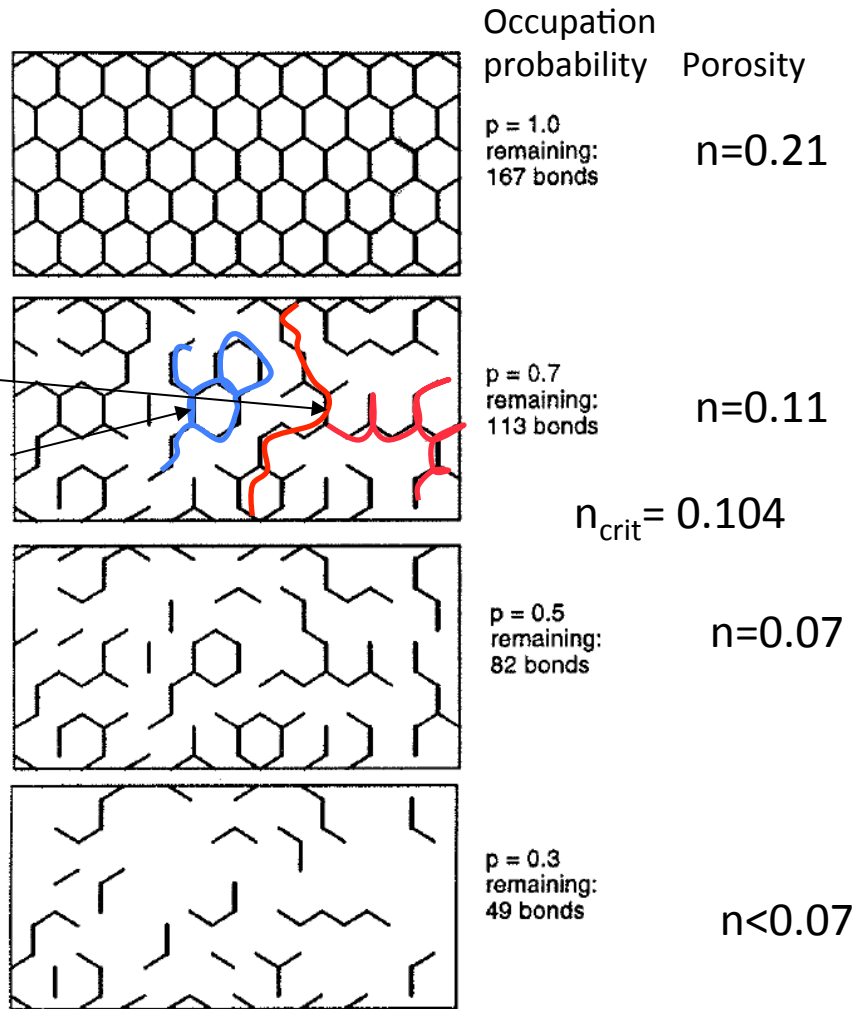
3. Anwendungsbeispiel

Lufteinschluss im Eis

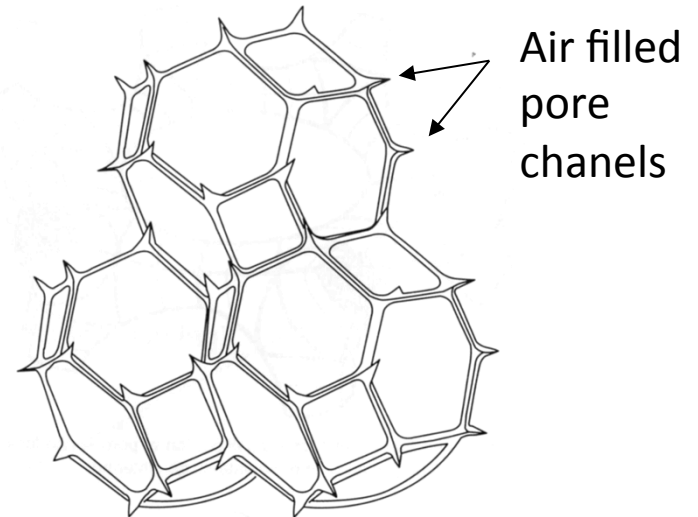


Model for sintered firn: network of tetraikadehedrons on a BCC-lattice

Gradueller Lufteinschluss: ein Perkulationsproblem



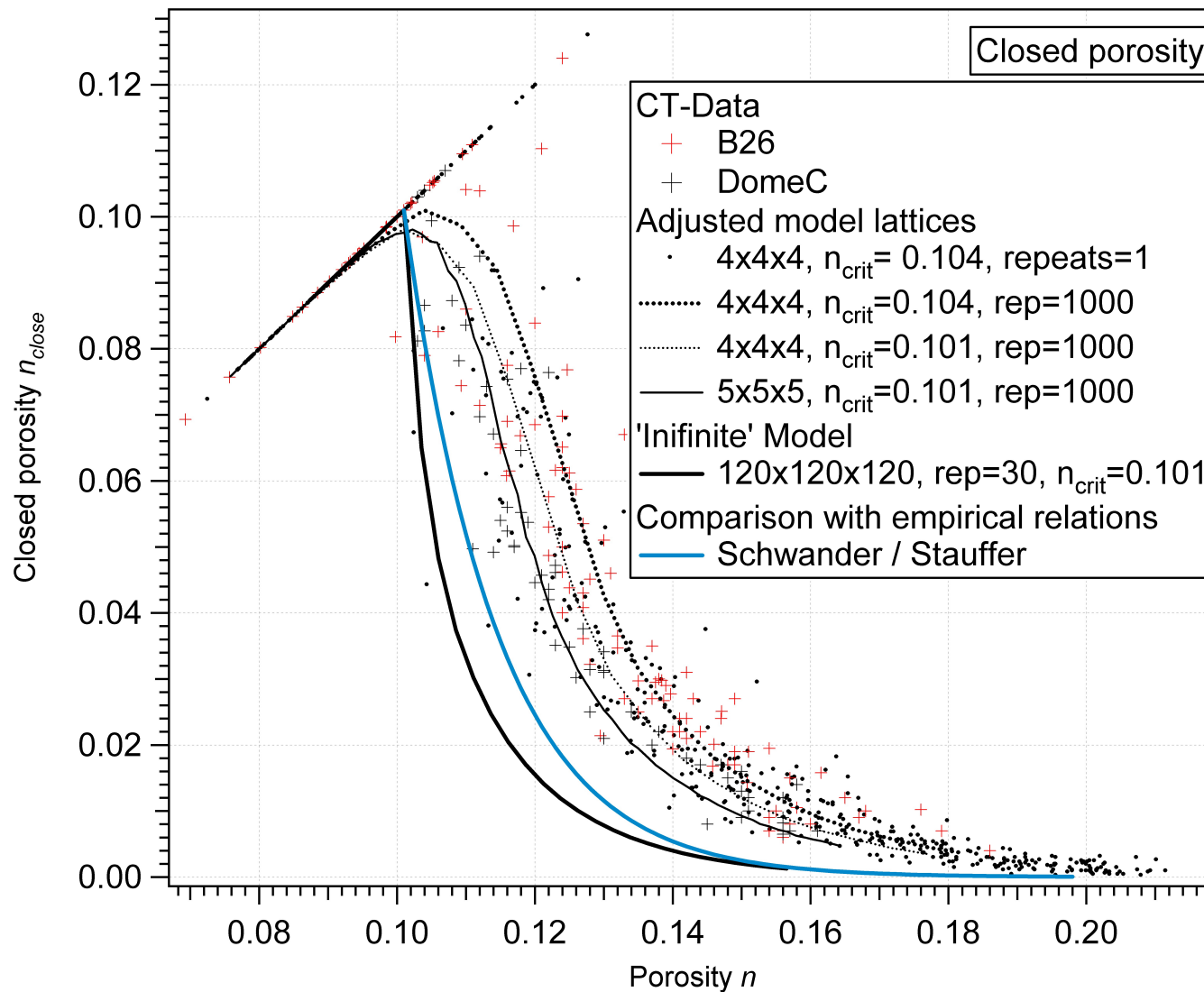
Open Pores
Closed pores



Model for sintered firn:
Network of
Tetraikadehedrons on a
BCC-Lattice

(Stauffer et al. 1985 / 1995)

Geschlossene Porosität: Modell versus Daten



Konnektivität des Luftporenraumes im Firn

$$\text{Euler number } E := B - L + H \quad (1)$$

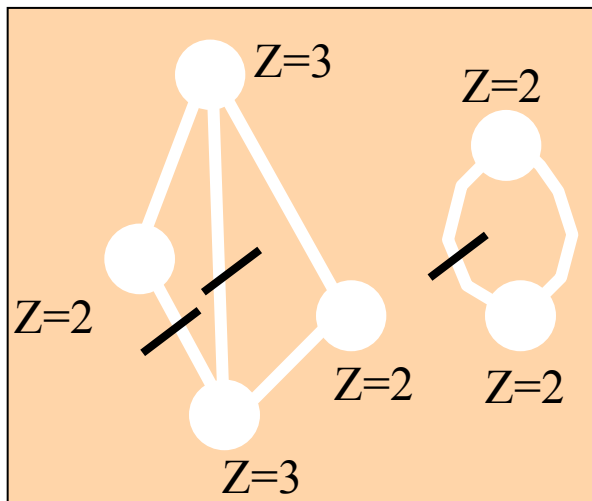
$$\text{Coordination number } \bar{Z} = \frac{2(B_p - E)}{B_p} \quad (2)$$

B : Isolated objects

L : Loops

H : Holes

B_p : Potential objects



$$B = 2$$

$$L = 3$$

$$H = 0$$

(1)

$$\Rightarrow E = B - L = 2 - 3 = -1$$

$$\bar{Z} = \frac{(2 + 2 + 2 + 2 + 3 + 3)}{6} = 2.33$$

(1,2)

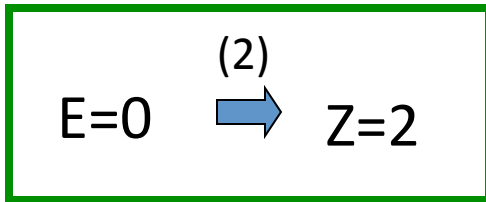
$$B_p = 6$$



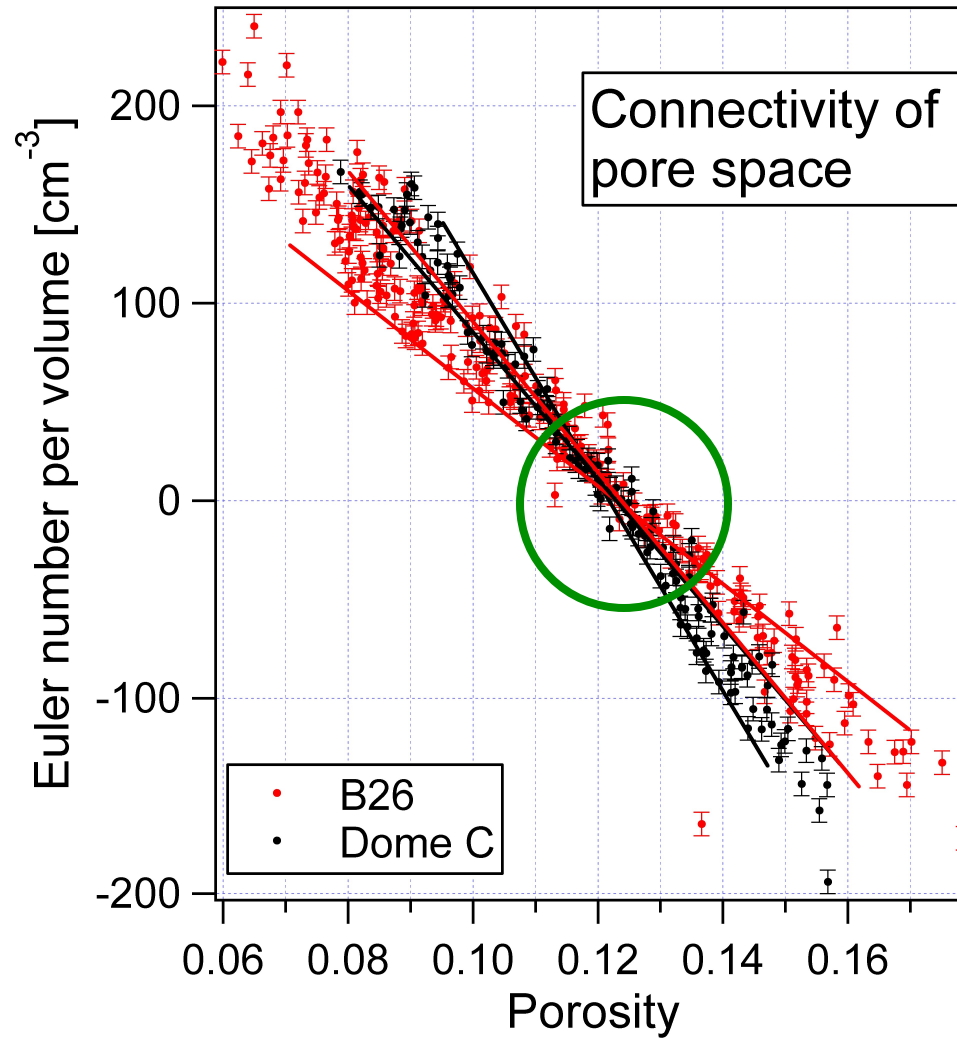
$$\bar{Z} = \frac{2(6 - (-1))}{6} = 2.33$$

Konnektivität des Luftporenraumes im Firn

$E \sim B$ (\sim bubble density)

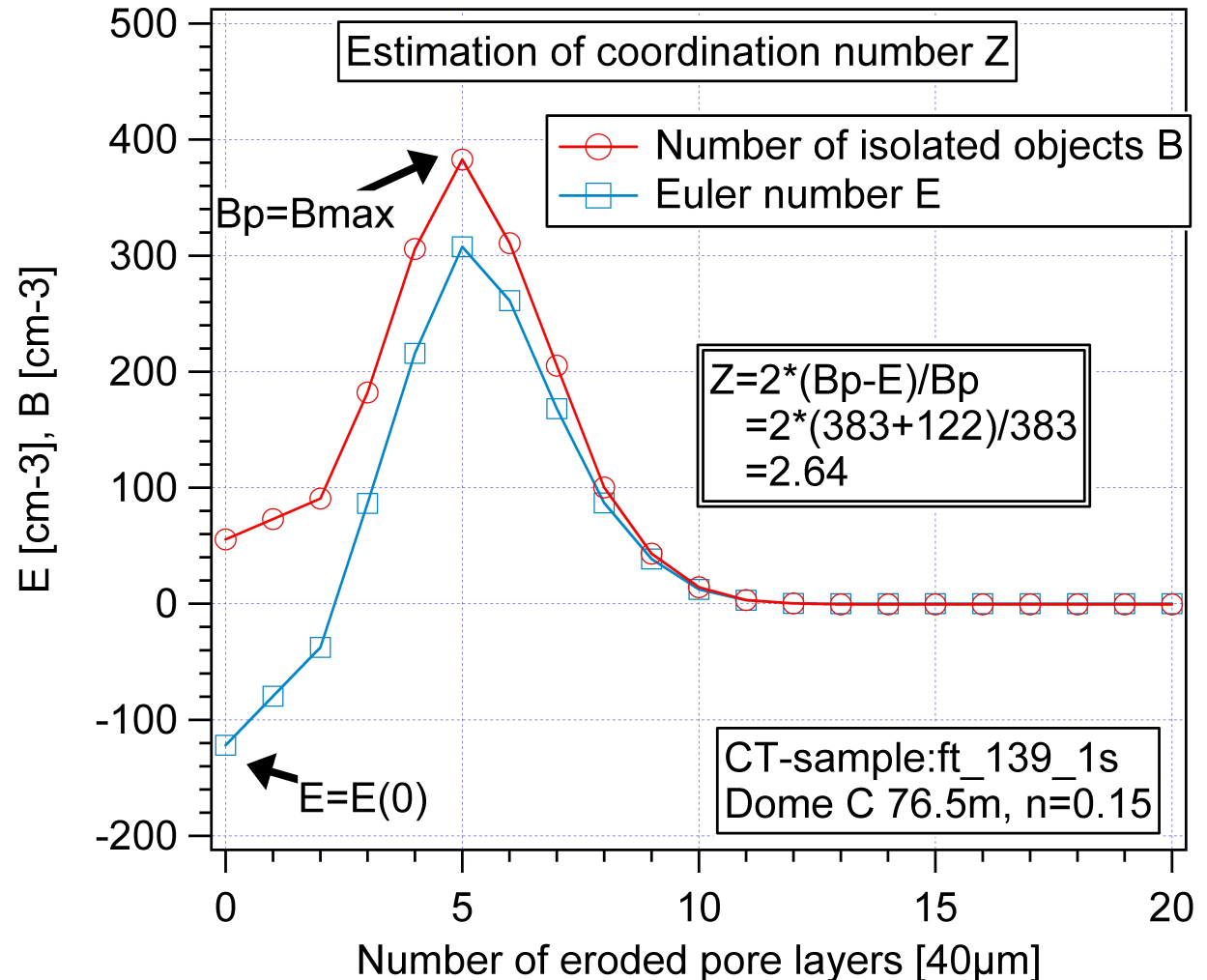
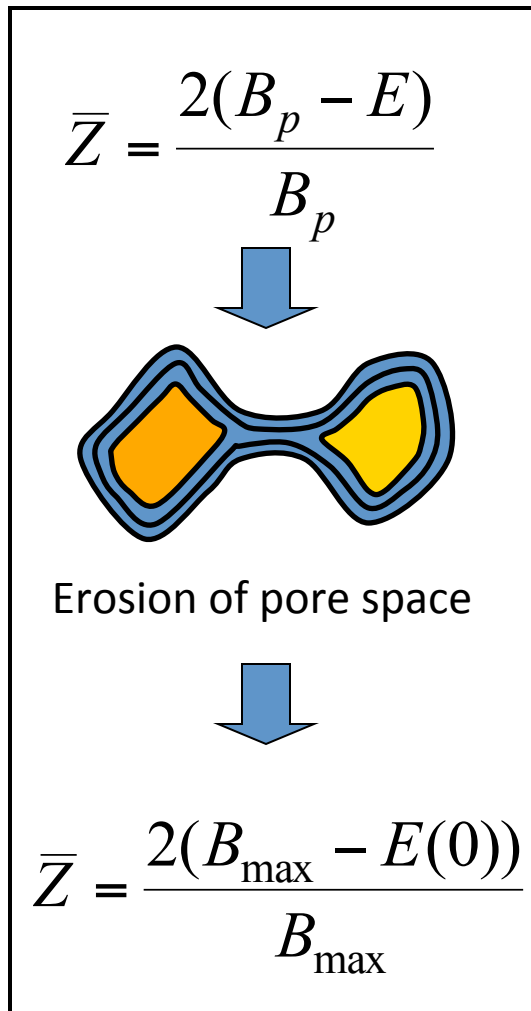


$E \sim L$ (\sim Loops)

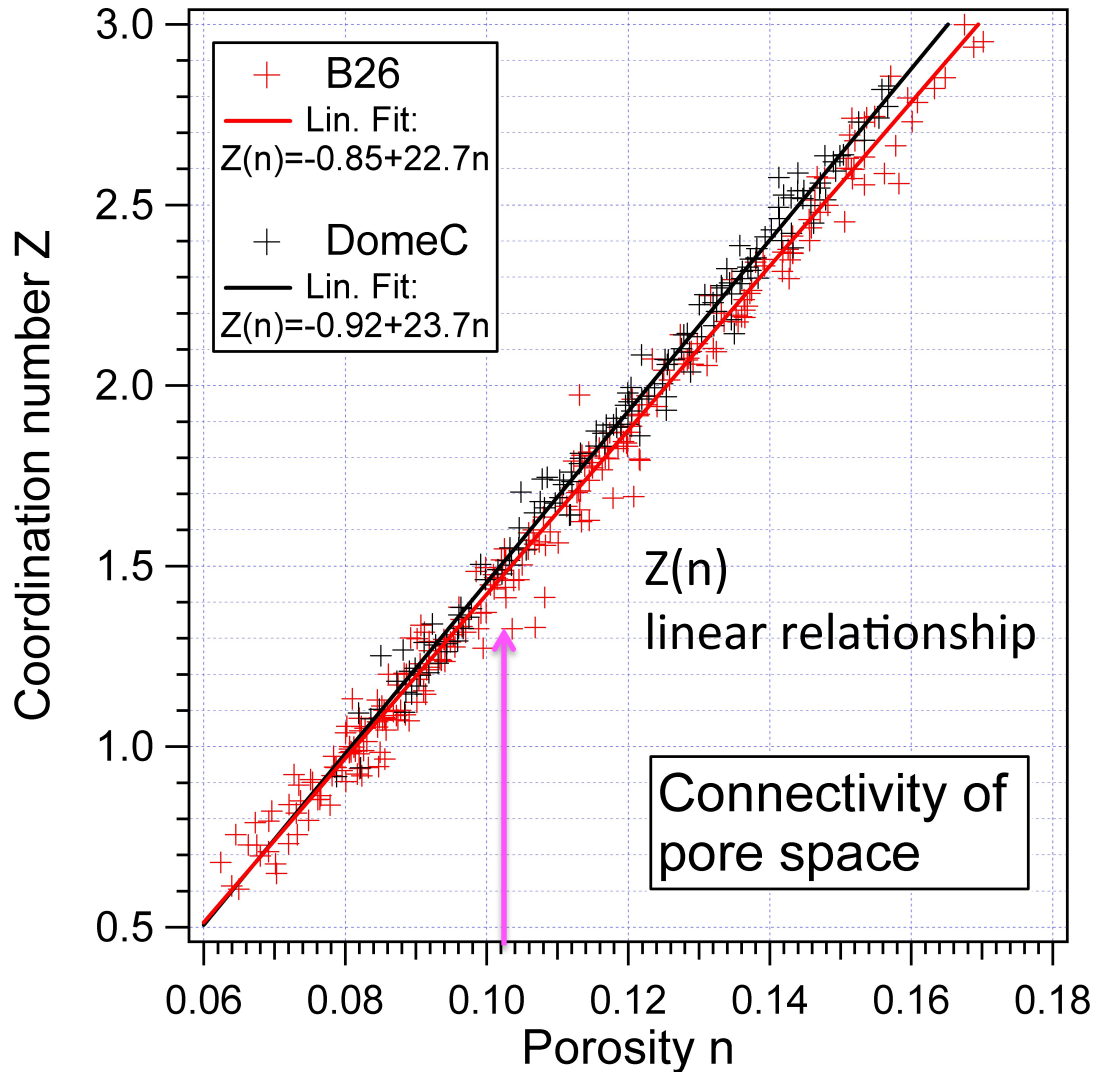


Konnektivität des Luftporenraumes im Firn

3D-image processing



Konnektivität des Luftporenraumes im Firn



Fully occupied lattice ($p=1$):

$$Z=4$$

Lattice at the threshold from permeability to impermeability (percolation threshold $p_{\text{crit}} \sim 0.4$)

$$Z \approx 1.6$$

Universelle kritische Porosität für polaren Firn

Ausblick, aktuelle Fragen und Probleme

- Bildverarbeitung von großen Datenmengen
- Prozessangepasste Beschreibung der Anisotropie (Diffusion? Permeabilität? Struktur?)
- Blasenverteilungen – Rückschlüsse auf Paläobedingungen während Schneemetamorphose und Firnverdichtung
- Erklärungsversuche von Luftinhalt und Gasfraktionierungen

Referenzen:

EPICA, community members, Fischer, H., **Freitag, J.**, Frenzel, A., Fritzsche, D., Fundel, F., Gersonde, R., Hamann, I., Huybrechts, P., Kipfstuhl, S., Lambrecht, A., Meyer, H., Miller, H., Oerter, H., Ruth, U., Rybak, O., Schmitt, J., Valero-Delgado, F., Wegner, A., Wilhelms, F. (2006).

[One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica](#), Nature, 444, 195-198., doi:10.1038/nature05301.

Hörhold, M. , Kipfstuhl, S. , Wilhelms, F. , **Freitag, J.** and Frenzel, A. (2011): The densification of layered polar firn , J. Geophys. Res., VOL. 116, doi: 10.1029/2009JF001630

Freitag, J. , Kipfstuhl, S. and Laepple, T. (2013): Core-scale radiosopic imaging: a new method reveals density-calcium link in Antarctic firn , J. Glaciol., 59 (218), pp. 1009-1014 . doi: 10.3189/2013JoG13J028

Freitag, J. , Kipfstuhl, S. , Laepple, T. and Wilhelms, F. (2013): Impurity-controlled densification: a new model for stratified polar firn , J. Glaciol., 59 (218), pp. 1163-1169 . doi: 10.3189/2013JoG13J042