

# Berichte

zur Polar-  
und Meeresforschung

611  
2010

Reports  
on Polar and Marine Research



Materialparameter zur Beschreibung des zeitabhängigen  
nichtlinearen Spannungs–Verformungsverhaltens von  
Firn in Abhängigkeit von seiner Dichte

---

Karl-Heinz Bäessler

---

 HELMHOLTZ  
| GEMEINSCHAFT

ALFRED-WEGENER-INSTITUT FÜR  
POLAR- UND MEERESFORSCHUNG  
In der Helmholtz-Gemeinschaft  
D-27570 BREMERHAVEN  
Bundesrepublik Deutschland

ISSN 1866-3192

# Hinweis

Die Berichte zur Polar- und Meeresforschung werden vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven\* in unregelmäßiger Abfolge herausgegeben.

Sie enthalten Beschreibungen und Ergebnisse der vom Institut (AWI) oder mit seiner Unterstützung durchgeführten Forschungsarbeiten in den Polargebieten und in den Meeren.

Es werden veröffentlicht:

- Expeditionsberichte (inkl. Stationslisten und Routenkarten)
- Expeditionsergebnisse (inkl. Dissertationen)
- wissenschaftliche Ergebnisse der Antarktis-Stationen und anderer Forschungs-Stationen des AWI
- Berichte wissenschaftlicher Tagungen

Die Beiträge geben nicht notwendigerweise die Auffassung des Instituts wieder.

# Notice

The Reports on Polar and Marine Research are issued by the Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research in Bremerhaven\*, Federal Republic of Germany. They appear in irregular intervals.

They contain descriptions and results of investigations in polar regions and in the seas either conducted by the Institute (AWI) or with its support.

The following items are published:

- expedition reports (incl. station lists and route maps)
- expedition results (incl. Ph.D. theses)
- scientific results of the Antarctic stations and of other AWI research stations
- reports on scientific meetings

The papers contained in the Reports do not necessarily reflect the opinion of the Institute.

The „Berichte zur Polar- und Meeresforschung“  
continue the former „Berichte zur Polarforschung“

## \* Anschrift / Address

Alfred-Wegener-Institut  
Für Polar- und Meeresforschung  
D-27570 Bremerhaven  
Germany  
[www.awi.de](http://www.awi.de)

Editor in charge:  
Dr. Horst Bornemann

Assistant editor:  
Birgit Chiaventone

Die "Berichte zur Polar- und Meeresforschung" (ISSN 1866-3192) werden ab 2008 ausschließlich als Open-Access-Publikation herausgegeben (URL: <http://epic.awi.de>).

Since 2008 the "Reports on Polar and Marine Research" (ISSN 1866-3192) are only available as web based open-access-publications (URL: <http://epic.awi.de>)

# **Materialparameter zur Beschreibung des zeitabhängigen nichtlinearen Spannungs–Verformungsverhaltens von Firn in Abhängigkeit von seiner Dichte**

---

**Karl-Heinz Bässler**

**Please cite or link this item using the identifier  
hdi:10013/epic.34656 or <http://hdl.handle.net/10013/epic.34656>  
ISSN 1866-3192**

**Karl-Heinz Bässler**

Berufsförderungswerk der Bauindustrie NRW e.V.  
Ausbildungszentrum Essen  
Lüschershofstraße 71-73  
D - 45356 Essen  
kh.baessler@bauindustrie-nrw.de

Privat:

Husemannweg 40  
D - 45327 Essen

Die vorliegende Arbeit ist die inhaltlich unveränderte Fassung einer Dissertation, die 2009 dem Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen vorgelegt wurde.

Die Arbeit wurde online als Dissertation an der Universität Bremen publiziert unter:

URN: [urn:nbn:de:gbv:46-diss000117719](http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:46-diss000117719)

Link für Online-Referenzen: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:46-diss000117719>

## INHALTSVERZEICHNIS

	SEITE
1. EINLEITUNG.....	1
2. PROBLEMSTELLUNG.....	6
2.1 ZIEL DER ARBEIT.....	6
2.2 VORGEHENSWEISE .....	7
3. ENTSTEHUNG UND AUFBAU DER POLAREN EISKAPPE.....	8
3.1 DIAGENESE DES FIRNS.....	10
3.2 PROBENGEWINNUNG.....	13
3.3 KRISTALLOPTISCHE UNTERSUCHUNGEN.....	16
3.3.1 DÜNNSCHLIFFHERSTELLUNG .....	16
3.3.2 UNTERSUCHUNGSGRUNDLAGEN UND VERSUCHSAUFBAU.....	16
3.3.3 AUSWERTUNG UND UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE.....	18
3.4 DICHTEPROFIL .....	24
4. MECHANISCHES VERHALTEN VON FIRN UND EIS.....	26
4.1 VERFORMUNGSGESCHWINDIGKEIT UND KRIECHVERHALTEN.....	26
4.2 EINFLÜSSE AUF DAS KRIECHVERHALTEN.....	29
4.2.1 SPANNUNGSABHÄNGIGKEIT .....	30
4.2.3 DICHTEABHÄNGIGKEIT .....	33
4.3 STOFFGESETZE FÜR FIRN UND EIS.....	33
4.3.1 RHEOLOGISCHE MODELLE.....	34
4.3.2 EMPIRISCHE ANSÄTZE .....	35
5. ERMITTLUNG RHEOLOGISCHER KENNWERTE AUS FELDVERSUCHEN.....	39
5.1 NEIGUNGSMESSUNGEN .....	40
5.2 SETZUNGSMESSUNGEN.....	42
5.3 ABLEITUNG DER STATIONÄREN LINEAREN DRUCKVISKOSITÄT .....	44
6. ERMITTLUNG VON STOFFPARAMETERN AUS LABORVERSUCHEN.....	51
6.1 VERSUCHSMATERIAL UND PROBENHERSTELLUNG.....	52
6.2 GERÄTE UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....	54
6.3 UNTERSUCHUNG DES BRUCHVERHALTENS.....	55
6.3.1 EINFLUSS DER VERFORMUNGSGESCHWINDIGKEIT .....	56
6.3.2 EINFLUSS DER FIRNDICHTE .....	59
6.3.2.1 DRUCKFESTIGKEITEN.....	61
6.3.2.2 BRUCHVERFORMUNGEN.....	62
6.3.2.3 ELASTIZITÄTSMODUL UND QUERDEHNUNGSZAHL .....	63
6.4 UNTERSUCHUNG DES KRIECHVERHALTENS.....	64
6.4.1 ABLEITUNG DES DICHTEABHÄNGIGEN ZEITUNABHÄNGIGEN NICHTLINEAREN KRIECHMODULS .....	66
6.4.2 ABLEITUNG DES DICHTEABHÄNGIGEN NICHTLINEAREN ZEITABHÄNGIGEN KRIECHMODULS .....	71
6.5 BERÜCKSICHTIGUNG DES TEMPERATUREINFLUSSES .....	74

7. SPANNUNGSBEREICHE DER STOFFGESETZE.....	76
7.1 ABSCHÄTZUNG DER DAUER DES PRIMÄRKRIECHENS.....	76
7.2 ANWENDUNGSGRENZEN DER STOFFGESETZE .....	78
8. BERECHNUNG DER DRUCKFESTIGKEITEN VON FIRN ÜBER DIE ZUVOR ERMITTELTEN FUNKTIONEN ZUR BESCHREIBUNG DER KRIECHVORGÄNGE.....	80
8.1 DRUCKFESTIGKEIT ALS FUNKTION DER FIRNDICHTE .....	80
8.2 DRUCKFESTIGKEIT ALS FUNKTION DER VERFORMUNGSRATE.....	82
9. SCHLUSSBETRACHTUNG UND AUSBLICK.....	84
SYMBOLVERZEICHNIS.....	85
LITERATURVERZEICHNIS.....	87
ANLAGENVERZEICHNIS.....	90
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	106
DANKSAGUNG.....	109
NACHWORT.....	110

## ZUSAMMENFASSUNG

Ziel der Arbeit ist die Ableitung von Materialparametern von Firn in Abhängigkeit von seiner Dichte zur Beschreibung des zeitabhängigen Verformungsverhaltens unter Druckspannungen. Die dem Firn in seiner natürlichen Tiefenlage entsprechenden Seitendrucke werden dabei berücksichtigt. Es werden sowohl der lineare wie auch der nichtlineare Spannungs-Verformungsbereich untersucht.

Die Anwendung einfacher Stoffgesetze zur Beschreibung von Setzungsmessungen in Bohrlöchern nahe der Georg-von-Neumayer-Station in der Antarktis stellt Materialparameter zur Beschreibung des zeitunabhängigen linearen Verformungsverhaltens bereit.

Ergebnisse von ein- und triaxialen Druck- und Kriechversuchen an „in-situ-Eisbohrkernen“ unter hohen Belastungen werden zunächst durch ein Stoffgesetz mit nichtlinearem Spannungs-Verformungsverhalten unter Vernachlässigung des zeitlichen Verformungsverlaufs beschrieben und darüber die für das Stoffgesetz notwendigen Materialparameter bestimmt.

In einer weiteren Betrachtung wird der über das gleiche Stoffgesetz erfassbare zeitliche Verlauf der Verformungen berücksichtigt und die daraus ermittelten dichteabhängigen Materialparameter vorgestellt.

Nach Umstellung des Stoffgesetzes von der Verformung auf die Spannung und unter Berücksichtigung der in den Druckversuchen gewonnenen dichteabhängigen Bruchverformungen werden die von der Dichte und der Verformungsgeschwindigkeit abhängigen Bruchspannungen berechnet. Die so indirekt theoretisch ermittelten Bruchspannungen bilden die im Labor ermittelten Bruchspannungen gut ab.

## **SUMMARY**

The aim of this work is the derivation of material parameters of polar firn as a function of its density to describe the time-dependent deformation behaviour under compressive stress. The total pressure corresponding to the in situ depths of the firn layer is taken into account. The linear and the nonlinear stress-strain relation will be investigated.

The use of simple constitutive equation to describe settlement measurements in boreholes near the Georg von Neumayer Station in Antarctica yields material parameters to describe the time-independent linear deformation behaviour.

Results of uniaxial and triaxial compression and creep tests on "in-situ ice cores" under high pressure are first described by a nonlinear constitutive equation which yields the material parameters without consideration of the time dependency.

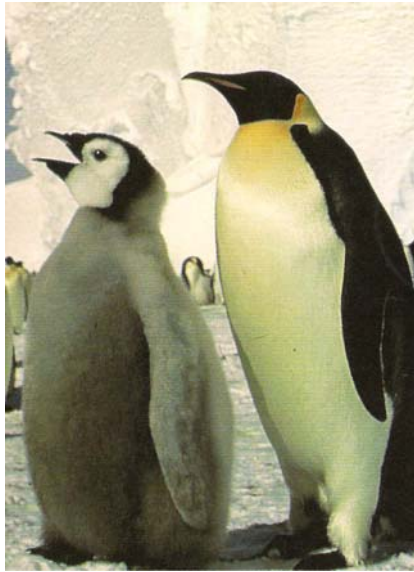
A further consideration with the same nonlinear constitutive equation will take into account the time dependency, and the resulting density-dependent material parameters will be identified.

After conversion of the constitutive equation to calculate the stress and in consideration of the strain at failure compressive strength are calculated. The indirect theoretically determined compressive strength (follows the above mentioned procedure) correspond well with those identified in laboratory tests.



## 1. EINLEITUNG

Nachdem vor rund 200 Jahren die Antarktis als letzter Kontinent der Erde von russischen, amerikanischen und britischen Seefahrern entdeckt wurde, fanden zahlreiche Expeditionen auf nationaler Ebene statt. Um die Geheimnisse dieses Kontinentes und ihrer „Einwohner“ zu erforschen, kamen vielfältige Untersuchungsmethoden zum Einsatz. Abb. 1.1a zeigt Ureinwohner der Antarktis, die vielfältig erforscht wurden.

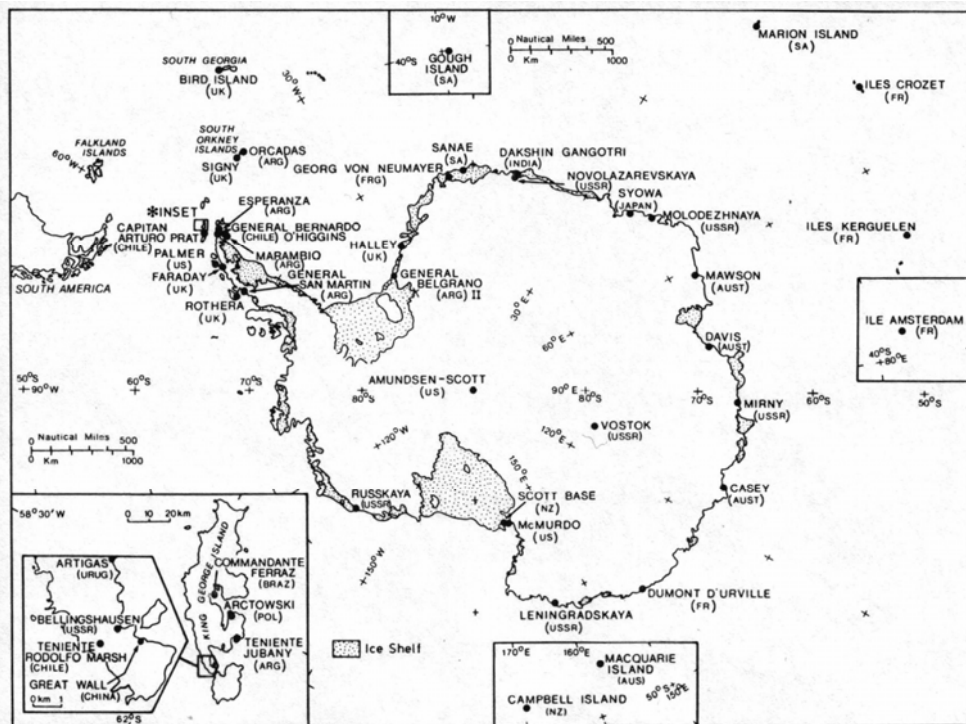


**Abb. 1.1a: Ureinwohner der Antarktis**

Mit Durchführung des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1957/58 gelang der Durchbruch zur internationalen Zusammenarbeit in der Antarktisforschung. Neben den wissenschaftlichen Resultaten brachte diese Zusammenarbeit zwölf Nationen an den Verhandlungstisch. Diese sogenannte Konsultativrunde entscheidet über die weitere Zukunft der Antarktis auf der Grundlage eines Vertrages, der die ausschließlich friedliche Nutzung sowie die Sicherstellung der Unversehrtheit des Gebietes südlich des 60. Breitengrades regelt. Am 23.9.1983 wurde die Bundesrepublik stimmberechtigtes Vollmitglied des Antarktisvertrages.

In dem menschenfeindlichsten Kontinent der Erde ist jegliche Forschung über eine längere Zeit nur im Schutz fester Stationen durchführbar. Die mit der Errichtung von Stationen auf und im Eis verbundenen ingenieurglazologischen Fragestellungen gaben den Untersuchungen schnee- und eismechanischer Prozesse neue Impulse.

Die Standorte einiger derzeit betriebener Stationen sind in Abb. 1.1b gezeigt.



**Abb. 1.1b: Die Lage internationaler Forschungsstationen in der Antarktis (Fifield, 1987)**

Die deutsche Überwinterungsstation Georg-von-Neumayer sollte im Südsommer 1981/82 ursprünglich auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis gebaut werden. Infolge einer sich nicht öffnenden Polynia konnten allerdings die Transportschiffe nicht bis dorthin gelangen. Man baute sie deshalb nahe der Atkabucht auf. Das damalige Baucamp wurde dann ein Jahr später auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis als die deutsche Filchnerstation errichtet.

Lagen die Untersuchungsschwerpunkte der Glaziologie früher hauptsächlich in der Verhinderung von Lawinenkatastrophen und der Verbesserung der Transportmöglichkeiten in schneebedeckten Gebieten, so stellen sich nun neue bautechnische Fragen hinsichtlich Gründungen und Ausführungen von Bauten auf und im Firn.

Bereits bei der Entscheidung für eine Stationsbauweise sind firn- und eismechanische Basisdaten notwendig, mit denen eine Lebensdauerabschätzung getroffen und damit eine vernünftige Kostenkalkulation durchgeführt werden kann.

Eine immer wiederkehrende Frage ist beispielsweise, ob eine Station über der Firnoberfläche gebaut, oder ob die Station im Firn eingebettet werden sollte. Bei der ersten Möglichkeit sind die Gebäude der Witterung ungeschützt ausgesetzt. Die Tunnellösung führt zu einer begrenzten Lebensdauer infolge der auftretenden Verformungen der Schutzzöcher. So wurde die in der in Abb. 1.2 dargestellte deutsche Antarktisstation „Georg-von-Neumayer“ im Süd-

sommer 1981/82 gebaut und nach 11 Jahren im Südsommer 1992/93 infolge der Röhrenverformungen aufgegeben. Die „Neumayer-Station“ wurde neu eingerichtet.



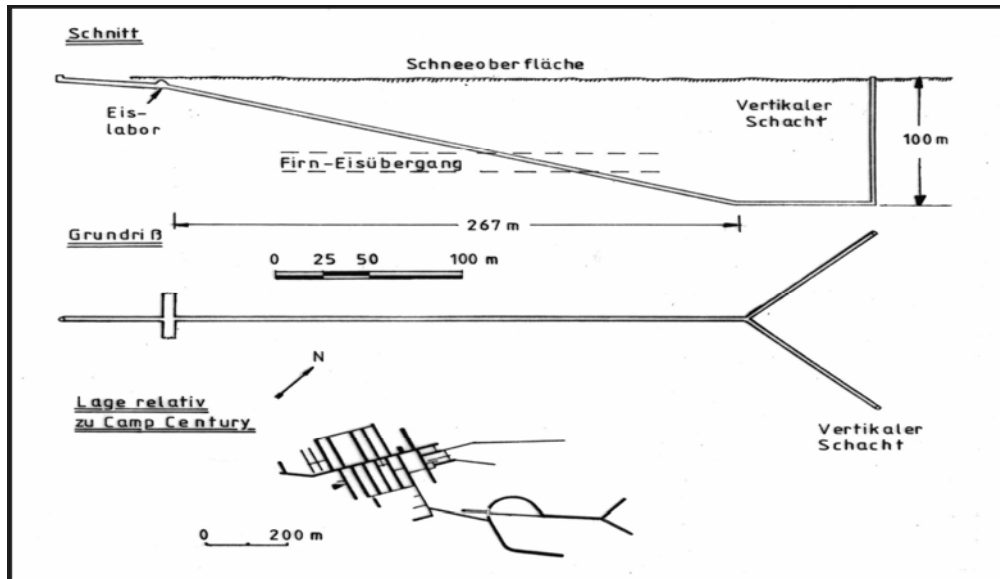
**Abb. 1.2: Die deutsche Forschungsstation „Georg-von-Neumayer“ (Januar 1983)**

Die Klärung weiterer wissenschaftlicher Fragestellungen setzen neue schnee- und eismechanische Kenntnisse voraus. So ist ein vordringliches Ziel der Antarktisforschung die Bestimmung des Massenhaushaltes des Kontinentes. Dazu sind, neben den Untergrundverhältnissen und den meteorologischen und ozeanographischen Daten, Kenntnisse über das Fließverhalten der Eiskappe notwendig. Die bisher durchgeführten mechanischen Untersuchungen beschränken sich hauptsächlich auf Eis und berücksichtigen nicht die abweichenden Materialeigenschaften der oberen Firnschichten.

Durch neu entwickelte Radarsysteme und bekannte Verfahren der Seismik, Gravimetrie und Magnetik versuchen Geophysiker das unter dem Eispanzer liegende Festland hinsichtlich seines Aufbaus zu erforschen. Die durch indirekte Messungen gewonnenen geologischen und geophysikalischen Erkenntnisse sind an den Ergebnissen von Aufschlussbohrungen in das vom Eispanzer bedeckte Festland zu überprüfen.

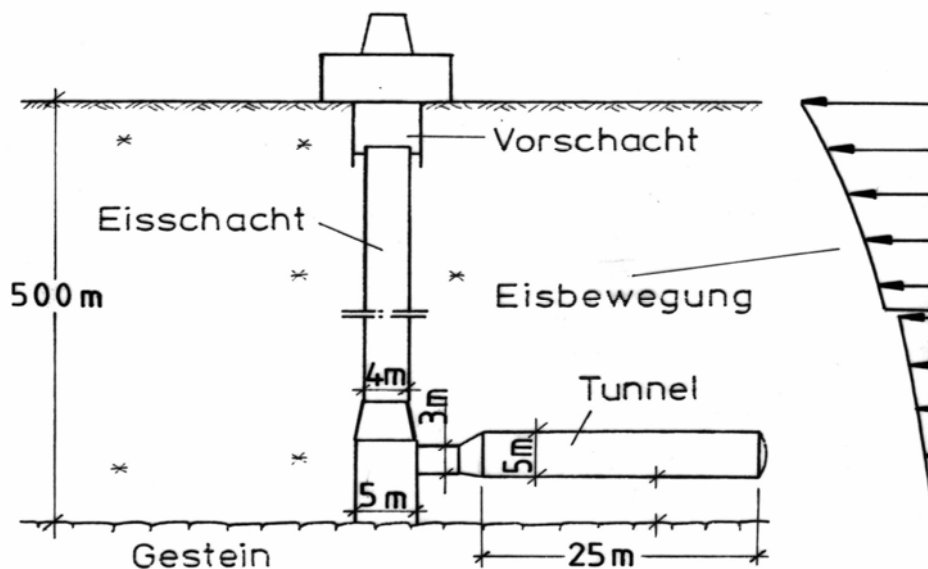
Weiterhin werden zur Bestimmung langzeitiger Klimaveränderungen die in Eisproben eingeschlossenen Gase und Spurenstoffe analysiert. Dazu ist ungestörtes Probenmaterial aus möglichst großen Tiefen notwendig. Die derzeit üblichen Bohrungen liefern geringe Probenmengen, die für Spurenstoffuntersuchungen infolge der Kontamination durch das Bohrgerät nur bedingt brauchbar sind. Zur ungestörten Probenentnahme wurden deshalb in Camp Century, Grönland, bereits vor 40 Jahren erhebliche Anstrengungen unternommen. Wie Kovacs et al, 1969 ausführten, wurde ein 100 m tiefer Schacht mit einer Neigung von 20° zur Horizontalen abgeteuft. Abb. 1.3 zeigt, dass am Endpunkt des geneigten Schachtes zwei

Tunnel 100 m weit horizontal vorgetrieben wurden. Vertikalschächte führen von den Tunnelenden an die Oberfläche.



**Abb. 1.3: Lageplan der Probengewinnungsstätte in Camp Century, Grönland (nach Kovacs et al, 1969)**

Jessberger, 1983 untersuchte in einer Studie die technischen Möglichkeiten zur Realisierung eines kombinierten Schacht- und Tunnelprojektes, mit dem Probengewinnungen und der Zugang zum Felsuntergrund durch Bohrungen von der Tunnelsohle aus möglich erscheint. Das Konzept dieser Überlegungen ist in Abb. 1.4 dargestellt.



**Abb. 1.4: Darstellung eines möglichen Schacht-Tunnelprojektes**

Ein vertikaler Schacht wird bis zum Felsboden abgeteuft. Infolge des zu erwartenden Druckschmelzwassers an der Eis-Gesteinsgrenze wird einige Meter über dem Gestein ein

Tunnel im Eis vorgetrieben, dessen Sohle als Bohrplattform dient. Abhängig von der Fließgeschwindigkeit und der Fließrichtung wird die sich im annähernd gleichen Maße horizontal mitbewegende Tunnelbrüst abgebaut, um so die am Anfang des Tunnels durchzuführenden Bohrarbeiten gegen das fließende Eis abzusichern. Im Gegensatz zu Bohrungen mit einer stark begrenzten und zudem verunreinigten Probenausbeute bieten die oben beschriebenen Probengewinnungen unverkennbare Vorteile.

## 2. PROBLEMSTELLUNG

Die oben beschriebenen Projekte setzen die Kenntnis der rechnerischen Behandlung des nichtlinearen Spannungs-Verformungsverhaltens von Firn und Eis voraus.

Über das Fließverhalten von Eis liegen zahlreiche Untersuchungen vor. Dagegen ist das Kriechverhalten von Firn bisher nur vereinzelt und dann meist nur unter dem Einfluss geringer Spannungen mit linear modellierter Spannungs-Verformungsbeziehung untersucht worden.

In ingenieurglazilogischen Fragestellungen bei Vorhandensein hoher Belastungen kommt der Erfassung der in der Primärphase (Zeitintervall mit abnehmender Verformungsrate bis hin zur quasi-stationären Verformungsrate) akkumulierten Verformungen eine große Bedeutung zu. Zudem sind ausreichende Sicherheiten gegenüber Materialversagen wirtschaftlich zu berücksichtigen. Die bisher abgeleiteten Stoffparameter für Firn und Eis fanden hauptsächlich Anwendung zur Beschreibung zeitunabhängiger langdauernder Prozesse, wie dem Fließen von Gletschern oder den Setzungen in polaren Eiskappen, bei denen die Verformungen in der Primärphase nur eine untergeordnete Rolle spielen.

### 2.1 ZIEL DER ARBEIT

Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Ermittlung von Materialparametern zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Firn, die unter Verwendung bekannter Stoffgesetze folgende Einflüsse erfassen.

Einfluss der Firndichte auf das Kriechverhalten (aus Felduntersuchungen)

- unter der Einwirkung geringer Spannungen bei zeitlicher Unabhängigkeit
- unter der Einwirkung hoher Spannungen (aus Laborversuchen)
  - bei zeitlicher Unabhängigkeit des Verformungsverlaufs
  - unter Berücksichtigung des zeitlichen Verformungsverlaufes

Einfluss auf die Größe und Änderung der Bruchspannung

(durch Umstellung des Stoffgesetzes und Laborversuchen)

- bei unterschiedlichen Firndichten
- bei unterschiedlichen Verformungsgeschwindigkeiten

Die ermittelten Stoffparameter ermöglichen, nach Einbau in geeignete Rechenverfahren, die Abschätzung des Verformungsverhaltens von Bauten auf und im Firn. Der Einfluss globaler

Fließverhältnisse (Strain, verursacht durch die in den Eiskappen vorhandenen Spannungszustände) ist dabei gesondert zu untersuchen.

## **2.2 VORGEHENSWEISE**

Im Rahmen dieser Arbeit werden aus der Literatur bekannte Stoffgesetze angewendet. Die dichteabhängigen Stoffparameter ergeben sich aus Auswertungen von Bohrlochmessungen und aus ein- und triaxialen Druck- und Kriechversuchen.

Die Bohrlochmessungen wurden während der Antarktiskampagnen 1982 bis 1984 auf dem Ekström- und Filchner-Ronne-Schelfeis durchgeführt (Jessberger et al; 1982, 1985, 1987).

Die Laborversuche fanden an Bohrkernen statt, die in der Nähe der Georg-von-Neumayer Station auf dem Ekström-Schelfeis gewonnenen wurden. Der im Labor untersuchte Dichtebereich bewegt sich von  $0,545 \text{ g/cm}^3$  bis  $0,857 \text{ g/cm}^3$ . Vor Beginn der Versuche wurde ein Seitendruck aufgebracht, der dem in-situ Seitendruck der betrachteten Tiefenlage entspricht.

Ausgehend von der Klassifizierung des untersuchten Materials nach der Dichte, der Korngröße und -gestalt wurden zudem die c-Achsenorientierungen der Eiskristalle überschläglich bestimmt, da diese bei vorhandener homogener Ausrichtung einen maßgeblichen Einfluss auf das Kriechverhalten haben.

Basierend auf exponentiellen Stoffgesetzen werden aus den Feld- und Laboruntersuchungen bei konstanten Temperaturen die für die Stoffgesetze notwendigen Parameter ermittelt. Mit aus der Literatur bekannten Gleichungen erfolgt die Übertragung der Stoffparameter auf andere Temperaturen.

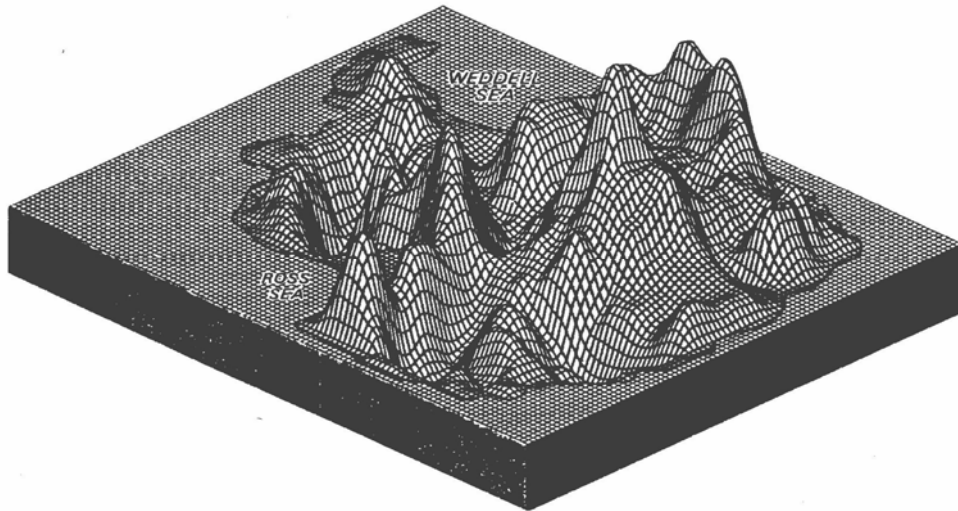
Zur Verifizierung der Ergebnisse werden nach Gleichungsumstellung und Einsetzung der in den Laborversuchen gemessenen Bruchsverformungen die resultierenden Bruchspannungen abhängig von der Firndichte und der Verformungsgeschwindigkeit berechnet.

Eine künftige Implementation der Stoffgesetze und der hier abgeleiteten Stoffparameter in ein geeignetes Rechenverfahren hat unter Berücksichtigung der eingprägten Verzerrungen der Eiskappe zu erfolgen. Dazu bieten sich numerische Verfahren an, mit denen der inhomogene Aufbau der Eiskappe in den oberen Schichten zusammenhängend modellierbar ist.

Die recht komplizierten Verhältnisse und Zusammenhänge in polaren Eiskappen werden im anschließenden Kapitel aufgezeigt.

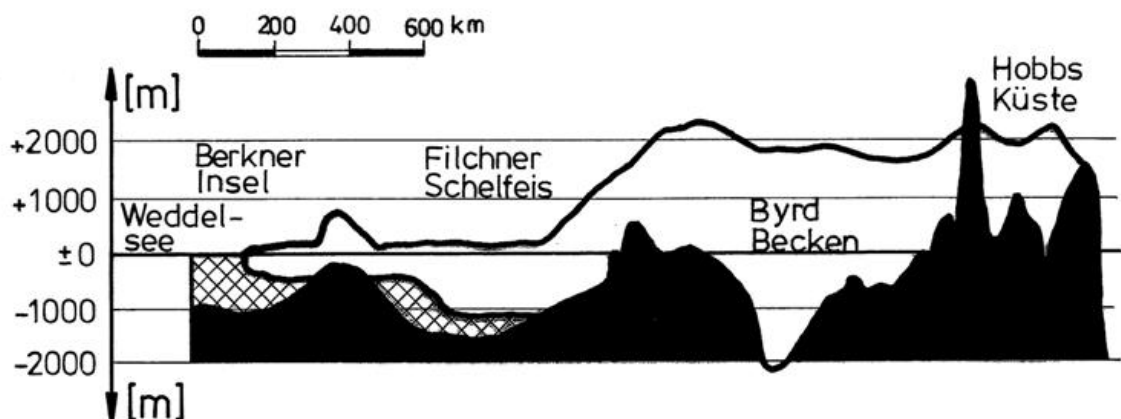
### 3. ENTSTEHUNG UND AUFBAU DER POLAREN EISKAPPE

Die unterhalb des Schmelzpunktes liegenden Temperaturen in der Antarktis führen zu einer kontinuierlichen Ablagerung des als Schnee fallenden Niederschlages. Dadurch bildete sich über Jahrtausende ein dicker Eisanspanzer, der durch die in Abb. 3.1 gezeigten Höhenunterschiede zwischen Festland- und Meeresniveau in Richtung Meer fließt.



**Abb. 3.1: Höhenprofil der antarktischen Eiskappe (Drewry, 1983)**

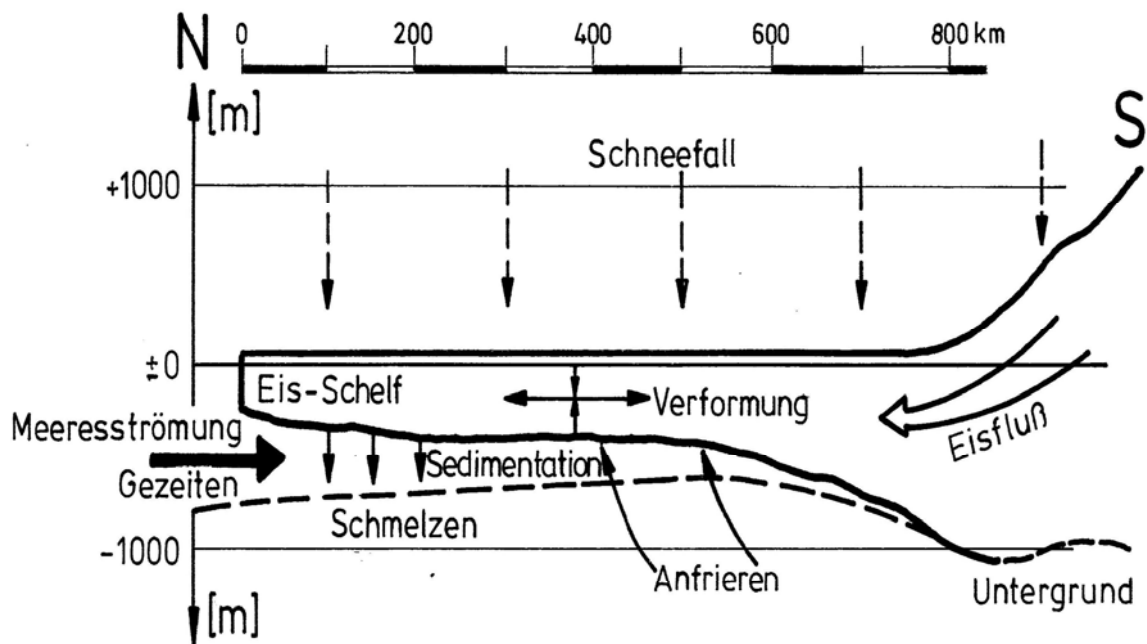
Auf seinem Weg zum Meer ist das Eisgefüge mannigfaltigen mechanischen Beanspruchungen unterworfen, da es über die Höhen und Senken des darunterliegenden Geländes geschoben wird. Das in Abb. 3.2 dargestellte Kontinentalprofil zwischen der Hobbs Küste und dem Filchner Schelfeis lässt die Hindernisse erkennen, die das Eis zu überwinden hat.



**Abb. 3.2: Kontinentalprofil zwischen der Hobbs Küste und dem Filchner Schelfeis (Kohnen, 1983)**



Niveaunterschiede von 2000 m unterhalb des Meeresspiegels z.B. im Byrd Becken und 2000 m oberhalb des Meeresspiegels z.B. an der Hobbs Küste prägen das Eisgefüge insofern, dass durch die Eisbewegung verstärkt Rekristallisationsvorgänge auftreten, die die ursprünglich durch Verdichtung entstandene Textur verändern. Ohne dass die Verbindung zum Festlandeis abreißt, schiebt sich der Eispanzer weiter auf das Meer hinaus und bildet dort die Schelfeisbereiche. Zusätzlich zu den mechanischen Einwirkungen infolge der Fließbewegung, beeinflussen die in Abb. 3.3a angedeuteten Prozesse die Entwicklung der Schelfeise.



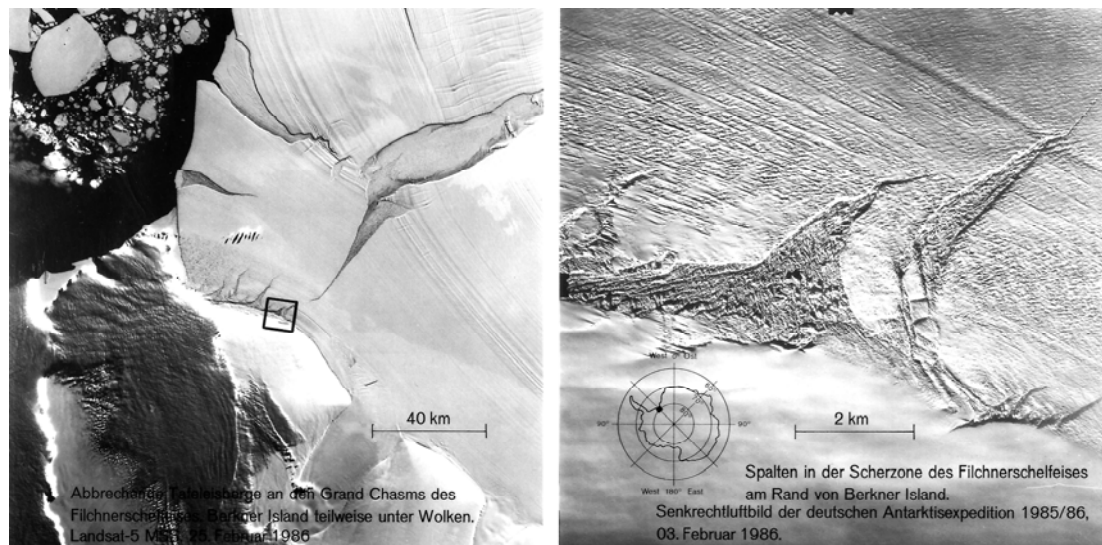
**Abb. 3.3a: Akkumulations- und Ablationsvorgänge eines Schelfeises (Kohnen, 1983)**

Das nahe der „grounding line“, der Trennlinie zwischen aufliegendem und schwimmendem Eis, anfrirende Meerwasser und der Schneezutrag, die Akkumulation, bewirken eine Verdickung.

Mit zunehmender Entfernung von der „grounding line“, verringert sich die Eisdicke durch Abschmelzungen an der Schelfeisunterkante, sowie durch Ausdünnung infolge „Eisspreading“ bei Annäherung an die Schelfeiskante, wodurch die Fließgeschwindigkeit rapide ansteigt. Zudem wirkt sich die wegfallende Reibung (Schelfeis schwimmt auf) geschwindigkeitserhöhend aus.

Am Ende des Fließweges bricht das Eis in Form großer Eisberge an der Schelfeiskante ab. Die Eisberge treiben jahrelang in den antarktischen Gewässern in Richtung der süd-

amerikanischen oder südafrikanischen Küste bis sie abgeschmolzen sind. Abb. 3.3b gibt ein Beispiel für den Abbruch riesiger Schelfeisbereiche und der Entstehung von mehr als 40 km x 40 km großen Eisberge.



**Abb. 3.3b: Abbrechende Tafelberge an den Grand Chasms des Filchner Schelfeises und Spaltenzone zwischen Berkner Island und dem Filchner Schelfeis. (Landsat-5-MSS. Datenaufnahmen durch Fa. EOSAT, Lanham, USA. Digitale Aufbereitung durch IfAG, Frankfurt/Main. Senkrechtluftbild: Aufnahme durch IfAG, Frankfurt/Main, 1986/86)**

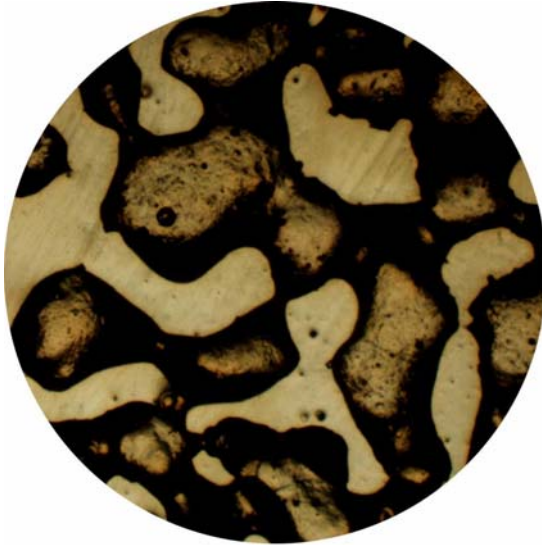
### 3.1 DIAGENESE DES FIRNS

Der Eispanzer ist ein in sich fein strukturierter Körper, der sich aus Eiskörnern zusammensetzt, die mit zunehmender Tiefe dichter gepackt werden und ihre Größe und Form verändern. Frisch gefallener Schnee nimmt in seiner ursprünglichen Form Dichtewerte von  $0,15 \text{ g/cm}^3$  bis  $0,2 \text{ g/cm}^3$  an.

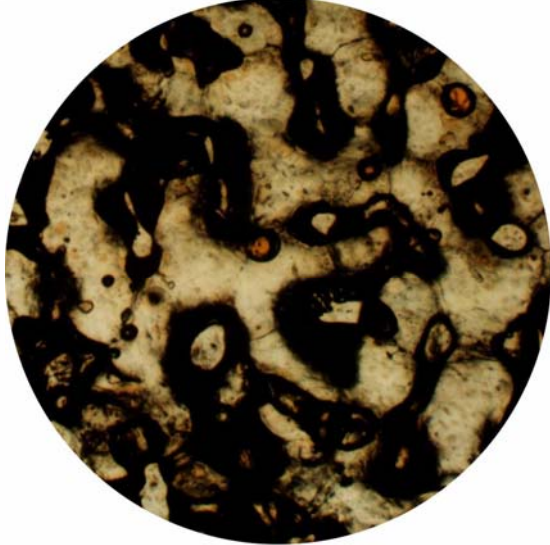
Abhängig von den herrschenden Windgeschwindigkeiten werden die Kristalle frisch fallenden (wie auch bereits abgelagerten aber noch nicht verfestigten) Schnees durch mechanischen Abrieb bereits vor der Ablagerung gerundet. Dadurch wird eine dichtere Packung der Körner erreicht.

Lassen die Windgeschwindigkeiten eine Ablagerung des Schnees zu, so verhindert die Sinterung ein weiteres Verwehen des Schnees. Zwischen den noch unverbundenen Eiskristallen wachsen Verbindungszapfen und verkitten die Einzelkörner. Diese Eismatrix, bestehend aus Eiskörnern, Kornverbindungen und Luftporen (Abb. 3.4a) wird als Firn bezeichnet. Die Dichte an der Oberfläche bewegt sich dann zwischen  $0,3 \text{ g/cm}^3$  und  $0,45 \text{ g/cm}^3$ .

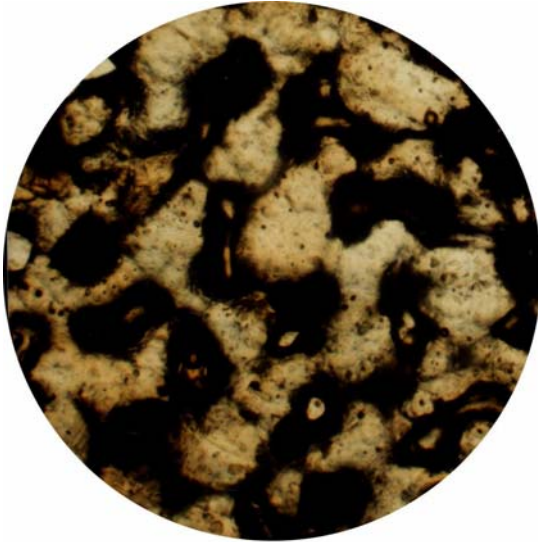
3.4a



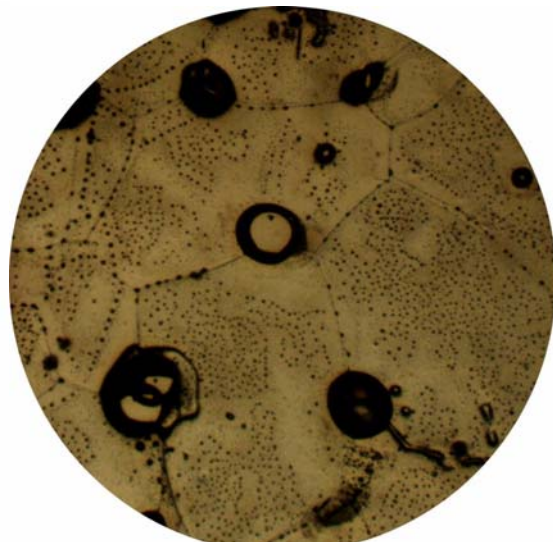
3.4b



3.4c



3.4d



**Abb. 3.4 a-d: Struktureller Aufbau von**  
**a)-c) Firn nach verschiedenen Belastungszeiten unter einem hydrostatischen**  
**Druck von  $0,5 \text{ MN/m}^2$**   
**d) Schneeeis (nach Rodenheber, 1985)**

Infolge der kontinuierlichen Akkumulation wird der Firn allseitig zusammengedrückt. Dabei erfolgt die weitere Umwandlung des Firns zu Eis durch drei Vorgänge, die je nach bereits erreichter Dichte unterschiedlich stark dominieren.

- Dichteres Packen der Eiskörner durch Verringerung des gegenseitigen Abstandes
- Deformation der äußeren Form und der Größe der Eiskörner durch Spannungsabbau infolge Rekristallisation an den Kornkontaktstellen
- Verformungen im Inneren der Eiskristalle

Nach Anderson et al, 1963 erfolgt die Diagenese bis zu einer Dichte von  $0,55 \text{ g/cm}^3$  hauptsächlich durch eine gegenseitige Annäherung der Eiskörner, bei der die Kornverbindungen gestaucht werden, ohne dass die Körner verformt werden. Abb. 3.4a verdeutlicht, dass die Firnstruktur bei dieser Dichte ( $0,46 \text{ g/cm}^3$ ) Belastungen über die schwachen Kornverbindungen weiterleiten kann.

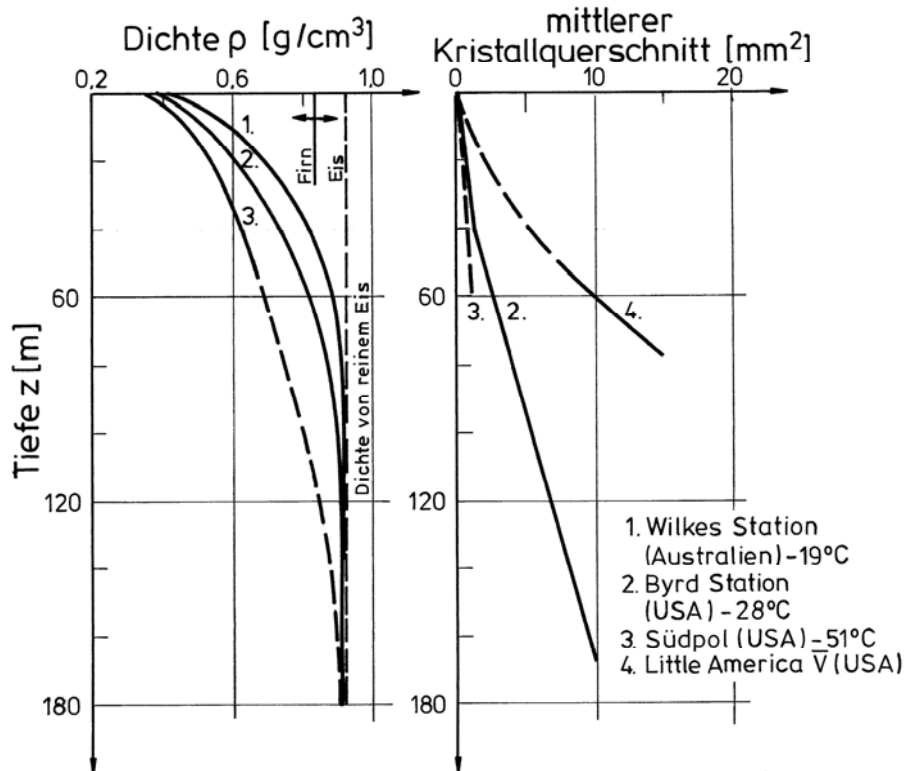
Die Labilität dieses lockeren Gerüsts wird erkennbar, wenn die Abb. 3.4a bis 3.4c miteinander verglichen werden. Alle drei Abbildungen zeigen die gleiche Firnprobe nach unterschiedlichen Belastungszeiten unter einer hydrostatischen Spannung von  $0,5 \text{ MN/m}^2$  (nach Rodenheber, 1985). In den ersten fünf Stunden nach Belastungsaufbringung erhöhte sich die Firndichte von  $0,463 \text{ g/cm}^3$  (Abb. 3.4a) auf  $0,605 \text{ g/cm}^3$  (Abb. 3.4b). Dieser raschen Verdichtung folgte bei gleicher Belastung nur ein geringer Dichteanstieg auf  $0,66 \text{ g/cm}^3$  (Abb. 3.4c) in weiteren 157 Stunden.

Eine mögliche Erklärung für die unterschiedlichen Dichteanstiege ist, dass die Kornverbindungen zunächst unter der hohen aufgebrachtten Spannung rasch gestaucht wurden bzw. versagten. Deshalb erfolgte innerhalb der ersten fünf Stunden diese hohe Verdichtung. Bedingt durch den in Abb. 3.4b erkennbaren Korn-zu-Korn Kontakt, verläuft die Verdichtung nun langsamer, da hauptsächlich die im Vergleich zu den Kornverbindungen stabileren Eiskörner deformiert werden müssen. An den Kontaktstellen zweier Eiskörner treten Spannungskonzentrationen auf, die durch Rekristallisation kompensiert werden. Es verändern sich die Größe und Form der Körner.

Die wenigen in Abb. 3.4c noch miteinander in Verbindung stehenden Luftporen werden mit zunehmender Verdichtung von den Eiskörnern eingeschlossen und voneinander isoliert. Bei einer Dichte von  $0,83 \text{ g/cm}^3$  tritt nach Paterson, 1982 der Porenschluss ein, bei dem die Luftporen voneinander abgekapselt sind und der Firn luftundurchlässig wird. Die Luftundurchlässigkeit definiert den Übergang von Firn zu Schneeeis (Abb. 3d).

Durch die permanent wirkende Auflast des akkumulierten Firns und die damit verbundene weitere Komprimierung der eingeschlossenen Luftporen erhöht sich die Dichte bis auf die Dichte des inkompressiblen Eises von  $0,917 \text{ g/cm}^3$ .

Dieser als Diagenese bezeichnete Prozess wird maßgeblich durch die Temperaturverhältnisse, denen der Firn unterliegt und durch die Größe der Akkumulationsrate beeinflusst. Deshalb hängen Dichteverteilungen und Kornwachstumsraten von den von Ort zu Ort verschiedenen Verhältnissen ab. Abb. 3.5 zeigt für verschiedene Regionen der Antarktis die mit der Tiefe zunehmende Dichte, sowie das mit der Tiefe zunehmende Kornwachstum infolge Rekristallisation.



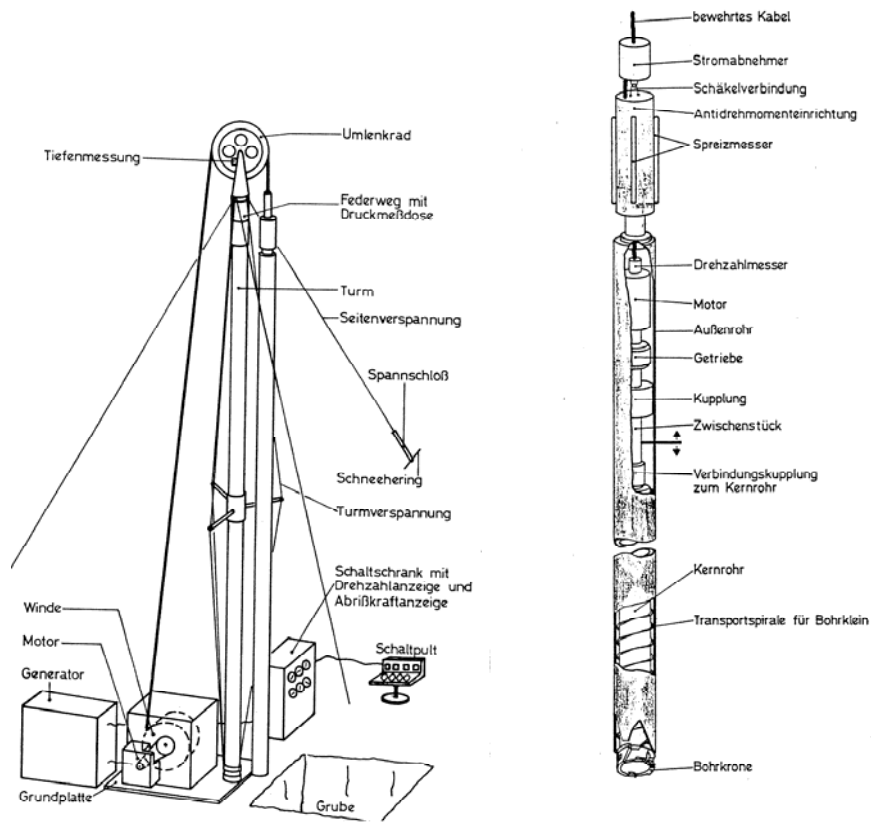
**Abb. 3.5: Firnverdichtung und Kristallwachstum in Abhängigkeit von der Tiefe und der Temperatur (nach Bentley aus Kohnen, 1983)**

Erkennbar sind die mit abnehmender Temperatur geringere Dichtezunahme und geringeres Kornwachstum. Der Firn-Eisübergang stellt sich nahe der „kalten“ Byrd Station erst rund 30 m tiefer ein als bei der Wilkes Station, wo er bereits in einer Tiefe von 40 m eintritt.

Die Zunahme der Korngröße mit der Tiefe ist bei der küstennahen Station Little America V stärker ausgeprägt als bei den Inlandsstationen Byrd und Südpol, bei denen sich der Firn-Eisübergang infolge der geringeren Temperaturen und Niederschläge erst in größeren Tiefen einstellt.

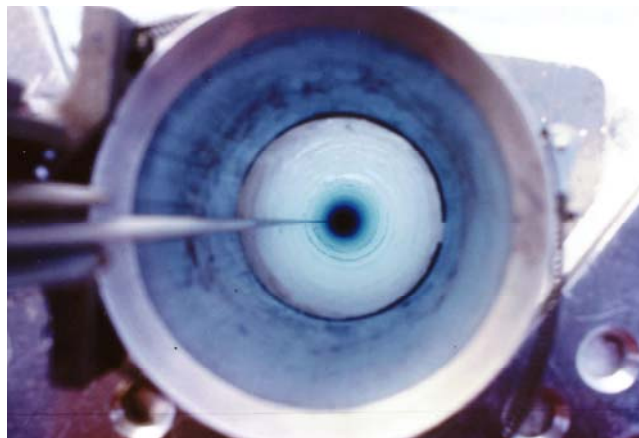
### 3.2 PROBENGEWINNUNG

Das mechanische Verhalten von Firn und Eis ist maßgeblich von der Temperatur, Dichte und Struktur abhängig. Diese Parameter werden möglichst schon an Bohrkernen und in den Bohrlöchern vor Ort während des Bohrprozesses bestimmt. Abb. 3.6 zeigt ein Bohrsystem für Eiskernbohrungen bis in Tiefen von 200 m, das speziell für diese Aufgabe entwickelt und während mehrerer Antarktiskampagnen erfolgreich auf dem Ekström- und dem Filchner-Ronne-Schelfeis eingesetzt wurde (Jessberger et al, 1985 und 1987). Nähere Erläuterungen zu dem gezeigten Bohrggerät finden sich in Jessberger et al, 1982.



**Abb. 3.6: Schematische Übersicht und Details des „Bochumer Eiskernbohrers“**

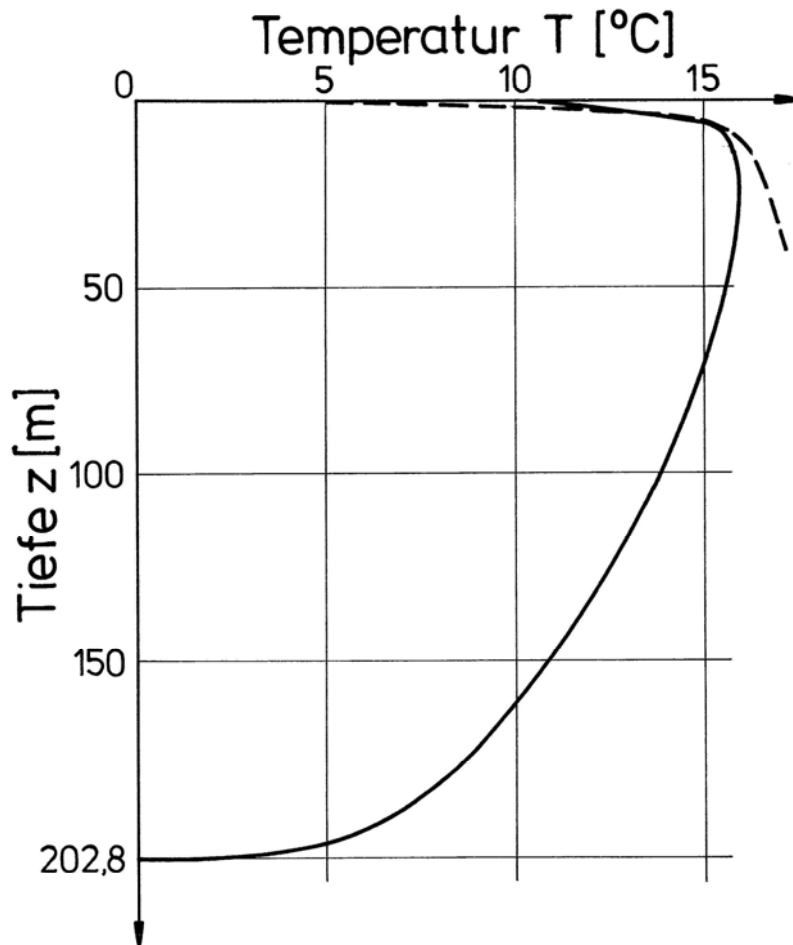
Für die Laborversuche stand ein Bohrkern bis in 73 m Tiefe, sowie einzelne Bohrkernstücke bis zur Schelfeisunterkante (203 m) des Ekström-Schelfeises zur Verfügung, die aufgrund ihres guten Zustandes für die mechanischen Untersuchungen ausgewählt wurden.



**Abb. 3.7a: Temperaturmeßsonde in einem Bohrloch auf dem Ekström-Schelfeis**

Während der Durchführung der Bohrarbeiten wurden in 10 m Intervallen die Bohrlochtemperaturen gemessen. Das in Abb. 3.7a gezeigte Foto wurde während einer Temperaturmessung auf dem Ekström-Schelfeis gemacht. Es zeigt ein 204 m tiefes unverrohrtes Bohrloch in dem eine Temperaturmesssonde an einem Kabel hängt.

Abb. 3.7b zeigt das Schelfeis-Temperaturprofil, das bei der Durchbohrung des Ekström-Schelfeises gemessen wurde.



**Abb. 3.7b: Temperaturprofil des Ekström-Schelfeises (Jessberger et al, 1987)**

Von der Oberfläche bis in eine Tiefe von ca. 10 m ist eine von der Lufttemperatur abhängige Abkühlung bis auf  $-16^{\circ}\text{C}$  erkennbar. Die Temperatur an der Schelfeisunterkante entspricht der Meerwassertemperatur von  $-1,8^{\circ}\text{C}$ . Zwischen der in 10 m Tiefe gemessenen Jahresmitteltemperatur und der Meerwassertemperatur stellt sich ein stationärer Wärmeleitungszustand ein, der in Richtung zur Schelfeisunterkante einen stark ansteigenden Temperaturgradienten aufweist. Die Jahresmitteltemperatur liegt nach Reinwarth, 1982 ca.  $1^{\circ}\text{C}$  niedriger als die im Bohrloch gemessene. Dies kann auf die kürzere Verweilzeit des Messgebers im Bohrloch (15 Minuten) zurückgeführt werden, die durch die beschränkt zur Verfügung stehende Bohrzeit bedingt war. Nachträglich durchgeführte Messungen, bei der diese Zeitbeschränkung nicht bestand, sind bis 40 m gestrichelt in Abb. 3.7b eingezeichnet und bestätigen die von Reinwarth, 1982 ermittelten Temperaturen.

### **3.3 KRISTALLOPTISCHE UNTERSUCHUNGEN**

Zur Beschreibung der Eisstruktur werden, ermöglicht durch die Transparenz des Eises, kristallographische Verfahren angewandt. Eiskristalle besitzen infolge ihrer hexagonalen Symmetrie nur eine optische Achse, die Haupt- oder c-Achse genannt wird. In Richtung der c-Achse einfallendes Licht bewegt sich wie in einem isotropen Medium fort, ohne dass der Strahlengang gebrochen wird. Lichtstrahlen, die schräg zur Hauptachsenrichtung einfallen, werden in zwei aufeinander senkrecht stehende Transversalwellen aufgespalten, die sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten fortpflanzen. Infolge dieses Gangunterschiedes erscheinen Eiskristalle in verschiedenen Farben, wodurch die Größe und Form der Körner sichtbar wird.

#### **3.3.1 DÜNNSCHLIFFHERSTELLUNG**

Zur Untersuchung der Firn- und Eisproben wurden Dünnschliffe hergestellt, deren Dicke von der Korngröße des untersuchten Materials abhängt und den halben Korndurchmesser betragen sollte.

Während bei der Herstellung von Eisdünnschliffen keine besonderen Maßnahmen getroffen werden müssen, um Störungen des Gefüges zu vermeiden, war es notwendig die weniger festen Firnstrukturen vor der Bearbeitung zu stabilisieren. Dazu wurde der Porenraum des Firns mit Dimethyl-Phtalat bei  $-5^{\circ}\text{C}$  aufgefüllt. Bei einer Temperatur von  $-14^{\circ}\text{C}$  gefriert der Porenfüller und stabilisiert die Firnprobe, aus der ein Dünnschliff im Kältelabor nach dem im folgendem beschriebenen Verfahren gewonnen wurde.

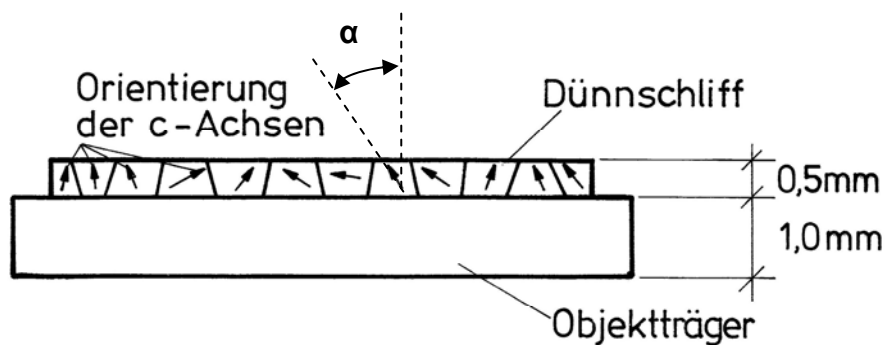
Von dem Bohrkern wird mit der Bandsäge eine ca. 10 mm dicke Scheibe abgeschnitten. Die Scheibe wird mit Sandpapier geglättet und auf einer  $+2^{\circ}\text{C}$  warmen Heizplatte angeschmolzen. Unter Vermeidung von Lufteinschlüssen wird der Grobdünnschliff von der Heizplatte auf eine  $-14^{\circ}\text{C}$  kalte Glasplatte geschoben, auf der er anfriert. Nach Reduzierung der Probendicke auf 5 mm mit einer Bandsäge, erfolgt die weitere Verringerung der Dicke durch Abschleifen mit Schleifpapier. Ein auf den Objektträger aufgefrorener Stahlring konstanter Dicke, der die Probe umschließt, dient als Führung und Maß zur Erzielung einer gleichmäßigen Dünnschliffdicke.

#### **3.3.2 UNTERSUCHUNGSGRUNDLAGEN UND VERSUCHSAUFBAU**

Grundsätzlich verhält sich Licht in Abhängigkeit von der Orientierung der Kristalle (Lage der c-Achsen) unterschiedlich beim Durchgang durch ein doppelbrechendes Mineral. Durch die



Doppelbrechung des Eises erfahren die aufeinander senkrecht stehenden Transversalwellen je nach Orientierung der c-Achsen verschiedene Gangunterschiede (siehe Abb. 3.8).

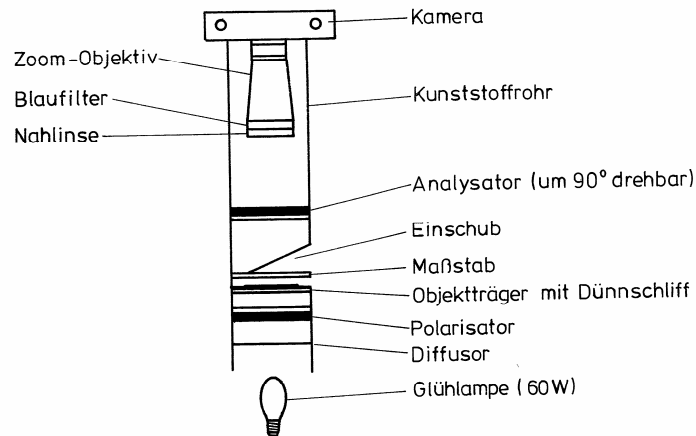


**Abb. 3.8: Orientierung der c-Achsen in einem Dünnschliff aus polykristallinem Eis**

In einem zweiten, hinter dem Dünnschliff liegenden Polfilter, dem Analysator, interferieren die Wellen. Abhängig von der c-Achsenorientierung und vom Gangunterschied, der bei der Aufspaltung der Polarisatorwelle in zwei Teilwellen entstanden ist, erscheint jedes Eiskristall in einer typischen Interferenzfarbe, durch die die Form und Größe der Einzelkristalle bestimmt werden kann.

Die Verwendung zirkular polarisierten Lichtes erlaubt die Bestimmung des Winkels  $\alpha$  zwischen der c-Achsenrichtung und der Flächennormalen direkt von den erstellten Fotos, da jede der c-Achsenorientierungen mit einem gleichen Winkel zur Flächennormalen die gleiche Interferenzfarbe liefert. Es existieren dabei keine Dunkelstellungen, wie bei der Verwendung linear polarisierten Lichtes. Nach Medenbach, 1985 ist die Voraussetzung hierfür eine konstante Dünnschliffdicke.

Die Untersuchung der Dünnschliffe erfolgte mit dem in Abb. 3.9 dargestellten Versuchsaufbau unter Verwendung von  $\lambda/4$ -Folien zur Erzeugung zirkular polarisierten Lichtes. Die Dünnschliffe werden in die Öffnung eines Kunststoffrohres zwischen Polarisator, Analysator und den  $\lambda/4$ -Folien gestellt und mit weißem Licht beleuchtet. Das Transparentpapier vor dem Polarisator dient dabei als Diffusor. Vor dem Dünnschliff wird eine Glasplatte mit eingearbeitetem Maßstab gestellt. Eine Spiegelreflexkamera hält das Bild der so durchleuchteten Dünnschliffe fest. Ein aufgeschraubter Blaufilter kompensiert mögliche Gelbstichigkeit des von der Glühbirne erzeugten Kunstlichtes.



**Abb. 3.9: Versuchsaufbau zur Dünnschliffuntersuchung im zirkularpolarisiertem Licht (nach Rodenheber, 1985)**

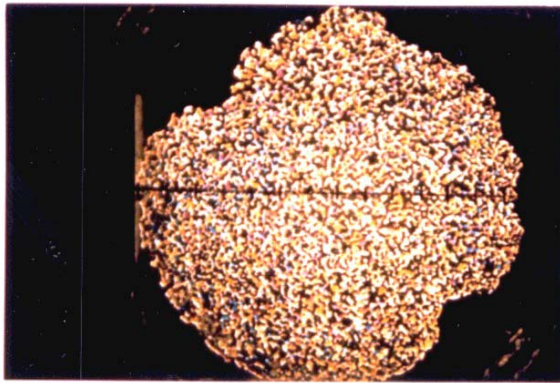
### 3.3.3 AUSWERTUNG UND UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Die mit dem oben beschriebenen Verfahren erhaltenen Strukturbilder sind in den Abb. 3.10a-k (nächste Seite) für einige charakteristische Tiefen dargestellt.

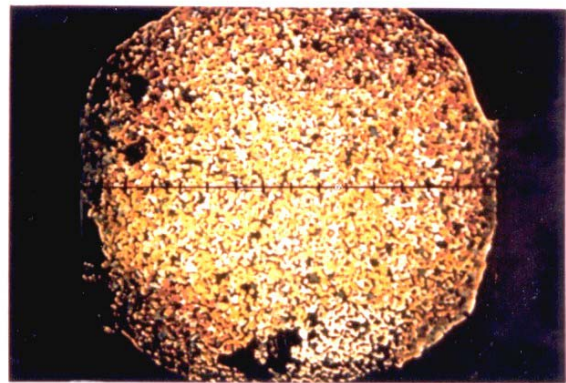
Bei den in Abb. 3.10a gezeigten oberflächennahen Proben sind die Körner kaum mit dem bloßen Auge zu unterscheiden. Sie sind durch zahlreiche Luftkanäle voneinander getrennt. Mit zunehmender Dichte verringert sich die Anzahl der Luftkanäle (Abb. 3.10b) durch ein stetiges Zusammenrücken der Eiskörner. Betrachtungen unter dem Mikroskop (Abb. 3.11a, b) verdeutlichen diesen Verdichtungseffekt in den oberen Bereichen, der hier in einer Tiefe von 5 m bis 6 m zu der von Anderson et al, 1963 erwähnten kritischen Dichte von  $0,55 \text{ g/cm}^3$  führt.

Nach Überschreitung der dichtest möglichen Packung treten Kornverformungen auf, die zu einem Zusammenschmelzen mehrerer Körner führen. Dies ist aus den Abb. 3.10c-j sowie 3.11c-e deutlich erkennbar. Die Korngrößen nehmen bei gleichzeitiger Reduzierung der Kornanzahl und des Luftporenvolumens stetig zu. Schließlich sind nur noch vereinzelt Luftblasen zwischen oder in den Eiskörnern erkennbar (Abb. 3.11e). In einer Tiefe von ca. 55 m bis 60 m werden die noch verbliebenen Luftporen voneinander abgekapselt und der Übergang von Firn zu Schneeeis bei einer Dichte von ca.  $0,83 \text{ g/cm}^3$  ist erreicht.

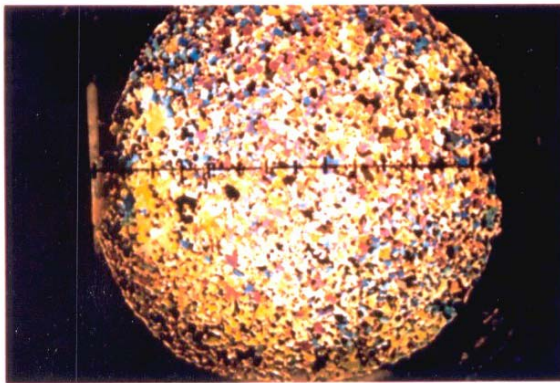
Das Kornwachstum infolge Rekristallisation wird neben der zunehmenden Belastung durch die mit der Tiefe ansteigende Temperatur (siehe Abb. 3.7b) im Schelfeis begünstigt. Besonders deutlich zeigt sich der Temperatureinfluss am Beispiel des Strukturbildes aus 201 m Tiefe (Abb. 3.10k). In der von der Unterseite des Schelfeises stammenden Probe muss, eventuell bedingt durch An- und Abschmelzvorgänge, ein überproportionales Kornwachstum stattgefunden haben.



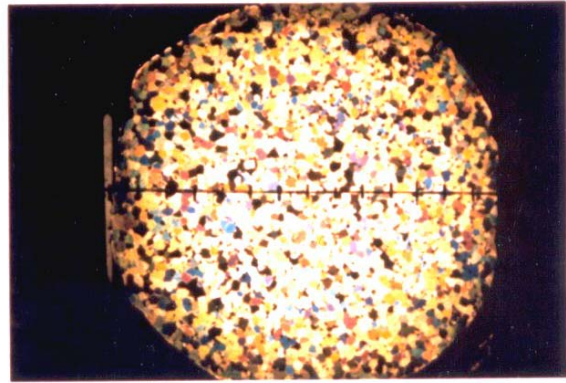
a)  $z = 1,9 \text{ m}$   $\rho = 0,463 \text{ g/cm}^3$



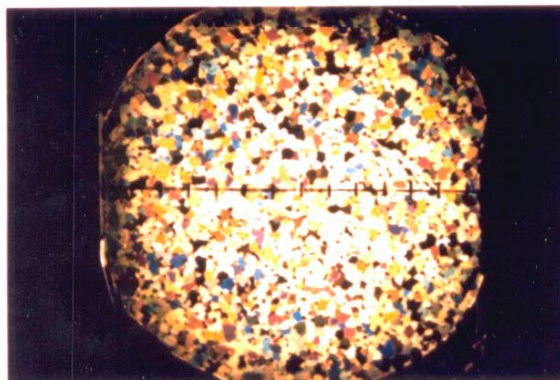
b)  $z = 5,0 \text{ m}$   $\rho = 0,555 \text{ g/cm}^3$



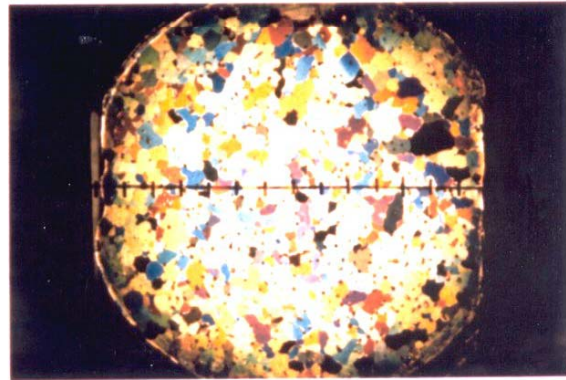
c)  $z = 20 \text{ m}$   $\rho = 0,666 \text{ g/cm}^3$



d)  $z = 30 \text{ m}$   $\rho = 0,735 \text{ g/cm}^3$



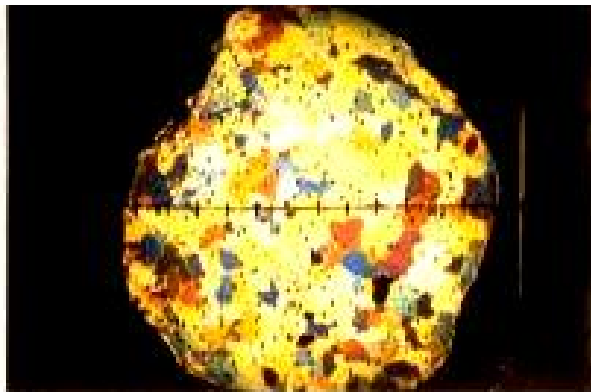
e)  $z = 40 \text{ m}$   $\rho = 0,777 \text{ g/cm}^3$



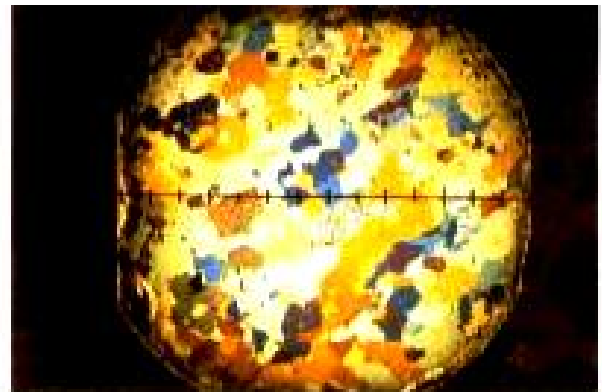
f)  $z = 60 \text{ m}$   $\rho = 0,880 \text{ g/cm}^3$

0 2 cm

Abb. 3.10 a-f: Dünnschliffaufnahmen der Firn- und Eisgefüge aus unterschiedlichen Tiefen des Ekström-Schelfeises (nach Rodenheber, 1985)



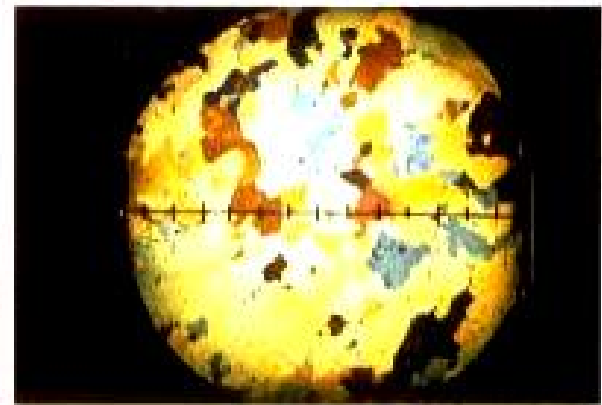
g)  $z = 106 \text{ m}$   $\rho = 0,904 \text{ g/cm}^3$



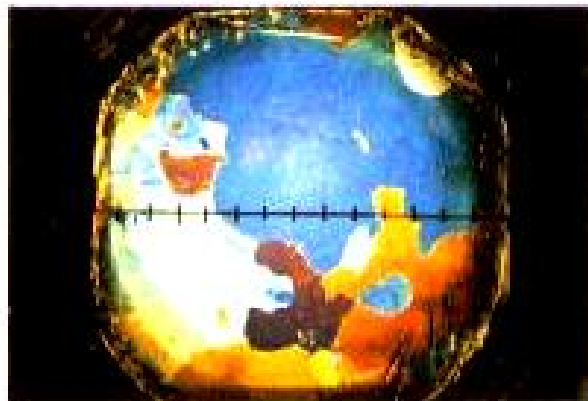
h)  $z = 140 \text{ m}$   $\rho = 0,912 \text{ g/cm}^3$



i)  $z = 161 \text{ m}$   $\rho = 0,914 \text{ g/cm}^3$



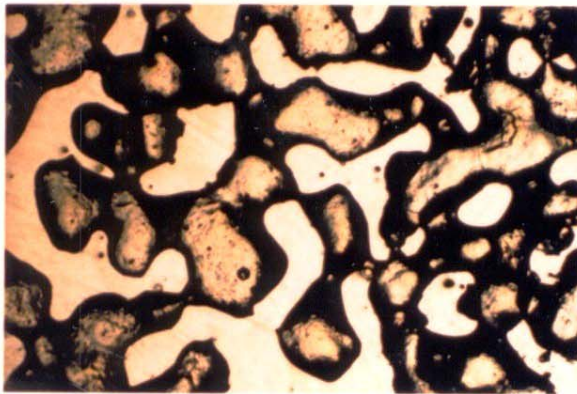
j)  $z = 174 \text{ m}$   $\rho = 0,913 \text{ g/cm}^3$



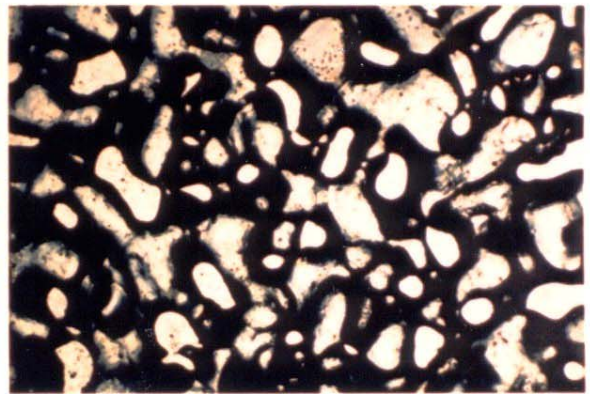
k)  $z = 201 \text{ m}$   $\rho = 0,913 \text{ g/cm}^3$

0      2 cm

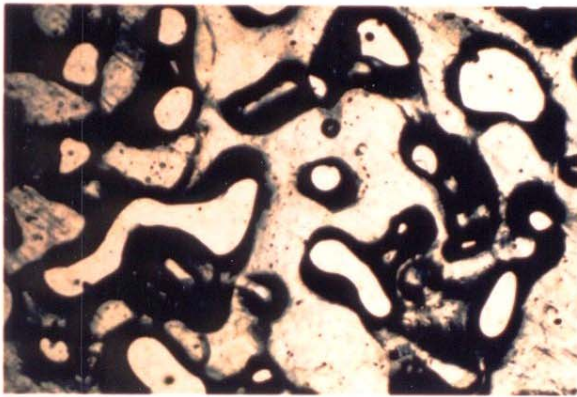
Abb. 3.10 g-k: Dünnschliffaufnahmen der Firn- und Eisgefüge aus unterschiedlichen Tiefen des Ekström-Schelfeises (nach Rodenheber, 1985)



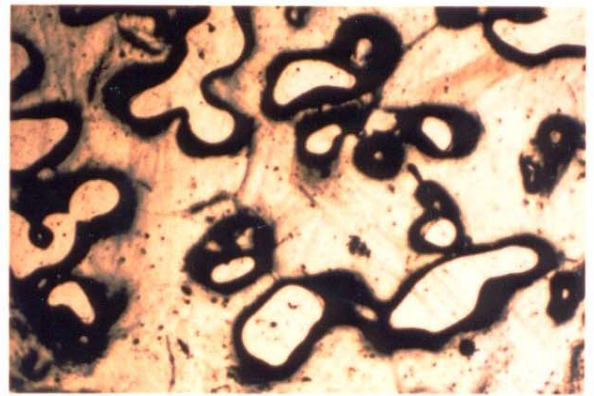
a)  $z = 1,9 \text{ m}$   $\rho = 0,463 \text{ g/cm}^3$



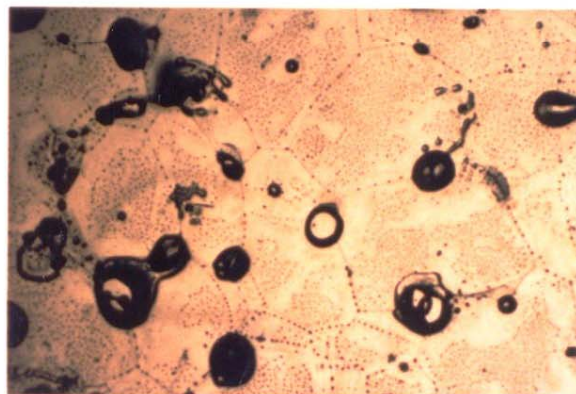
b)  $z = 5,7 \text{ m}$   $\rho = 0,564 \text{ g/cm}^3$



c)  $z = 10,5 \text{ m}$   $\rho = 0,618 \text{ g/cm}^3$



d)  $z = 20 \text{ m}$   $\rho = 0,660 \text{ g/cm}^3$



e)  $z = 58,6 \text{ m}$   $\rho = 0,828 \text{ g/cm}^3$

0 2 mm

Abb. 3.11 a-e: Mikroskopische Ansichten der Firn- und Eisgefüge aus unterschiedlichen Tiefen des Ekströmscheleises (nach Rodenheber, 1985)

Zur statistischen Auswertung werden aus diesen Bildern die Flächen der einzeln erkennbaren Eiskörner ermittelt und unter der Annahme runder Körner der Durchmesser bestimmt. Das arithmetische Mittel der Einzelkorndurchmesser ergibt den repräsentativen Korndurchmesser für die untersuchte Tiefenlage. Für Tiefen ab 20 m werden die Korngrößen durch Auszählen der Einzelkörner bezogen auf eine definierte Dünnschlifffläche ermittelt.

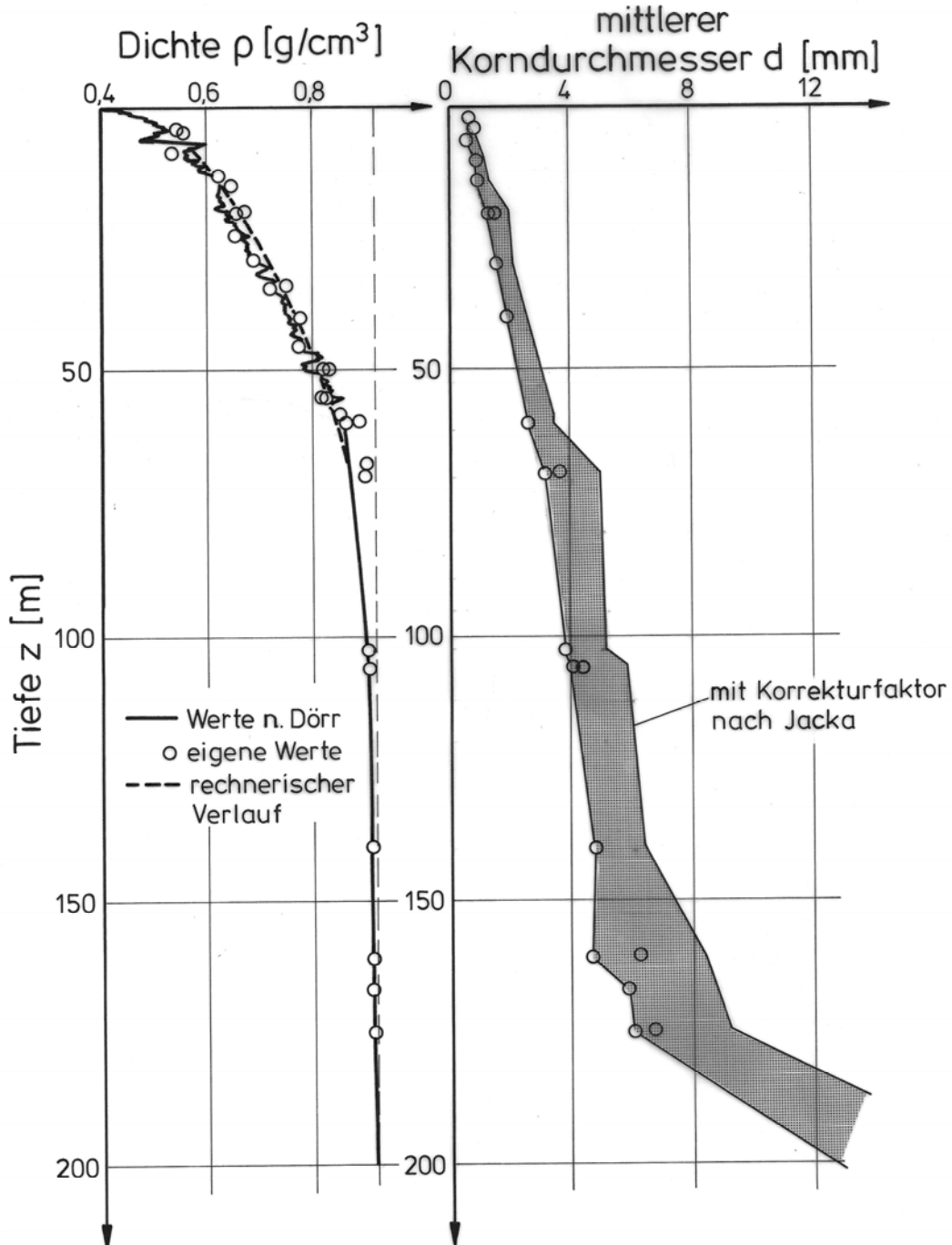


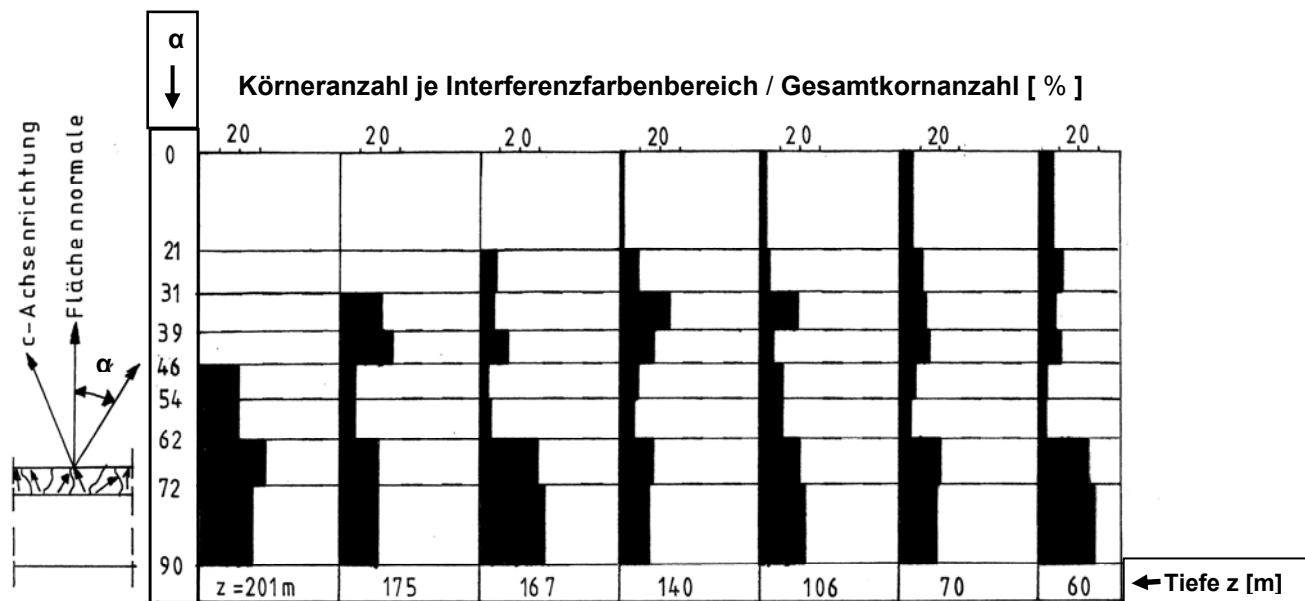
Abb. 3.12: Dichte- und Korngrößen-Tiefenprofil des Ekström-Schelfeises (nach Rodenheber, 1985)

Ausgezählt werden jeweils die Körner in einer Kreisfläche von 5 cm Durchmesser im Innenbereich der Dünnschliffe. Aus der Anzahl N der Körner und der Dünnschlifffläche F ergibt sich der gemittelte Korndurchmesser d aus:

$$\text{Gl. 3.1} \quad d = (4 \cdot F / (\pi \cdot N))^{1/2}$$

Da ein Dünnschliff nur einen zufälligen Schnitt durch eine Kornstruktur darstellt, bei dem nicht die Maximaldurchmesser der Körner angeschnitten werden, können die in Abb. 3.12 abhängig von der Tiefenlage dargestellten Korngrößen zu klein ausfallen. Nach Untersuchungen von Jacka, 1984a kann der Einfluss auf den Korndurchmesser durch die zufällige Schnittebene mit einem Faktor von 1,346 kompensiert werden. Die mit diesem Wert multiplizierten Korndurchmesser sind als obere Grenze in Abb. 3.12 eingetragen, so dass sich eine Bandbreite ergibt, in der die Korngrößen des hier untersuchten Ekströmprofils liegen.

In einer weiteren Untersuchung wurden die Strukturbilder aus Tiefen über 60 m hinsichtlich der c-Achsenorientierung ausgewertet. Abb. 3.13 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchungen.



**Abb. 3.13: Prozentuale Aufteilung der c-Achsenorientierungen für verschiedene Tiefen des Ekström-Schelfeises**

Körnern mit gleichen Interferenzfarben wurden Farbgruppen zugeordnet und die Kornanzahl pro Farbgruppe auf die Gesamtkornanzahl des betrachteten Dünnschliffes bezogen. Die Darstellung erfolgt in Form eines Stufendiagramms. Jeder Farbgruppe entspricht ein Winkelbereich der c-Achsenorientierung. Je nach Häufigkeit der Körner mit gleichen Farben ergibt sich ein prozentualer Anteil dieser Orientierungsrichtung im Gesamtdünnschliff. Die Verteilung lässt erkennen, ob eine c-Achsenausrichtung stattgefunden hat, oder ob eine zufällige Verteilung vorliegt. Allerdings kann mit dieser Methode nicht die genaue Orientierung angegeben werden, wie dies mit einer stereographischen Projektion, durchgeführt auf einem

Universaldrehtisch, möglich ist. Jedoch reichen diese Untersuchungen aus, um die Anisotropie der c-Achsenverteilung beurteilen zu können. Die Auswertung der c-Achsenorientierung konnte infolge der geringen Korngrößen in den oberen Bereich des Schelfeises erst ab 60 m Tiefe durchgeführt werden.

Erkennbar ist eine teilweise Ausrichtung in dem Bereich von 62° bis 90° hinein. Generell ist jedoch eine Hauptorientierung der c-Achsen bis in 200 m Tiefe nicht zu erkennen.

Für die später durchgeführten Laborversuche ergab sich somit nicht die Notwendigkeit bevorzugte Belastungsrichtungen relativ zur Probe zu untersuchen. Es wird Homogenität der Proben hinsichtlich der c-Achsenorientierung angenommen.

### 3.4 DICHTEPROFIL

Sorge, 1935 stellte auf Grund von Untersuchungen in Grönland fest, dass bei stationären Temperaturbedingungen und fehlender Schmelzung das Dichte-Tiefenprofil einer bestimmten Lokation stets den gleichen Verlauf zeigt. Ausgehend von Dichte-Tiefen Funktionen, die aus gemessenen Werten abgeleitet werden, können nach Bader, 1953 unter Berücksichtigung von Sorge's Gesetz, Zusammenhänge zwischen Verformungen und Spannungen in einer Eiskappe hergestellt werden.

Die in dem Dichteverlauf der Abb. 3.12 gestrichelt eingetragene Kurve ist eine funktionale Näherung der gemessenen Dichte-Tiefenbeziehung und wird durch den Potenzansatz der Gl. 3.2 beschrieben.

$$\text{Gl. 3.2} \quad \rho(z) = \rho_0 + d \cdot (z/z_0)^b$$

Da Gl. 3.2 Grundlage für die Bestimmung von Spannungen und Viskositäten ist, werden die dimensionsbehafteten Parameter  $\rho_0$  und  $d$  in den Basiseinheiten [kN] und [m] ermittelt.

Für das Ekström-Schelfeis ergaben sich aus Regressionsanalysen  $d$  zu 0,6 kN/m<sup>3</sup> und  $b$  zu 0,49. Zur Herstellung der Dimensionstreue dient  $z_0$  und beträgt 1 m. Mit einer Dichte von 4,0 kN/m<sup>3</sup> an der Oberfläche folgt für die Dichteverteilung des Ekström-Schelfeises

$$\text{GL. 3.3} \quad \rho(z) = 4,0 + 0,6 \cdot (z'' )^{0,49} \quad [\text{kN/m}^3]$$

mit  $z'' = z/z_0$

Der gemessene Verlauf wird bis in ca. 70 m Tiefe durch Gl. 3.3 wiedergegeben. Der Firn-Eisübergang bei einer Dichte von 8,3 kN/m<sup>3</sup> ergibt sich nach Gl. 3.3 bei einer Tiefe von 56 m.

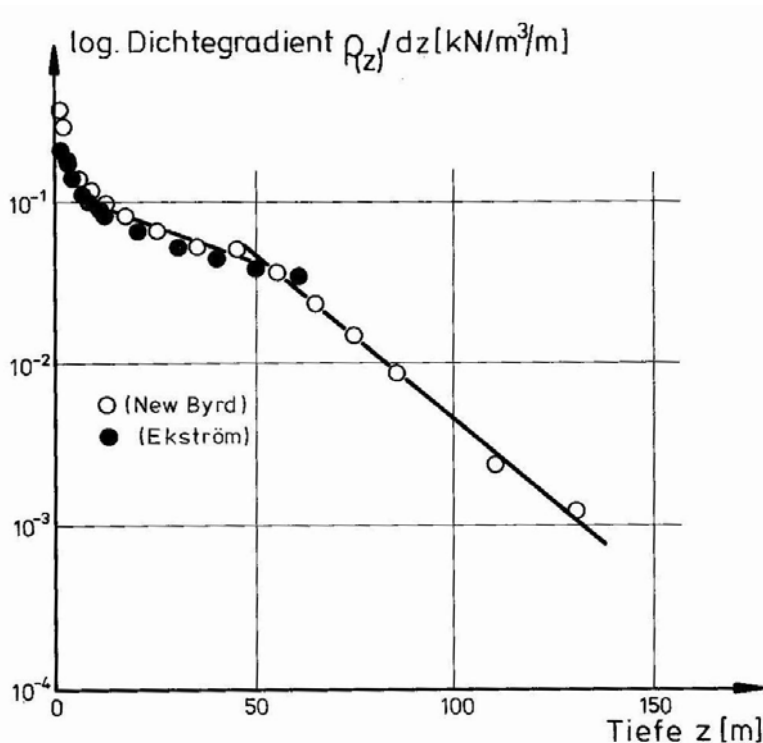


Dörr, 1984 bestimmte an Bohrkernen des Filchner-Ronne-Schelfeises den Dichteverlauf bis in 14 m Tiefe. Unter Anwendung von Gl. 3.2 kann die dortige Dichte-Tiefenverteilung mit Gl. 3.4 beschrieben werden.

$$\text{Gl. 3.4} \quad \rho(z) = 3,5 + 0,54 \cdot (z'')^{0,58} \quad [\text{kN/m}^3]$$

Aus der Ableitung der Gl. 3.3 nach der Tiefe ergibt sich der in Abb. 3.14 halblogarithmisch dargestellte Verlauf des Dichtegradienten, der mit Gl. 3.5 beschrieben wird

$$\text{Gl. 3.5} \quad \rho(z) / dz = 0,294 \cdot (z'')^{-0,51} \quad [\text{kN/m}^3]$$



**Abb. 3.14: Dichtegradient gegen die Tiefe (Vergleich mit Kohnen et al, 1973)**

Die halblogarithmische Auftragung von  $\rho(z)/dz$  über die Tiefe verdeutlicht die starke Dichtezunahme in den oberen Firnschichten. Da die Korngröße nahezu linear mit der Tiefe zunimmt, können Rekristallisationsvorgänge diese starke Verdichtung nicht bewirken, sondern sie ist, wie Anderson et al, 1963 feststellten, durch die Umlagerung der Eiskristalle erfolgt. Für die New Byrd Station bestimmten Kohnen et al, 1973 die kritische Tiefe, bis zu der die Verdichtung maßgeblich durch dichteres Packen der Firnkörner hervorgerufen wird zu 10 m. Einen ähnlichen Verlauf wie bei der Byrd Station weist der Dichtegradient des Ekström-Schelfeises auf. Eine Änderung im Verdichtungsmechanismus ist hier in ca. 5 bis 6 m Tiefe zu beobachten.

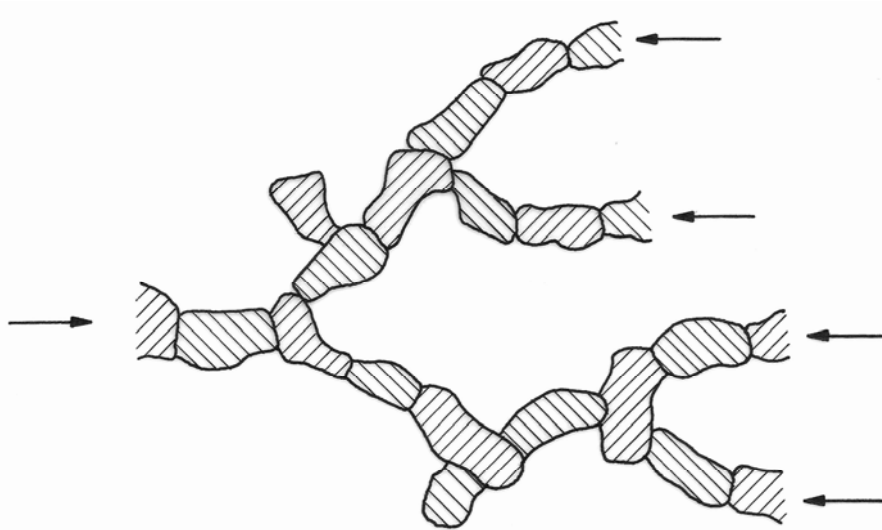
#### 4. MECHANISCHES VERHALTEN VON FIRN UND EIS

Das mechanische Verhalten polykristalliner Stoffe wird durch die Struktur und die Kristalleigenschaften des Materials, sowie durch die Belastungsgröße und -geschwindigkeit bestimmt.

Verformungsbestimmende Strukturparameter für Firn sind die Korngröße und Kornform, der Abstand der Einzelkörner sowie die Ausbildung der Verbindungsglieder. Lastseitig wird nach Körner, 1964 das Verformungsverhalten durch die Geschwindigkeit der Lastaufbringung und durch die Orientierung der c-Achsen zur Wirkungsrichtung der Belastung maßgeblich beeinflusst.

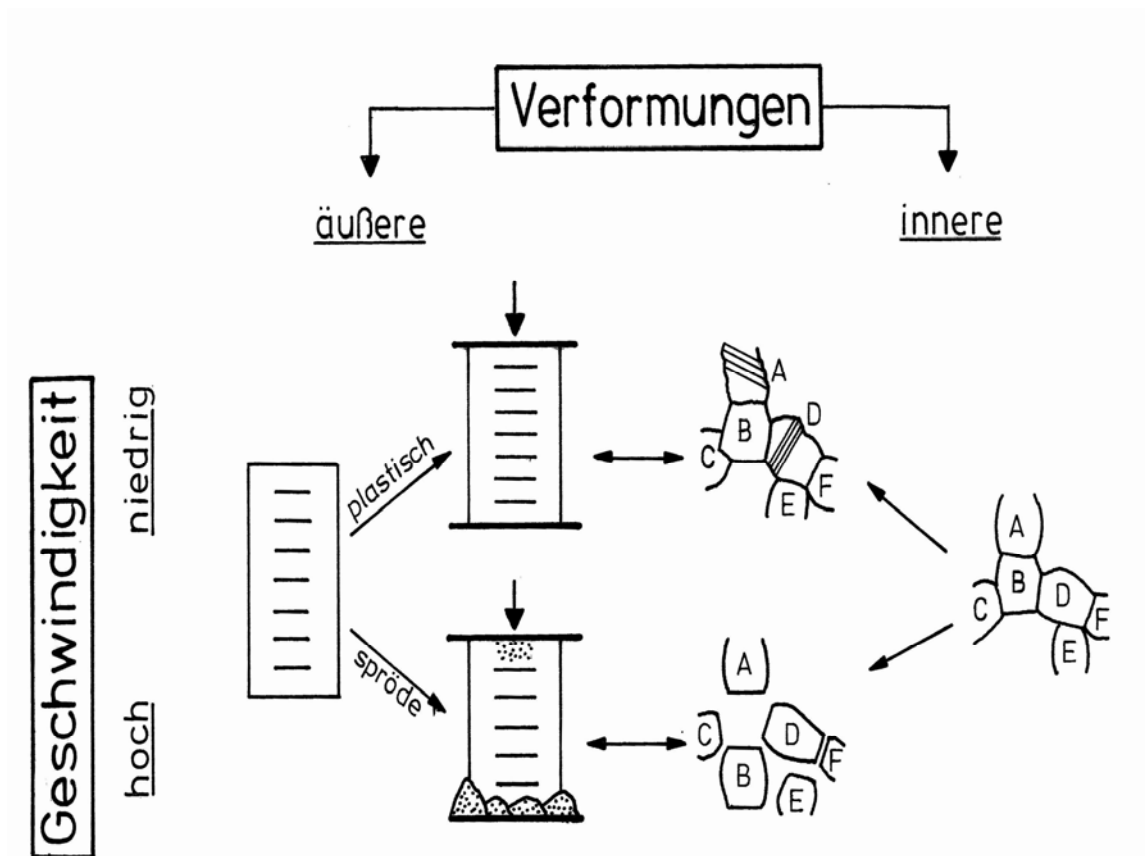
##### 4.1 VERFORMUNGSGESCHWINDIGKEIT UND KRIECHVERHALTEN

Bei der Belastung einer Firnstruktur wird die Kraft, wie in Abb. 4.1 dargestellt, durch die über Verbindungsglieder kettenförmig aneinander gereihten Eiskörner der Eismatrix weitergeleitet.



**Abb. 4.1: Schematische Darstellung des Kraftflusses durch die kettenförmige Struktur des Firns (St. Lawrence et al, 1981)**

Abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit treten Deformationen an den Korngrenzen oder im Inneren der Kristalle auf. Abb. 4.2 verdeutlicht das Verhalten einer Firnstruktur bei hohen und geringen Verformungsraten.

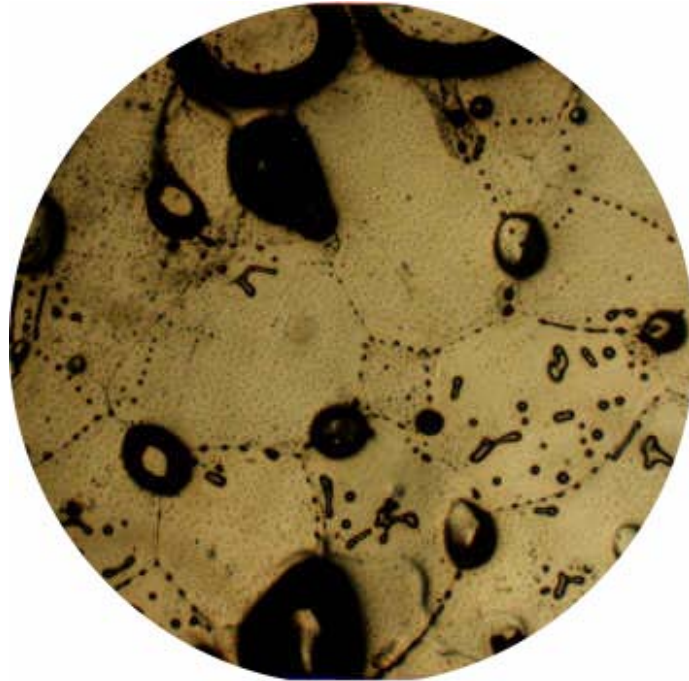


**Abb. 4.2: Mechanisches Verhalten von Firn bei hohen und bei niedrigen Verformungsraten (Kinosita, 1967)**

Auf hohe Verformungsgeschwindigkeiten reagiert Firn spröde. Es treten keine oder nur geringe plastische Verformungen ein. Die schnell ansteigende Spannung führt an den schwächsten Stellen der Firnstruktur - den Kornverbindungen - zum Versagen bei Erreichen der Bruchspannung.

Geringe Verformungsraten führen zunächst zu einer plastischen Verformung der Verbindungs-glieder. Die stabileren Eiskörner weichen in den vorhandenen Porenraum und werden, falls hier kein weiteres Ausweichen mehr möglich ist, ebenfalls plastisch deformiert.

Kinosita, 1967 simulierte diesen Verdichtungsprozess im Labor und dokumentierte die schrittweise Verdichtung durch Dünnschliffaufnahmen. Diese zeigten, dass nach Eintreten des Korn-zu-Korn Kontaktes der Porenraum einerseits durch Kornvergrößerung infolge Sinterung und andererseits durch das Zusammenrücken infolge der Belastung reduziert wird. Bei anhaltender Belastung werden die Luftporen voneinander isoliert und vollständig von den Eiskörnern eingekapselt. Wie Abb. 4.3 zeigt, vollzieht sich die Einkapselung der Luftporen an den Korngrenzen bzw. beim Verschmelzen einzelner Körner im neu entstandenen Korn.



**Abb. 4.3: Luftporeneinschlüsse in polykristallinem Eis**

St. Lawrence et al, 1981 geben, basierend auf eigenen Versuchen, drei Bereiche der Verformungsrate an, in denen verschiedene Verformungsmechanismen dominierend sind.

- Für Bereiche kleiner  $10^{-6}\text{s}^{-1}$  wird der Verformungsprozess maßgeblich durch die plastischen Verformungen der Eiskörner bestimmt.
- Verformungsraten, die größer als  $10^{-5}\text{s}^{-1}$  sind, führen zu Brüchen einzelner Kornverbindungen, aus denen großflächige Bruchebenen resultieren und die zu einem Versagen der Probe führen.
- Im Zwischenbereich überlagern sich plastische Kornverformungen und Kornverbindungsbrüche.

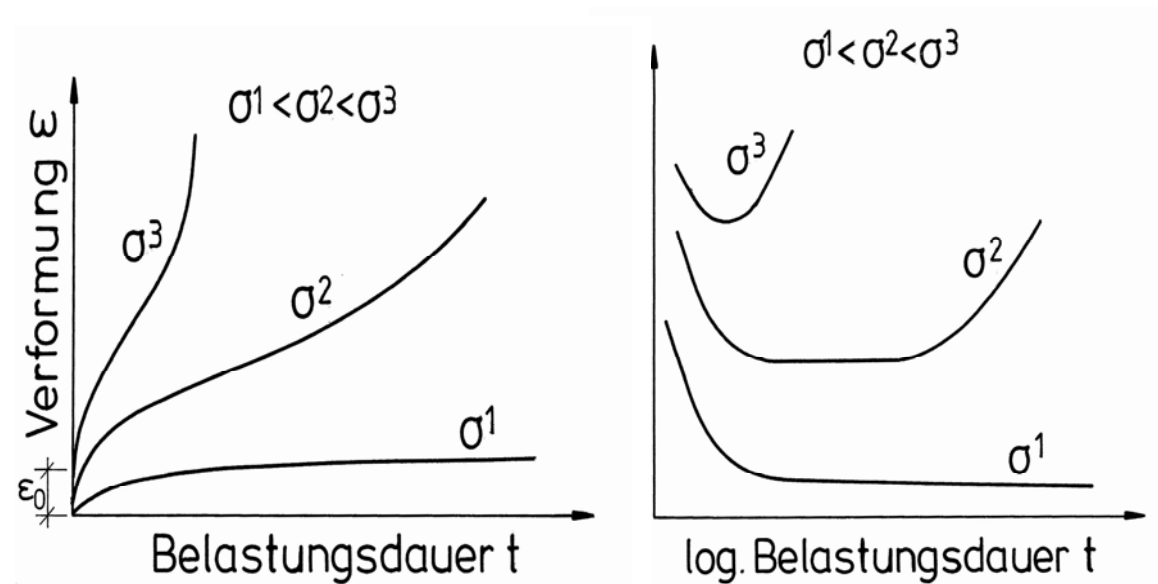
Zusammenfassend kann gefolgert werden, dass eine durch Lastaufbringung hervorgerufene Verformungsrate zu einer Verdichtung der Probe infolge Kornwanderung in den Porenraum führt. Infolge der Verdichtung reduziert sich bei anhaltender konstanter Belastung die Verformungsrate.

Dadurch erfolgt die weitere Verdichtung sowohl durch Kornwanderung in den Porenraum, als auch durch eine plastische Verformung der Eiskörner, begleitet von Kornwachstum infolge Rekristallisation.

Während bei Feststoffen, wie zum Beispiel Fels, das rheologische Verhalten unter den natürlichen Temperaturen eine untergeordnete Rolle spielt und die Festigkeit die maßgebende Sicherheit gegenüber dem Bruchzustand definiert, zeichnet sich Firn und Eis durch gute Verformbarkeit aus. Ähnlich wie bei gefrorenem Boden oder Salzgestein wird die Standsicherheit durch das zeitliche Spannungs-Verformungsverhalten geprägt. Die dabei noch zu berücksichtigenden Einflüsse werden nachfolgend diskutiert.

## 4.2 EINFLÜSSE AUF DAS KRIECHVERHALTEN

Das Zeit-Verformungsverhalten von Firn geben Abb. 4.4 und 4.5 für unterschiedliche konstante Druckspannungen wieder.



**Abb. 4.4:** Kriechkurven für Firn bei unterschiedlichen Spannungen

**Abb. 4.5:** Doppelt-logarithmische Darstellung der Verformungsrate über die Belastungsdauer

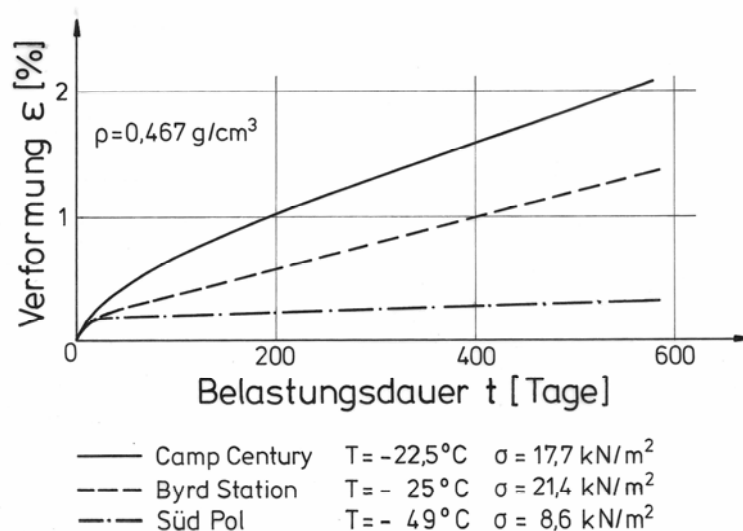
Nach Aufbringung einer Belastung stellt sich, abhängig von der Belastungsgröße, eine sofortige elastische Verformung ein. Dieser folgt eine Übergangskriechphase deren Dauer nach Ramseier et al, 1964 von folgenden Faktoren abhängt:

- Je geringer die Firndichte, umso länger hält das Übergangskriechen an.
- Eine Verminderung der Firntemperatur oder eine Erhöhung der Belastung reduziert die Dauer, in der eine Abnahme der Verformungsgeschwindigkeit stattfindet.

Während dieser Übergangskriechphase werden die Eiskörner in der Eismatrix zusammengepresst. Durch die Reduzierung des Porenraumes tritt eine Verfestigung der Probe ein, was zu einer Abnahme der Verformungsgeschwindigkeit führt. Dieser als Primärphase bezeichnete Kriechprozess mündet zum Zeitpunkt  $t_2$  in eine quasi-stationäre Kriechphase mit nahezu konstanter Verformungsrate (siehe Verlauf für  $\sigma^1$ ) oder führt bei hohen Belastungen nach Durchlaufen einer kurzen stationären Kriechphase zum Zeitpunkt  $t_3$  zu einem Anstieg der Verformungsrate ( $\sigma^2$  bzw.  $\sigma^3$ ). Durch den Anstieg der Verformungsgeschwindigkeit in der tertiären Phase kommt es zu Brüchen der Kornverbindungen, die zu einem Versagen der Firnstruktur führt.

#### 4.2.1 SPANNUNGSABHÄNGIGKEIT

Aus den in Abb. 4.6 dargestellten Versuchen von Ramseier et al, 1964 ist zu erkennen, dass sich bei sehr geringen Spannungen eine "quasi-stationäre" Kriechrate einstellt, die solange anhält, solange die Belastung wirkt. Weil sich die Kriechrate trotz scheinbarer zeitlicher Unabhängigkeit weiterhin geringfügig reduziert, wird der Begriff quasi-stationär verwendet.



**Abb. 4.6: Kriechversuche an Firnproben verschiedener Lokationen (Ramseier et al, 1964)**

Danach scheint sich selbst bei sehr geringen Spannungen kein Gleichgewichtszustand einzustellen, der zu einem Ende des Übergangskriechens führen würde. Bader, 1960 nennt drei Spannungsbereiche, in denen die Verformungsrate unterschiedliche Spannungsabhängigkeiten zeigt. Wie aus Abb. 4.7 ersichtlich, existiert für Firn im Spannungsbereich bis 60 kN/m<sup>2</sup> eine lineare Abhängigkeit. Für polykristallines Eis gibt Hutter, 1983 eine Grenzspannung von 100 kN/m<sup>2</sup> für linear viskoelastisches Verhalten an. Bei höheren Spannungen steigt die Verformungsrate überproportional an.

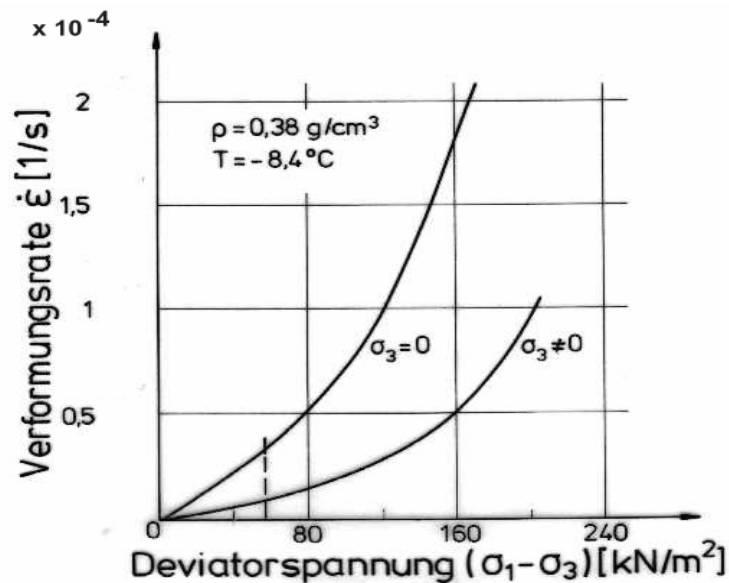


Abb. 4.7: Spannungs- Verformungsrate Relation für Firn (aus Mellor, 1964)

Aus Abb. 4.7 wird ebenfalls ersichtlich, dass bei Einwirkung von Seitendrücken ( $\sigma_2, \sigma_3 > 0$ ), geringere Kriechraten zu erwarten sind. Der Einfluss des Seitendruckes auf die Festigkeit von Eis scheint nach Paterson, 1983 nur gering zu sein. Jones, 1982 bestätigt dies durch triaxiale Druckversuche an polykristallinem Eis. Wie aus Abb. 4.8 ersichtlich, nimmt der Einfluss des Seitendruckes auf die Festigkeit mit abnehmender Verformungsrate ab. Bei einer Verformungsrate von  $1,4 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  ist der Einfluss des Seitendruckes bis  $70 \text{ MN/m}^2$  vernachlässigbar.

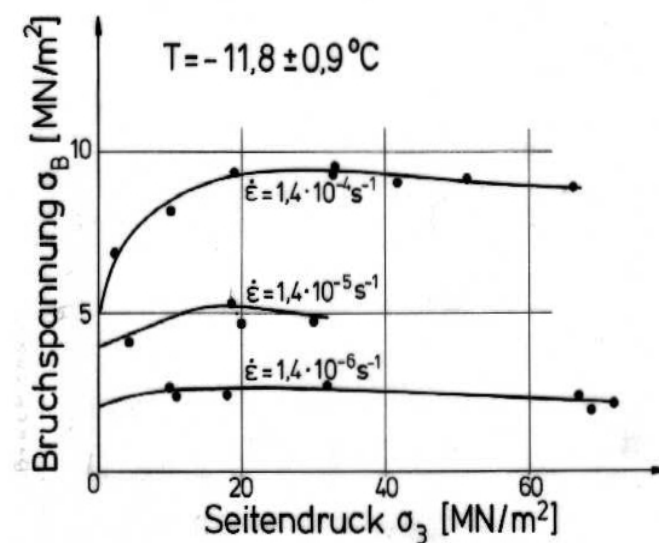
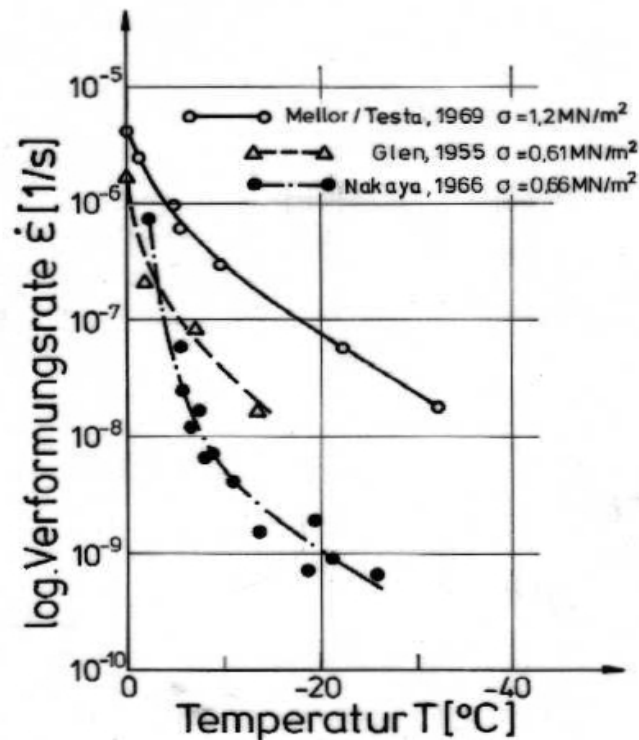


Abb. 4.8: Bruchspannungen von polykristallinem Eis in Abhängigkeit vom Seitendruck für verschiedene Verformungsrate (Jones, 1982)

## 4.2.2 TEMPERATURABHÄNGIGKEIT

Die Verformungsrate nimmt bei konstanter Belastung und Dichte mit steigender Temperatur zu. Abb. 4.9 zeigt für polykristallines Eis die Auftragung der stationären Verformungsraten als Funktion der Temperatur für unterschiedliche Spannungen.



**Abb. 4.9: Minimale Verformungsgeschwindigkeit polykristallinen Eises als Funktion der Temperatur für verschiedene Spannungen**

Für den Anstieg der Verformungsgeschwindigkeit mit steigender Temperatur ergibt sich bis  $-10^{\circ}\text{C}$  bei logarithmischer Auftragung eine Gerade. Oberhalb von  $-10^{\circ}\text{C}$  steigt die Verformungsrate überlinear an. Für Temperaturen unter  $-10^{\circ}\text{C}$  kann nach Mellor et al, 1969 basierend auf einem Ansatz von Glen, 1954 der Zusammenhang zwischen Verformungsgeschwindigkeit und Temperatur über einen temperaturabhängigen Faktor  $a$  hergestellt werden.

$$\text{Gl. 4.1} \quad a = \dot{A} \cdot e^{-Q/(R \cdot T)} / e^{-Q/(R \cdot T_0)}$$

mit  $Q$  Aktivierungsenergie  
 $T$  Temperatur in  $^{\circ}\text{K}$   
 $R$  = Gaskonstante =  $1,987 \text{ cal/mol}$

$\dot{A}$  strukturabhängiger Parameter ( $T_0$ )  
 $a$  strukturabhängiger Parameter ( $T$ )



Nach Mellor, 1966 liegt die Aktivierungsenergie je nach Dichte des Firns zwischen 10 und 20 kcal/mol. Hutter, 1983 gibt für polykristallines Eis einen Bereich von 12 bis 16 kcal/mol an.

#### 4.2.3 DICHTABHÄNGIGKEIT

Mit zunehmender Dichte des Firns nimmt die Zusammendrückbarkeit ab. Der Einfluss der Dichte auf den Verformungswiderstand wird für den linearen stationären Spannungs-Verformungsbereich durch die Definition einer effektiven Druckviskosität beschrieben.

Bader, 1953 leitete, basierend auf Untersuchungen von Sorge, 1935 Zusammenhänge zwischen der Druckviskosität und der Dichte aus Dichte-Tiefenprofilen ab. Unter der Voraussetzung einer linearen Abhängigkeit zwischen der Verformungsrate und der durch die Firnauflast erzeugten Spannung folgt die Druckviskosität aus

$$\text{Gl. 4.2} \quad \eta_c = \sigma_v / (d\varepsilon_v/dt)$$

Aus langfristigen Messungen an einem 20 m tiefen Firnschacht geben Ambach et al, 1985 die Abhängigkeit der Verformungsrate von der Dichte und der Spannung durch eine Funktion an, die infolge des gewählten Potenzansatzes für die Spannungen auch für den nichtlinearen Spannungs-Verformungsbereich anwendbar ist.

#### 4.3 STOFFGESETZE FÜR FIRN UND EIS

Die Abhängigkeit des zeitlichen Verformungsverhaltens von den materialbedingten Einflüssen und den angreifenden Lasten wird durch Stoffgesetze beschrieben. Als materialbedingte Einflussgrößen von Firn und Eis sind die Orientierung der c-Achsen, die Größe und Form der Körner, die Kornverbindungen, sowie der Abstand der Einzelkörner zu nennen.

Aufbauend auf Laboruntersuchungen von Kry, 1975 leiteten St.Lawrence et al, 1981 eine Beziehung ab, die das einaxiale Verformungsverhalten von Firn durch drei Strukturparameter beschreibt. Diese Ansätze, mit denen das Verformungsverhalten durch direkte physikalische Deutungen erfasst werden, erscheinen durch die erforderlichen umfangreichen Voruntersuchungen und der Inhomogenität des natürlich abgelagerten Firns im mikroskopischen Bereich ungeeignet, um auf die praktisch orientierten Ingenieurfragestellungen angewandt zu werden. Deshalb werden für praktische Anwendungen wissenschaftlich weniger exakte Stoffgesetze genutzt, die aus Beobachtungen des Verformungsverhaltens von Proben

abgeleitet werden, deren Abmessungen ein Vielfaches der in Abb. 4.1 dargestellten verzweigten Ketten aus Eiskörnern betragen.

Zur Beschreibung zeitabhängiger Vorgänge werden empirische Beziehungen oder rheologische Modelle benutzt. Die empirischen Stoffgesetze basieren auf theoretischen Ansätzen, die das beobachtete Verformungsverhalten durch die Wahl geeigneter Parameter annähern.

#### 4.3.1 RHEOLOGISCHE MODELLE

Rheologisch betrachtet ist Firn ein nichtlinear viskoelastisches Material. Nichtlinear viskos, da auch unter sehr geringen Spannungen kontinuierlich Verformungen auftreten, die wie in Abb. 4.7 dargestellt, ab einer Grenzspannung überlinear ansteigen. Für den linearen Spannungs-Verformungsbereich und bei kleinen Verformungen ist nach Mellor, 1966 der in der in Abb. 4.10 gezeigte Burgers Körper anwendbar.

Die Serienschaltung eines Maxwell und eines Voigt-Kelvin Modells führt zu dem in Abb. 4.10 dargestellten Kriechverhalten. Bei Belastungsbeginn treten zeitunabhängige Sofortverformungen auf, die bei Belastungsende vollständig zurückgewonnen werden. Ihre Größe bestimmt die Federsteifigkeit  $E_0$  des Maxwell Modells. Die Länge der Primärkriechphase, die sich durch eine kontinuierliche Abnahme der Verformungsrate auszeichnet, wird durch die Retardationszeit des Voigt-Kelvin Modells bestimmt. Am Ende der Übergangskriechphase stellt sich eine über die Zeit nahezu konstante Verformungsrate ein.

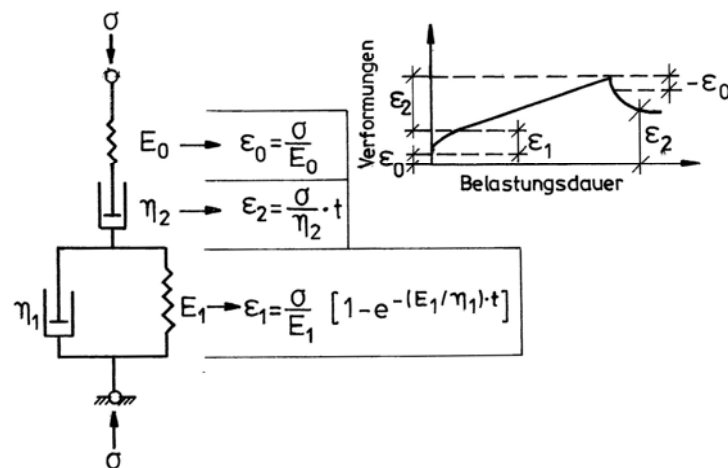


Abb. 4.10: Rheologisches Modell des Burgers Körper und zeitabhängiges Verformungsverhalten von Firn (Mellor, 1966)

Bei konstanter Spannung hängen die sekundären Verformungen von der Viskosität des Dämpfers im Maxwell Modell ab. Die Gesamtverformung ergibt sich aus der Summe der Einzelanteile nach Gl. 4.3.

$$\text{Gl. 4.3} \quad \varepsilon = \sigma \left\{ \frac{1}{E_0} + \frac{t}{\eta_2} + \frac{1}{E_1} \left[ 1 - e^{-t/\tau} \right] \right\}$$

Durch die Verdichtung des Firns tritt eine Verfestigung ein, durch die der in Abb. 4.10 linear dargestellte Verformungsverlauf nichtlinear wird (quasi-stationär). Bei langzeitigen Kriechprozessen dominieren die Verformungsanteile des Maxwell Modells. Unter Vernachlässigung des Voigt-Kelvin Modells, dessen Retardationszeit  $\tau$  verglichen mit der Gesamtkriechdauer kurz ist, ergibt sich der in der Gl. 4.2 beschriebene Zusammenhang zwischen der Verformungsrate und der Spannung.

Durch eine dichteabhängige Druckviskosität, die unter Berücksichtigung der Verdichtung des Firns inkrementweise zur Ermittlung der Verformungsrate errechnet wird, simuliert Dörr, 1984 die zeitliche Abnahme der Kriechrate. Die nichtlineare Spannungs-Verformungsbeziehung kann jedoch damit nicht erfasst werden.

#### 4.3.2 EMPIRISCHE ANSÄTZE

Die Abhängigkeit der stationären Verformungsrate von der Spannung beschreibt Glen, 1954 für polykristallines Eis durch ein Potenzgesetz.

$$\text{Gl. 4.4} \quad \frac{d\varepsilon}{dt} = a \cdot \sigma^B$$

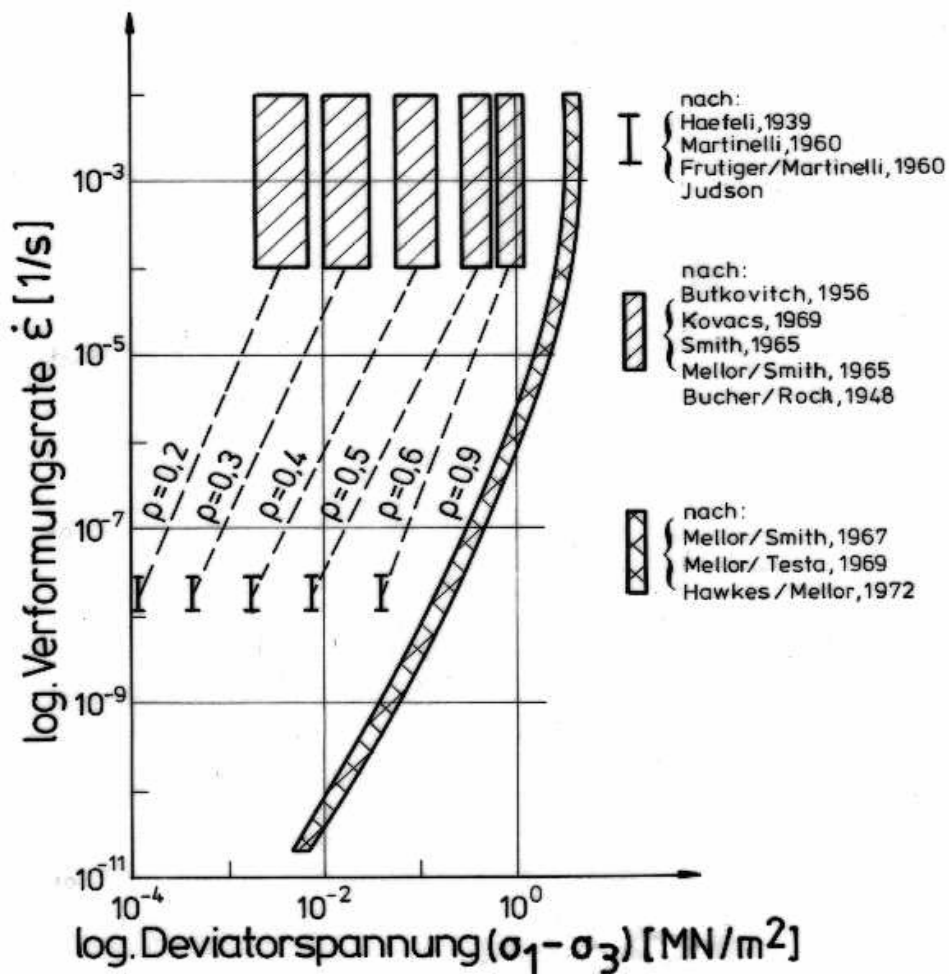
Für inkompressibles Eis ist der Kriechmodul  $a$  ein temperaturabhängiger Parameter und kann aus Gl. 4.1 bestimmt werden. Der Spannungsexponent  $B$  ist ein Maß für die Nichtlinearität der Spannungs-Verformungsratebeziehung. Für den Fall  $B=1$  liegt eine lineare Abhängigkeit vor, die mit  $a=1/\eta_c$  durch das rheologische Modell des Dämpfers beschrieben wird. Paterson, 1983 schlägt, basierend auf sorgfältig durchgeführten Auswertungen von Verformungsmessungen in polaren Eiskappen, für  $B$  einen Wert von 3 vor.

Haefeli et al, 1968 legten ihren Untersuchungen über das Verformungsverhalten von Firn ebenfalls das Potenzgesetz nach Gl. 4.4 zugrunde. Der Spannungsexponent beträgt abhängig vom Spannungszustand  $B=1$  für den linearen bzw.  $B=3$  für den nichtlinearen Bereich.

Unter der Annahme, dass für Firn der Parameter  $a$  in Gl. 4.4 von der Dichte des Firns abhängt, geben Ambach et al, 1985 basierend auf Verformungsmessungen an einem Firnschacht eine

gleichlautende Relation an. Ermutigt durch die von Mellor, 1974 zusammengestellten Spannungs-Verformungsratebeziehungen für unterschiedliche Firndichten, die in Abb. 4.11 gezeigt sind, übernehmen sie auch für Firn den für polykristallines Eis überwiegend verwendeten Spannungsexponenten  $B=3$ .

Erkennbar sind die annähernd gleichen Neigungen der für gleiche Dichten extrapolierten Geraden. Daraus kann gefolgert werden, dass die Spannungs-Verformungsrate Beziehung für Firn mit gleichen Spannungsexponenten wie für Eis beschrieben werden kann.



**Abb. 4.11: Zusammenstellung indirekt ermittelter Spannungs-Verformungsratebeziehungen für Firn und Eis (Mellor, 1974)**

Einen anderen empirischen Ansatz zur Beschreibung des Kriechverhaltens von Firn wählten Ramseier et al, 1964. Durch die Verdichtung des Firns wird der in Abb. 4.6 gezeigte Verformungsverlauf durch eine kontinuierliche Abnahme der Verformungsrate geprägt. Mit Gl. 4.5 werden die Verläufe der Kriechkurven angenähert.

Gl. 4.5

$$\epsilon = \epsilon_0 + D \cdot t^C$$

D und C sind Konstanten, die von der Temperatur und der Beschaffenheit des Firns abhängen. Der Zeitexponent C kann nach doppeltlogarithmischer Auftragung der Verformungen über die Belastungsdauer ermittelt werden. In dieser Form von Ramseier et al, 1964 ausgewertete Kriechversuche an Firn gibt Abb. 4.12 wieder.

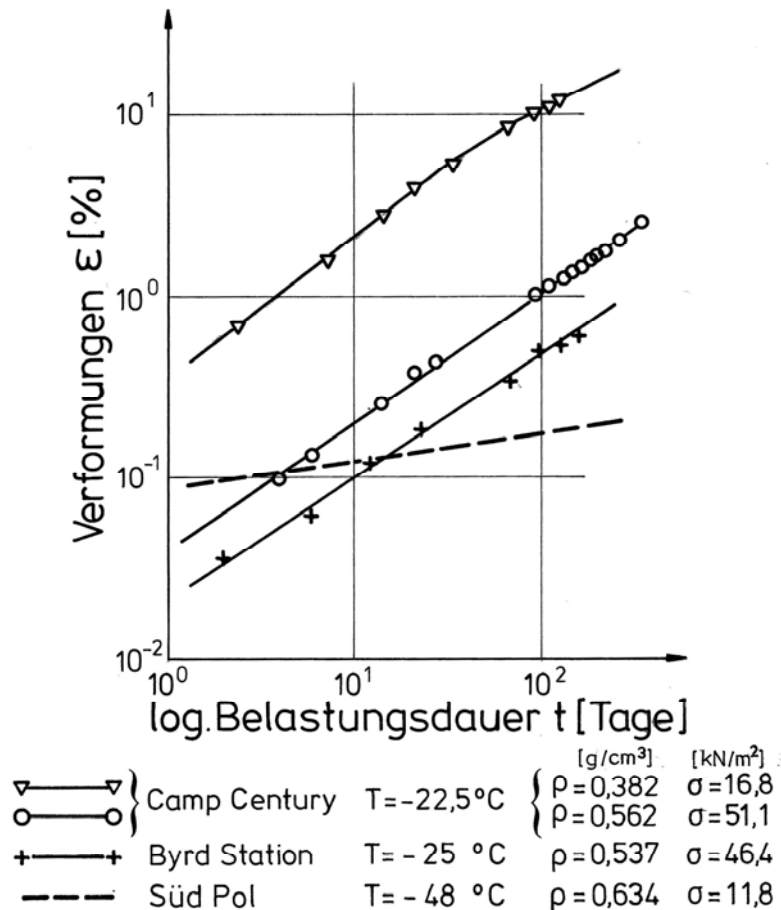


Abb. 4.12: Kriechversuche aus verschiedenen Feldstationen der Antarktis und Grönlands in doppelt-logarithmischer Darstellung (nach Ramseier et al, 1964)

Dargestellt sind die Ergebnisse aus Kriechversuchen an Firnproben verschiedener Dichten von Camp Century, der Byrd Station und dem Südpol.

Aus der Neigung der Geraden ergibt sich der Zeitexponent C. Obwohl die Dichten und die Spannungen der beiden Versuche von Camp Century unterschiedlich sind, sind die Geradenneigungen identisch und C ermittelt sich zu 0,69. Ein leichter Abfall des C-Wertes auf 0,64 ergibt sich bei der Byrd Station. Die Versuche am Südpol zeigen dagegen eine sehr viel geringere Neigung. Der entsprechende Exponent beträgt 0,145. Zieht man die unter-

schiedlichen Temperaturverhältnisse in Betracht, so entsteht der Eindruck, dass die Verformungsgeschwindigkeit bei tieferen Temperaturen schneller abnimmt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Gl. 4.4 die Nichtlinearität zwischen Verformungsgeschwindigkeit und Spannung erfasst, jedoch nicht die zeitliche Verfestigung durch die Verdichtung des Firns berücksichtigt, wie es in Gl. 4.5 mit einem Zeitexponenten  $C < 1$  erfolgt.

Die Integration der Gl. 4.4 in Gl. 4.5 über die Konstante D führt zu einem Exponentialgesetz, das von Klein, 1978 auf gefrorene Böden angewandt wurde. Nach Einsetzen der differentiellen Beziehung nach Gl. 4.4 für die Konstante D in Gl. 4.5 folgt:

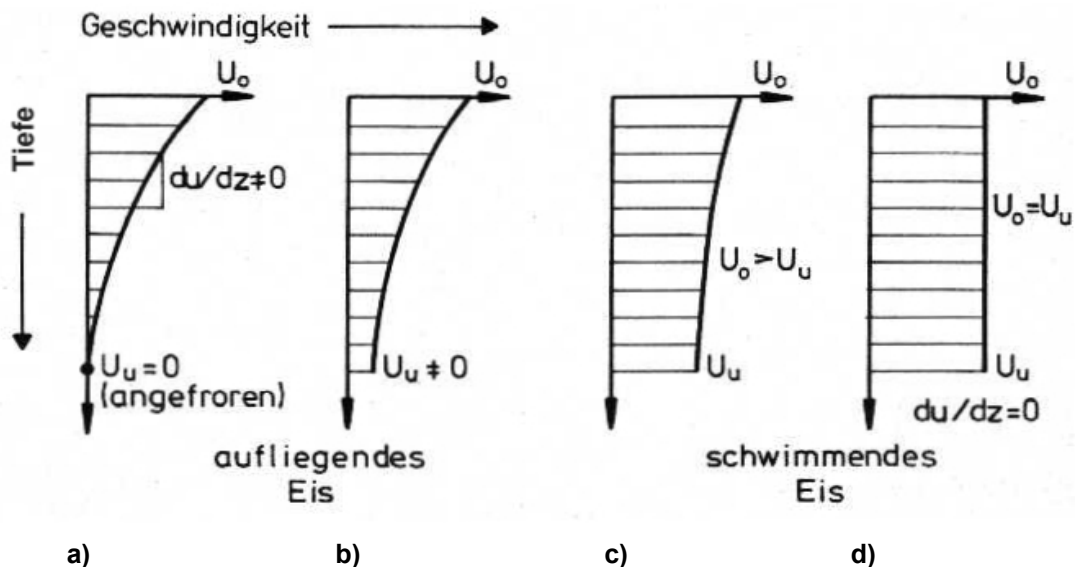
**Gl. 4.6** 
$$\varepsilon = \varepsilon_0 + A \cdot \sigma^B \cdot t^C$$

In Gl. 4.6 sind die Kriechverformungen exponentiell von den Spannungen und der Zeit abhängig. Bruchvorgänge könnten mit einem C-Wert  $> 1$  simuliert werden. Das in der Baupraxis geforderte langfristig stabile Verhalten ist nur gewährleistet, wenn die Verformungsgeschwindigkeit nicht zunimmt. Das ist dann der Fall, wenn der Zeitexponent C stets kleiner als eins ist.

## 5. ERMITTLUNG RHEOLOGISCHER KENNWERTE AUS FELDVERSUCHEN

Die Ableitung von Materialparametern aus Feldversuchen erfordert die Berücksichtigung der in-situ vorhandenen Verhältnisse. Die Verformungen der antarktischen Eiskappe bestehen aus den Setzungen der Firn- und Eisschichten, die von den meerwärts gerichteten horizontalen Fließbewegungen mehr oder weniger stark überlagert werden. Die Größe der horizontalen Verformungskomponente auf die Gesamtverformung hängt dabei von dem Widerstand ab, den die Eiskappe durch ihre Auflager- und Randbedingungen erfährt.

Die Eismassen, die sich von den höhergelegenen Punkten des antarktischen Kontinentes infolge Eigengewichts in Richtung Küste schieben, liegen im Kontinentalbereich auf dem Festland auf. Die in der Gleitfuge entstehende Reibung zwischen Fels und Eis führt zu einer, mit ansteigendem vertikalem Abstand von der Gleitfuge, zunehmenden horizontalen Fließgeschwindigkeit.



**Abb. 5.1: Schematische Darstellung von Geschwindigkeits-Tiefenverläufen bei unterschiedlichen Auflagerbedingungen der Eiskappe**

Unter der Annahme, dass das Eis am Fels festgefroren ist, ergibt sich in der Gleitfuge die in Abb. 5.1a dargestellte verschwindende horizontale Fließgeschwindigkeit  $u_u$ . An der Schneeoberfläche stellt sich die Oberflächengeschwindigkeit  $u_o$  ein, die geodätisch bestimmbar ist. Zwischen diesen beiden Werten ergibt sich ein Verlauf, der durch Neigungsmessungen in Bohrlöchern ermittelt werden kann.

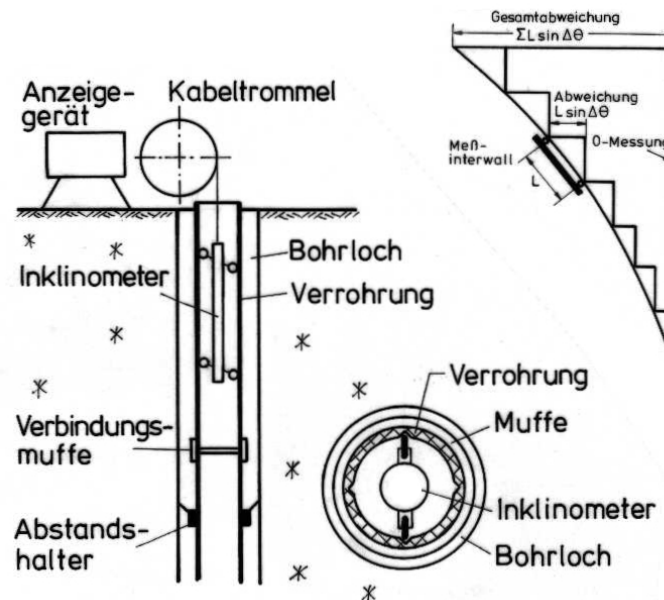
Andere Überlegungen gehen davon aus, dass zwischen Eis und Felsbett eine Gleitbewegung stattfindet, so dass  $u_u > 0$  ist (Abb. 5.1b).

Nach Thomas, 1979 ist in einem Schelfeis das keine Untergrundberührung hat, die horizontale Fließgeschwindigkeit weitgehend unabhängig von der Tiefe. Es werden nahe der grounding line, die in Abb. 5.1c gezeigten Geschwindigkeitsverläufe und in einem genügend großen Abstand Verläufe nach Abb. 5.1d angenommen. Dort können die Randeinflüsse auf den mittleren Bereich des Schelfeises vernachlässigt werden.

Demzufolge werden im Rahmen dieser Arbeit aus Setzungsmessungen in Bohrlöchern auf dem Ekström-Schelfeis nach Gl. 4.2 Druckviskositäten bestimmt, mit denen das lineare stationäre Kriechen beschrieben wird. Inwieweit die Setzungsmessungen von möglichen, mit der Tiefe veränderlichen Geschwindigkeitsgradienten in horizontaler Richtung beeinflusst werden, wurde durch Neigungsmessungen überprüft.

## 5.1 NEIGUNGSMESSUNGEN

Eine Möglichkeit zur Erfassung horizontaler Geschwindigkeitsprofile besteht in Bohrlochneigungsmessungen, die an geodätische Messungen der Oberflächenfließgeschwindigkeit angebunden werden. Dazu wurde in einem 73 m tiefen Bohrloch auf dem Ekström-Schelfeis ein Neigungsmessgerät eingesetzt, das auf dem Prinzip eines biaxialen Beschleunigungsaufnehmers beruht. Den Aufbau und das Funktionsprinzip des Gerätes zeigt Abb. 5.2.



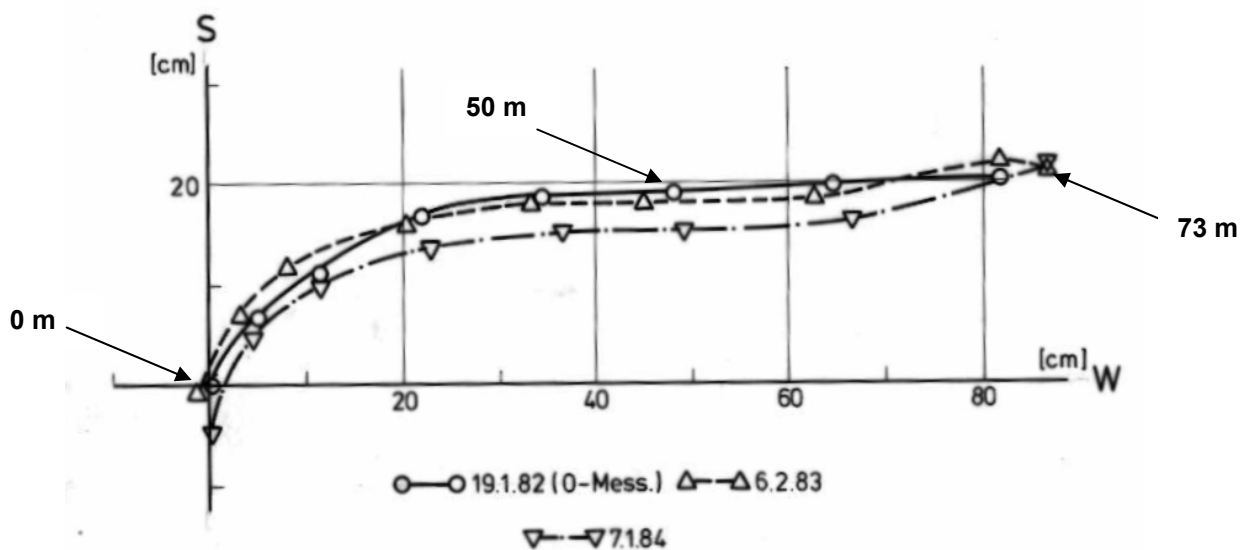
**Abb. 5.2: Geräteanordnung und Funktionsprinzip der Neigungsmessungen**

Eine Messverrohrung wurde unmittelbar nach Herstellung eines 73 m tiefen Bohrloches eingesetzt. Die Führung der Messsonde an einem markierten Kabel (zur Bestimmung der



Tiefenlage) in den Rillen eines Kunststoffrohres gewährleistet eine hohe Messgenauigkeit. Über ein digitales Anzeigegerät werden die Abweichungen der Sonde von der Vertikalen abgelesen. Es wurden Messungen direkt nach Einbau der Verrohrung im Januar 1982 und im Jahresintervall über zwei Jahre durchgeführt.

Die Zusatzeinrichtung Spiral Checking erlaubt eine Kontrolle eventueller gegenseitiger Verdrehungen der einzelnen Führungsrohre, um so die Neigungsrichtungen, bezogen auf die geographischen Verhältnisse an der Bohrlokation, zu erfassen. In Abb. 5.3 sind die in die Ebene projizierten Verschiebungen des Bohrloches dargestellt.



**Abb. 5.3: Ergebnisse der Neigungsmessungen auf dem Ekström-Schelfeis**

Die Abweichung der Bohrlochsohle gegenüber der ursprünglichen Bohrlochoberkante wurde bei allen Messungen als Fixpunkt gewählt, auf die die Verschiebungen der anderen Tiefenkoten bezogen wurden. Direkt nach Herstellung des Bohrlochs wich die Achse der Bohrlochsohle (in 73 m Tiefe) von der Bohrlochoberkante um ca. 21 cm in Südrichtung und ca. 87 cm in Westrichtung ab. Die sich in Abb. 5.3 nach links anschließenden Markierungen repräsentieren die Abweichungen des Bohrlochs in 70 m, 60 m, 50 m etc. bis hinauf zur Firnoberfläche (0 m) des Südsommers 1982.

Die zu unterschiedlichen Zeitpunkten protokollierten Messverläufe über die Tiefe sind nur gegenseitig versetzt, ansonsten aber nahezu identisch. Aus der 0-Messung ist erkennbar, dass der Bohrer in den oberen weichen Firnschichten (bis ca. 20 m) gleichmäßig nach Süd und West abwich (ca. 0,6 cm/m). Bis in 50 m Tiefe nimmt der Neigungsgradient in Südrichtung kontinuierlich bis auf 0 ab, während in Westrichtung eine Zunahme bis auf fast 1,7 cm/m festzustellen ist.

Die nach zwei Jahren ermittelten Abweichungen der Bohrlochvertikalen von der 1982 erstellten Bohrlochachse zeigen keine tiefenabhängige Tendenz. Der maximale Geschwindigkeitsunterschied ergibt sich aus der auf die festgehaltene Bohrlochsohle bezogene Abweichung in 50 m Tiefe und beträgt ca. 2 cm/Jahr.

Während den Antarktisexpeditionen 1979/80 bis 1982/83 führte Köhler, 1983 umfangreiche Untersuchungen über das Fließverhalten an der Oberfläche des Ekström-Schelfeises nahe der Georg-von-Neumayer-Station durch. Dabei ermittelte er Eisbewegungen von 165 m/Jahr. Verglichen mit dieser Fließgeschwindigkeit sind die im Bohrloch gemessenen Abweichungen gering (ca. 0,01%). Deshalb kann an der Bohrlokation ein konstantes Geschwindigkeitsprofil bis in 73 m Tiefe angenommen werden.

Für die nun folgende Ermittlung der Druckviskositäten aus den Setzungsmessungen sind demnach Einflüsse aus den horizontalen Fließbewegungen vernachlässigbar.

## 5.2 SETZUNGSMESSUNGEN

Infolge des Firneigengewichtes werden die Firnschichten zusammengedrückt. Zur Erfassung der Schichtsetzungen wurde ein Setzungsmessgerät eingesetzt, dessen Schema in Abb. 5.4 dargestellt ist.

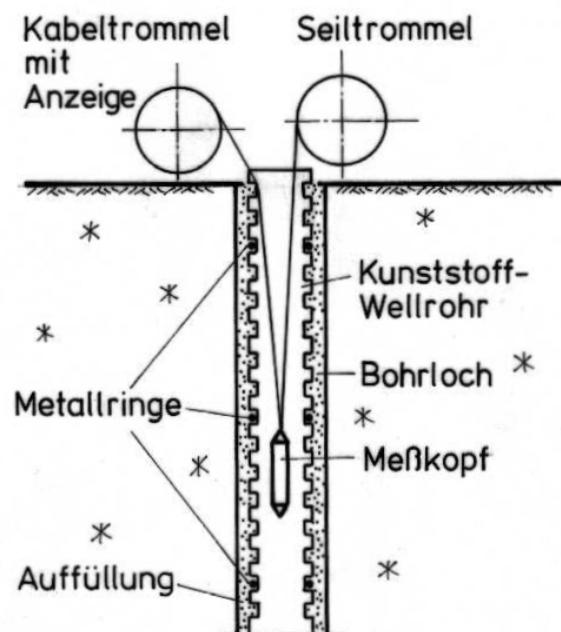
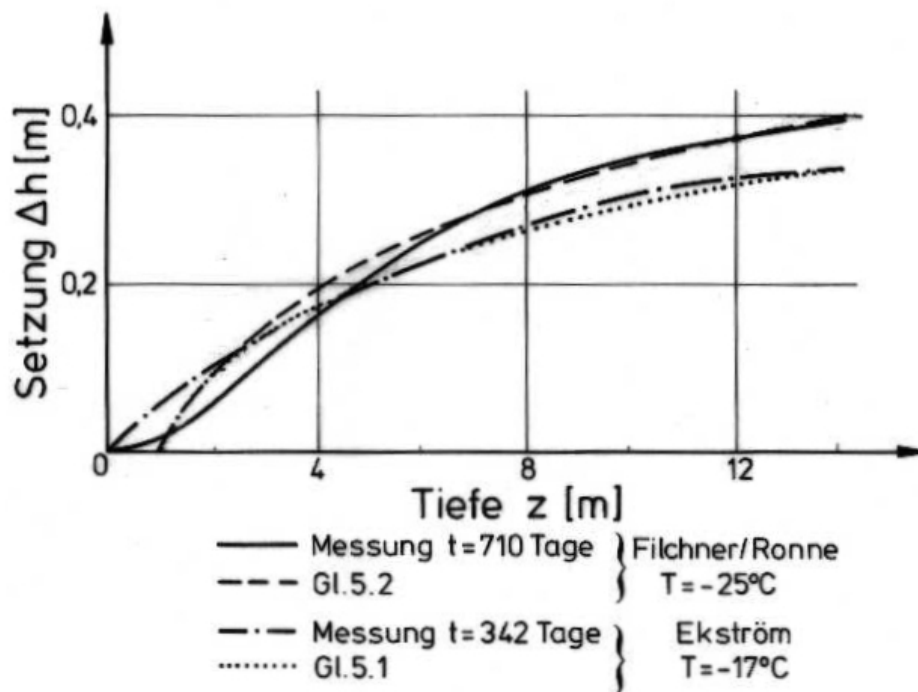


Abb. 5.4: Geräteanordnung zur Setzungsmessung

Ein Bohrloch wird mit einem flexiblen gewellten Kunststoffrohr ausgekleidet. In den Wellen sind in bestimmten Abständen Metallringe eingearbeitet. Die Lage der Ringe, die durch die Haftung zwischen umgebenden Firn und dem Wellrohr die Setzungen der Firnschichten mitmachen, wird mit einer Metallmesssonde eingemessen. Aus Folgemessungen wird die tiefenabhängige Zusammendrückung der Schichten zwischen zwei Metallringen für ein Zeitintervall bestimmt.

Das System wurde während der Antarktiskampagne 1980/81 in einem 50 m tiefen Bohrloch auf dem Ekström-Schelfeis und in ein 14 m tiefes Bohrloch auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis eingebaut. Die Nulllage der Metallringe wurde eingemessen. Wiederholungsmessungen nach 342 Tagen (Ekström) und nach 710 Tagen (Filchner-Ronne) ergaben die in Abb. 5.5 gezeigten Setzungen.



**Abb. 5.5: Ergebnisse der Setzungsmessungen auf dem Ekström- und dem Filchner-Ronne-Schelfeis**

Die beiden Verläufe der Abb. 5.5 zeigen einen mit der Tiefe abnehmenden Setzungsgradienten. Das deutet darauf hin, dass die Firnverfestigung und damit der Viskositätsanstieg infolge der Dichtezunahme stärker ausgeprägt sind als der Spannungszuwachs infolge der akkumulierten Firnschichten.

Der Vergleich der beiden Messungen lässt erkennen, dass die Filchner-Ronne-Setzungen nach fast doppelter Dauer von 710 Tagen nur geringfügig kleiner sind, als die nach 342 Tagen auf Ekström gemessenen. Eine Begründung liefert die Abb. 3.5 aus der zu erkennen ist, dass

die Dichten und damit auch die daraus resultierenden wirksamen Spannungen bei niedrigeren Temperaturen geringer sind (Jahresmitteltemperatur Ekström: ca. -17°C; Filchner-Ronne: ca. -25°C). Die um 8°C niedrigere Jahresmitteltemperatur im Filchner-Ronne-Schelfeis führt damit zu einer Erhöhung der Firnzähigkeit.

Hinsichtlich der Berechnungsansätze betrachten wir zunächst den Verlauf der Setzungs-Tiefen Profile die in Abb. 5.5 dargestellt sind. Diese werden für die beiden Lokationen durch die Gleichungen 5.1 und 5.2 angenähert.

$$\text{Gl. 5.1 (Ekström)} \quad \Delta h_{(z)} = (4 \cdot 10^{-4} \cdot z + 0,1255 \cdot z_0) \cdot \ln(z'') \quad [\text{m}]$$

$$\text{Gl. 5.2 (Filchner/Ronne)} \quad \Delta h_{(z)} = (5,3 \cdot 10^{-4} \cdot z + 0,144 \cdot z_0) \cdot \ln(z'') \quad [\text{m}]$$

mit  $z_0 = 1 \text{ m}$ , gültig für  $z'' = (z/z_0)$  mit  $z =$  die betrachtete Tiefenlage

Die Funktionsverläufe sind in Abb. 5.5 dargestellt. Mit der Kenntnis des Tiefen-Dichteverlaufs und des Tiefen-Setzungsverlaufs können die, zur Beschreibung des linear viskosen Verhaltens benötigten, dichteabhängigen Druckviskositäten ermittelt werden.

### 5.3 ABLEITUNG DER STATIONÄREN LINEAREN DRUCKVISKOSITÄT

Die Setzungen des Schelfeises in Bereichen ohne zusätzliche Geländeaufasten hängen von der Dichte des Firms ab. Mit zunehmender Tiefe nehmen die Firndichte und die Spannung zu. Die Zusammendrückbarkeit des Firms verringert sich. Setzt man konstante Temperaturverhältnisse voraus, so sind für die Setzungen in unterschiedlichen Tiefen zwei Faktoren maßgebend.

- Die Spannungen, verursacht durch die Firnauflast, die von der Dichte bestimmt wird.
- Die Zusammendrückbarkeit des Firms, ebenfalls abhängig von der Dichte.

Daraus wird deutlich, dass der Dichte-Tiefenverlauf eine wichtige Basisfunktion zur Erfassung des Setzungsverhaltens ist.

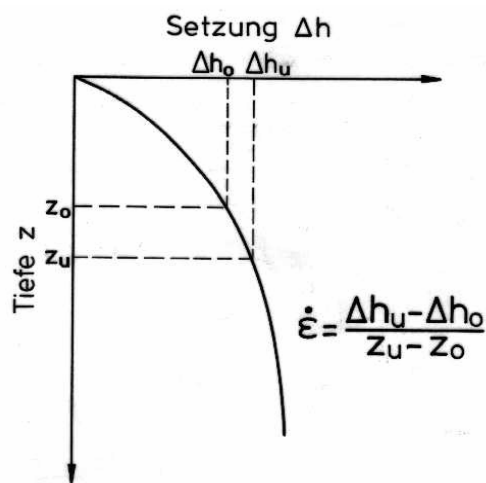
Firn verhält sich, wie in Kap. 4.2.1 gezeigt, bei Spannungen unterhalb von 60 kN/m<sup>2</sup> linear viskoelastisch. Der Zusammenhang zwischen der Verformungsrate und der Spannung wird durch Gl. 4.2 unter Anwendung des Maxwellmodells hergestellt. Die dichteabhängige Zähigkeit des Dämpfers wird als Druckviskosität bezeichnet und kann bestimmt werden, wenn die Spannungs-Tiefen- und die Setzungs-Tiefenverläufe bekannt sind.

Die mit der Tiefe zunehmende Spannung ergibt sich aus der Integration der Gl. 3.3 für das Ekström- bzw. Gl. 3.4 für das Filchner-Ronne-Schelfeis.

**Gl. 5.3 (Ekström)**  $\sigma_v = 4 \cdot z'' + 0,403 \cdot (z'')^{1,49}$  [kN/m<sup>2</sup>]

**Gl. 5.4 (Filchner-Ronne)**  $\sigma_v = 3,5 \cdot z'' + 0,342 \cdot (z'')^{1,58}$  [kN/m<sup>2</sup>]

Zur Festlegung des Seitendrucks für die in Kapitel 6 beschriebenen Laborversuche wird auf die Gl. 5.3 zurückgegriffen. Das weitere Vorgehen zur Ermittlung der Verformungsrate in Abhängigkeit von der Tiefe ist schematisch in Abb. 5.6 dargestellt.



**Abb. 5.6: Prinzipielles Vorgehen zur Ermittlung der Verformungsrate**

Die für ein Zeitintervall gemessene Setzungsdifferenz ( $\Delta h_u - \Delta h_0$ ) wird auf eine Schichtdicke ( $z_u - z_0$ ) bezogen. Damit folgt Gl. 5.5.

**Gl. 5.5**  $d\varepsilon/dt = (\Delta h_u - \Delta h_0) / (z_u - z_0)$

Nach Einführung der Differentiale  $d\Delta h$  und  $dz$  und Differentiation der Gl. 5.1 bzw. 5.2 ergeben sich die Verformungsraten für die Messintervalle aus:

**Gl. 5.6a (Ekström)**  $d\varepsilon/dt = 4 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + \ln z'') + 0,1255/z''$

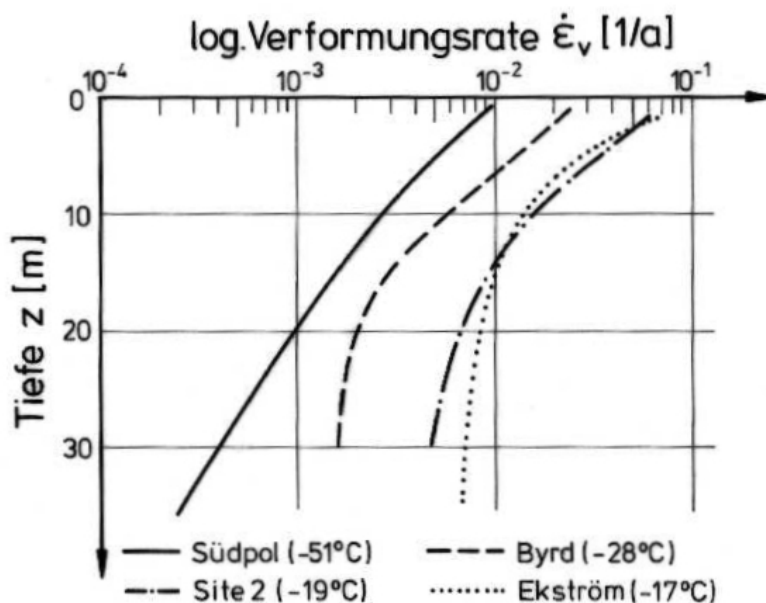
**Gl. 5.6b (Filchner/Ronne)**  $d\varepsilon/dt = 5,3 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + \ln z'') + 0,144/z''$

Zur Vereinheitlichung der Zeitintervalle werden die tatsächlichen Beobachtungszeiträume linear auf ein Jahr interpoliert.

Gl. 5.7a (Ekström)  $d\varepsilon/dt = 4,27 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + \ln z'') + 0,134/z''$  [1/a]

Gl. 5.7b (Filchner-Ronne)  $d\varepsilon/dt = 2,725 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + \ln z'') + 0,074/z''$  [1/a]

Für beide Lokationen ist ein schneller Abfall zu verzeichnen, der hauptsächlich in den oberen lockeren Firnschichten stattfindet. Der Vergleich der Gl. 5.7a mit 5.7b ergibt, dass die Verformungsraten auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis dabei an der Oberfläche deutlich niedriger liegen und in tieferen Regionen einen geringeren Anstieg aufweisen als auf dem Ekström-Schelfeis. Vergleiche mit anderen Lokationen zeigen ähnliche Verläufe. Mellor, 1969 stellte Ergebnisse aus Feldbeobachtungen und Berechnungen zusammen, die teilweise in Abb. 5.7 wiedergegeben sind.



**Abb. 5.7: Vergleich des Verformungsrate-Tiefenverlaufs für Ekström mit anderen Lokationen (Mellor, 1969)**

Die Verformungsraten bei Site 2 und im Ekström-Schelfeis liegen in der gleichen Größenordnung. Dagegen sind an der kälteren Byrd Station die Verformungsraten wesentlich geringer. Eine nochmalige Reduzierung der Verformungsraten zeigt sich am extrem kalten Südpol.

Wie bereits in Abb. 3.5 erkennbar, nimmt die Dichte bei höheren Temperaturen mit der Tiefe schneller zu. Die mit der Verdichtung verbundene Verfestigung ist demnach größer als der Spannungszuwachs. Daraus resultiert eine Abnahme der Verformungsrate.

Die Druckviskosität wird nun unter Anwendung der Gl. 4.2 aus den Gl. 5.3 bzw. Gl. 5.4 und Gl. 5.7a bzw. Gl. 5.7b bestimmt. Die Abhängigkeit der Tiefe  $z''$  von der Dichte wird durch die Umstellung der Gl. 3.3 bzw. Gl. 3.4 beschrieben.

$$\text{Gl. 5.8a (Ekström)} \quad z'' = ((\rho - 4) / 0,6)^{2,041}$$

$$\text{Gl. 5.8b (Filchner-Ronne)} \quad z'' = ((\rho - 3,5) / 0,54)^{1,724}$$

Für die Umrechnung der bisher benutzten Einheiten auf die Einheit der Viskosität (Poise [P]) ergibt sich in den folgenden Gleichungen ein Faktor von  $3,1536 \cdot 10^{11}$ . Bei den Berechnungen in den Basiseinheiten [MN], [m] und [h] beträgt der Faktor 8,76.

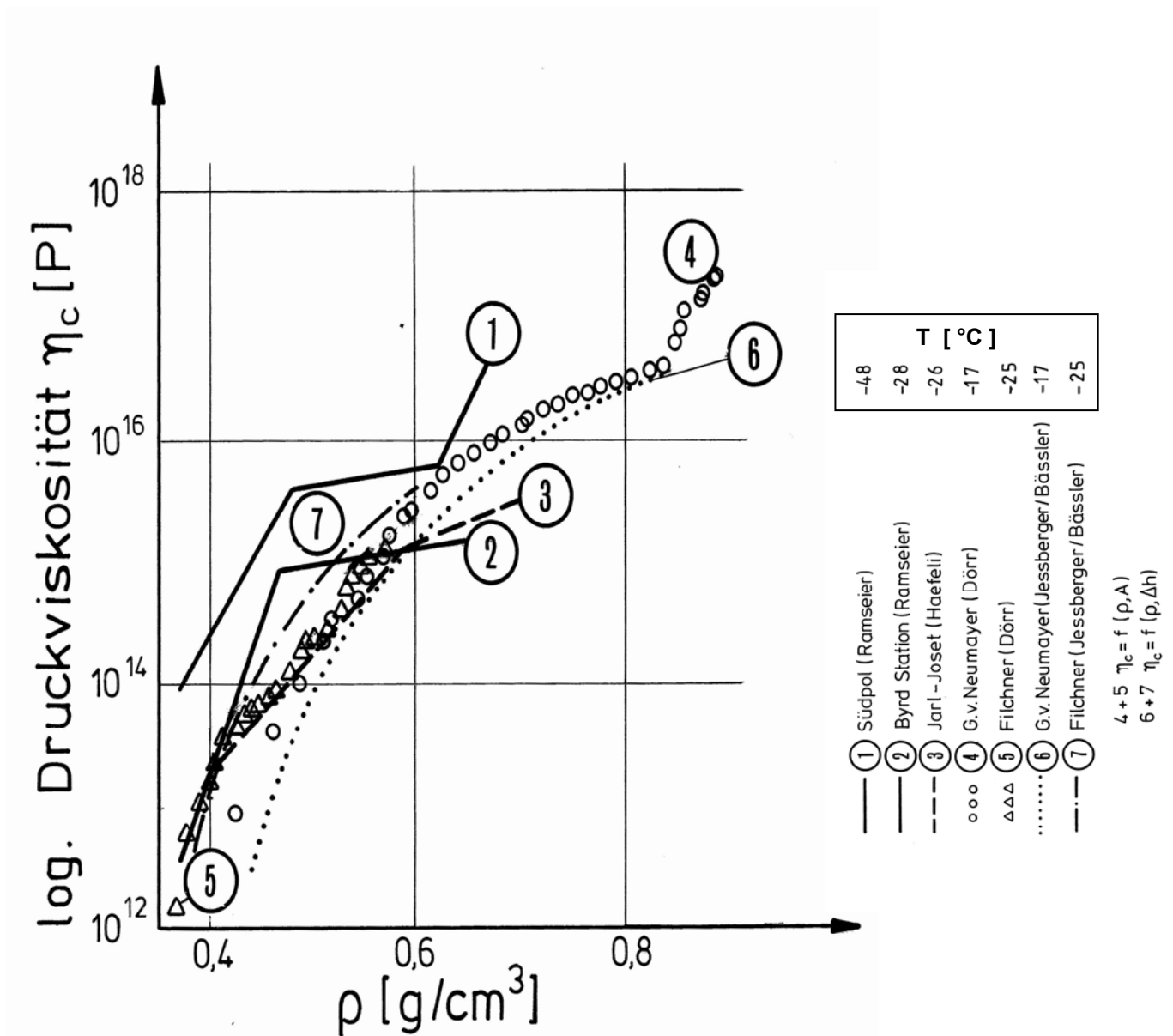
**Gl. 5.9a (Ekström)**

$$\eta_c = 3,1536 \cdot 10^{11} \cdot \frac{4 \cdot z'' + 0,403 \cdot (z'')^{1,49}}{4,27 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + \ln z'') + 0,134 / z''} \quad [\text{P}]$$

**Gl. 5.9b (Filchner-Ronne)**

$$\eta_c = 3,1536 \cdot 10^{11} \cdot \frac{3,5 \cdot z'' + 0,342 \cdot (z'')^{1,58}}{2,725 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + \ln z'') + 0,074 / z''} \quad [\text{P}]$$

Die halblogarithmische Darstellung der Abb. 5.8 verdeutlicht die starke Abhängigkeit der Druckviskosität von der Dichte.



**Abb. 5.8: Druckviskosität in Abhängigkeit von der Dichte**

Im betrachteten Dichtebereich von  $0,4 \text{ g/cm}^3$  bis  $0,9 \text{ g/cm}^3$  steigt die Druckviskosität über fünf Zehnerpotenzen an. Der Vergleich mit den Ergebnissen anderer Autoren, die in Abb. 5.8 aufgeführt sind, zeigt die Temperaturabhängigkeit der Druckviskosität. Die Werte für den Südpol, ermittelt bei  $-48^\circ\text{C}$ , liegen generell über denen der anderen Lokationen. Nahezu gleiche Temperaturbedingungen liegen für die Kurven 2, 3, 5 und 7 vor.

Der von Ramseier et al, 1964 ermittelte Verlauf (2) weist bei einer Dichte von  $0,47 \text{ g/cm}^3$  einen Knick auf, ab dem die Druckviskosität einem bedeutend geringeren Dichteinfluss unterliegt. Eine geringere Dichteabhängigkeit ab  $0,58 \text{ g/cm}^3$  zeigen auch die Auswertungen von Haefeli et al, 1968 (3), die aber nicht so stark ausgeprägt ist.



Ähnliche Verläufe, verglichen mit den hier abgeleiteten Werten, zeigen die von Dörr, 1984 ermittelten Druckviskositäten, zu deren Bestimmung neben der Dichte-Tiefenverteilung die von Reinwarth, 1982 bestimmten Akkumulationsraten herangezogen wurden.

Die oben genannten bereichsweise linearen Abhängigkeiten nach Ramseier et al, 1964 und Haefeli et al, 1968 sind bei Dörr, 1984 und den hier ermittelten Werten nicht in dem ausgeprägten Maß feststellbar. Die Änderung der Dichteabhängigkeit bei  $0,47 \text{ g/cm}^3$ , wie sie von Ramseier et al, 1964 festgestellt wurde, erscheint nicht erklärbar, da eine Änderung im Verdichtungsmechanismus erst bei einer Dichte von  $0,55 \text{ g/cm}^3$  zu erwarten ist, nachdem die dichteste Packung der Körner erreicht ist und weitere Verdichtungen durch Korndeformationen stattfinden. Der weniger stark ausgeprägte Abfall der Dichteabhängigkeit für Dichten ab  $0,58 \text{ g/cm}^3$ , den Haefeli et al, 1968 aufzeigt, scheint in diesem Zusammenhang erklärbar.

Die Werte von Dörr, 1984 zeigen im Bereich bis zu  $0,82 \text{ g/cm}^3$  einen monotonen Anstieg der Druckviskosität. Danach ist wieder eine stärkere Dichteabhängigkeit zu erkennen. Zieht man in Betracht, dass ab einer Dichte von  $0,82 \text{ g/cm}^3$  die im Eis verbliebenen Poren abgekapselt werden, so entsteht bei Zunahme der Belastung ein Porendruck, der zu einer scheinbaren Erhöhung der Viskosität führt. Abb. 5.9 gibt für den im Feld erfassten Dichtebereich die Druckviskositäten in den für Ingenieure gewohnteren Dimensionen wieder.

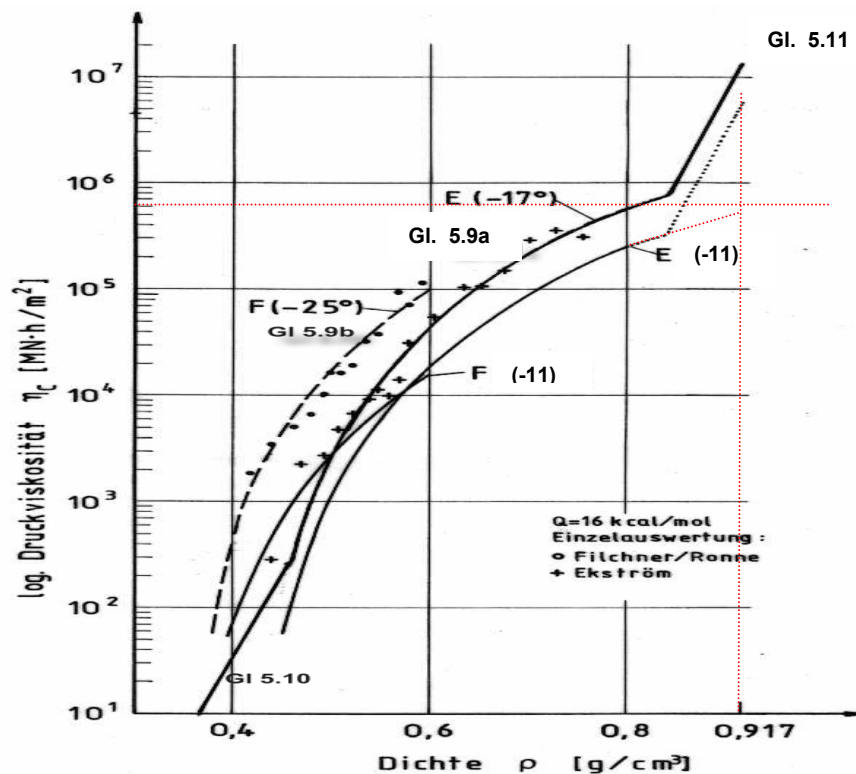


Abb. 5.9: Temperaturkompensierte Druckviskositäten für Ekström und Filchner-Ronne als Funktion der Dichte

Die durch Kreise und Kreuze markierten Einzelauswertungen ergaben sich aus den im Feld gemessenen Setzungen bezogen auf die vorhandene Schichtdicke und der mittleren Dichte der Schicht. Der Spannungsermittlung lagen die Gleichungen 5.3 und 5.4 zugrunde.

Mit Hilfe der Arrheniusbeziehung (Gl. 4.1) wurden die für in-situ Temperaturen ermittelten Viskositäten auf die späteren Labortemperaturen von  $-11^{\circ}\text{C}$  mit einer Aktivierungsenergie von  $Q=16$  kcal/mol umgerechnet.

Lediglich bei einer Dichte von  $0,57\text{ g/cm}^3$  stimmen die für Filchner-Ronne und Ekström ermittelten Werte überein. Ursachen dafür können dichteabhängige Aktivierungsenergien (Mellor, 1966) oder die weitaus geringeren Strainraten des Filchner-Ronne-Schelfeises sein.

Die durchgeführten Messungen lieferten Setzungen für das Ekström-Schelfeis bis in 50 m Tiefe, das entspricht einem Dichtebereich von  $0,46\text{ g/cm}^3$  bis  $0,83\text{ g/cm}^3$ . Zur Erfassung der außerhalb dieses Bereiches liegenden Druckviskositäten werden ausgehend von den Werten bei  $0,46\text{ g/cm}^3$  bzw. bei  $0,83\text{ g/cm}^3$  die von Dörr, 1984 dokumentierten Verläufe genutzt. Bei einer Dichte von  $0,34\text{ g/cm}^3$  beträgt die Viskosität nach Gl. 5.9a  $4,85\text{ MN}\cdot\text{h/m}^2$ ; bei einer Dichte von  $0,83\text{ g/cm}^3$  entsprechend  $7,39\cdot 10^5\text{ MN}\cdot\text{h/m}^2$ . Die unter und oberhalb dieser Dichten anschließenden Verläufe werden durch Gl. 5.10 und 5.11 beschrieben.

**für  $0,34\text{ g/cm}^3 < \rho < 0,46\text{ g/cm}^3$**

$$\text{Gl. 5.10} \quad \eta_c = 4,85 \cdot e^{34 \cdot (\rho - 0,34)} \quad [\text{MN}\cdot\text{h/m}^2]$$

**für  $0,83\text{ g/cm}^3 < \rho < 0,917\text{ g/cm}^3$**

$$\text{Gl. 5.11} \quad \eta_c = 7,39 \cdot 10^5 \cdot e^{36,9 \cdot (\rho - 0,83)} \quad [\text{MN}\cdot\text{h/m}^2]$$

Die in diesem Kapitel abgeleiteten Gleichungen können in Rechenprogramme eingebaut werden, mit denen Verformungen unter geringen Spannungen (z.B. Flachgründungen) berechnet werden. Die sich kontinuierlich verändernden Materialparameter werden mit den tiefenabhängigen Gleichungen erfasst und ermöglichen so eine gute Annäherung an die in-situ Verhältnisse. Da die Gleichungen auf Feldmessungen beruhen, sind in den abgeleiteten Werten auch die im Felde vorhandenen Randbedingungen (z.B. Seitendruck) berücksichtigt. Zur Beschreibung des nichtlinearen viskoelastischen Verhaltens ist, wie bereits in Kapitel 4 angedeutet, eine andere Betrachtungsweise notwendig. Die dafür benötigten Materialparameter werden aus den im Kapitel 6 beschriebenen Laborversuchen gewonnen.

## 6. ERMITTLUNG VON STOFFPARAMETERN AUS LABORVERSUCHEN

Um den Einfluss der viskosen Kriechanteile auszuschalten, wurden die überwiegend in der Literatur aufgeführten elastischen Parameter aus Druckversuchen mit relativ hohen Verformungsraten ( $d\varepsilon/dt=10^{-2}$  bis  $10^{-3}s^{-1}$ ) gewonnen. Wie folgend noch näher erläutert wird, liegen die so ermittelten Elastizitätsmoduli und Bruchspannungen weit über den Werten für Belastungen mit den im Bauwesen üblichen geringen Verformungsraten. Deshalb wurden zunächst aus Druckversuchen die elastischen Kennwerte und Bruchspannungen des Firns bei geringen konstanten Verformungsraten bestimmt. Primärer Versuchsparameter ist, wie auch bei den Kriechversuchen, die Firndichte.

Zur Überprüfung des Einflusses der in-situ vorhandenen behinderten Seitenausdehnung werden zusätzlich zu den einaxialen Druckversuchen, triaxiale Versuche durchgeführt. Dabei wird ein hydrostatischer Seitendruck aufgebracht, dessen Größe von der Tiefe abhängt aus der sie gewonnen wurde. Unter der Annahme, dass nur der Spannungsdeviator eine Gestaltänderung der Proben bewirkt, werden aus der Spannungs-Tiefenfunktion (Gl. 5.3) des Ekström-Schelfeises die Seitendrucke mit einem Seitendruckbeiwert  $K_0=1$  ermittelt und vor Versuchsbeginn aufgebracht.

Das Kriechverhalten wird bei Annahme einer konstanten Temperatur maßgeblich durch die Firndichte bestimmt. Unter der bei geringen Spannungen vorliegenden linearen stationären Beziehung zwischen der Verformungsgeschwindigkeit und der Spannung erfolgt die Beschreibung über die im vorhergehenden Kapitel abgeleitete Druckviskosität.

Höhere Spannungen führen zu einem nichtlinearen instationären Spannungs-Verformungsverhalten. Zur Beschreibung dieses Kriechverhaltens wird die Gl. 4.6 herangezogen, da sie mit  $B>1$  die Nichtlinearität der Spannungs-Verformungsbeziehung und mit  $C<1$  auch den zeitabhängigen Verlauf wiedergibt.

Die für Gl. 4.6 benötigten Materialparameter A, B und C werden aus Kriechversuchen unter konstanten Druckspannungen ermittelt. Die dichteabhängigen Kriechmoduli A werden mit für alle Dichten konstant gehaltenem Spannungsexponenten B und Zeitexponenten C bei zunächst unbehinderter Seitenausdehnung bestimmt.

Abhängig von dem mit der Tiefe zunehmenden Seitendruck werden die Seitendehnungen des Firns behindert was sich auf die Kriechmoduli auswirken kann. Zur Überprüfung werden Kriechversuche durchgeführt, bei denen dem Axialdruck eine hydrostatische Spannung überlagert wird. Die Seitendrucke ermitteln sich wie bei den oben beschriebenen Druckversuchen und hängen von der Probtiefe ab. Die Spannungsdeviatoren ( $\sigma_1-\sigma_3$ ) werden so gewählt, dass die von der Firndichte abhängigen Deviatorbruchspannungen  $\sigma_B$

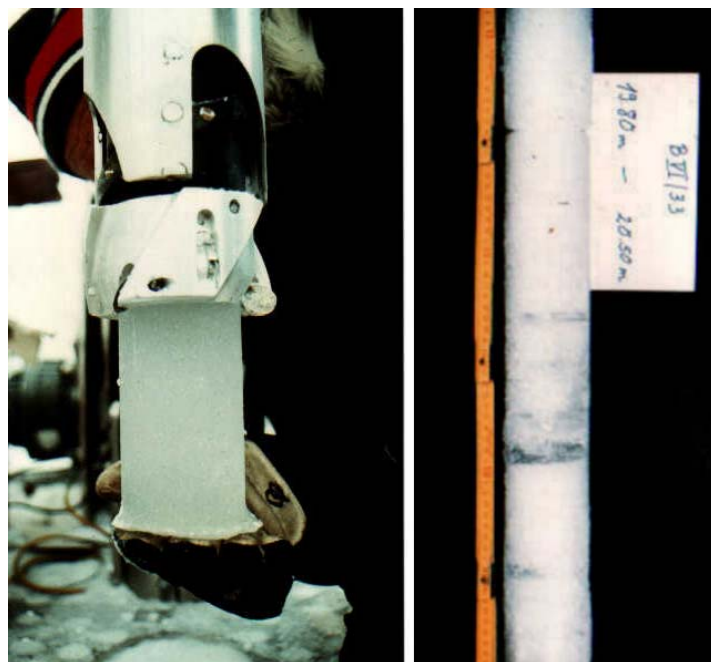
nicht überschritten werden, sie aber so hoch sind, dass sie zu einem nichtlinearen instationären Spannungs-Verformungsverhalten führen.

Aus den Ergebnissen von Ramseier et al, 1964 kann gefolgert werden, dass der Zeitexponent  $C$  in Gl. 4.6 hauptsächlich von der Firntemperatur abhängt und bei gleichen Versuchstemperaturen nur eine geringe Streubreite bei unterschiedlichen Dichten und Belastungen aufweist. Aus der Zusammenstellung von Mellor, 1974 (siehe Abb. 4.11) ist auf eine Unabhängigkeit des Spannungsexponenten  $B$  von der Probendichte zu schließen.

Infolge der in Kapitel 3 nachgewiesenen  $c$ -Achsenverteilung des Eiskristallgemenges kann nach Körner, 1964 davon ausgegangen werden, dass das mechanische Verhalten der Proben keine Richtungsabhängigkeit aufweist.

## 6.1 VERSUCHSMATERIAL UND PROBENHERSTELLUNG

Für die Untersuchungen standen Firn und Eiskerne aus einer ca. 70 m tiefen Bohrung und einzelne gut erhaltene Probenstücke aus einer weiteren Bohrung bis in 100 m Tiefe zur Verfügung.



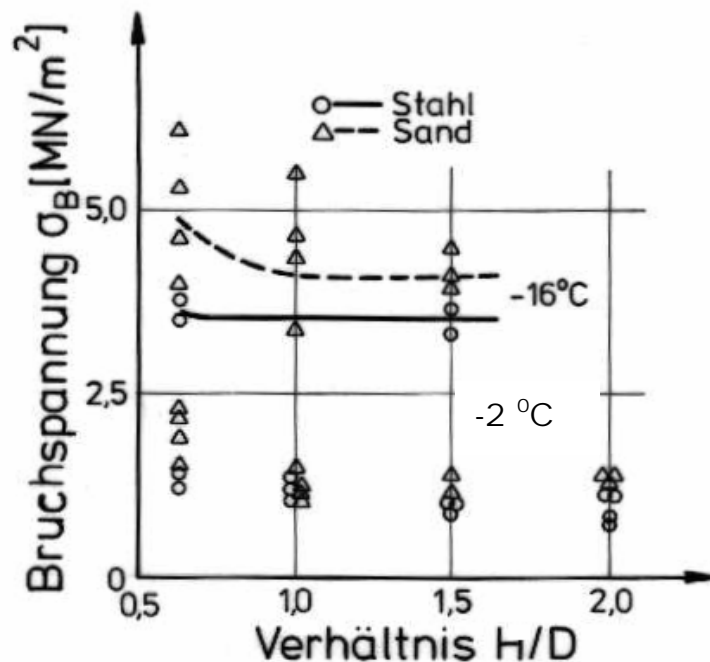
**Abb. 6.1: Firn- und Eiskerne aus 50 m und 20 m Tiefe**

Abb. 6.1 zeigt eine gerade erbohrte Probe mit homogener Struktur aus ca. 50 m Tiefe sowie einen Firnkern aus ca. 20 m Tiefe, bei der deutlich erkennbar dünne Eisschichten zwischen

den homogenen Firnschichten eingelagert sind. Durch die Inhomogenität und der dadurch bedingten undefinierten Dichte fanden derart inhomogene Stücke bei der Probenauswahl keine Berücksichtigung.

Aus den Firnkernen wurden mit einer Bandsäge Proben mit zueinander parallelen Endflächen rechtwinklig zur Bohrkernachse geschnitten. Zur Vermeidung zusätzlicher mechanischer Einwirkungen erfolgte keine Reduzierung des Bohrkerndurchmessers von  $D=75$  mm.

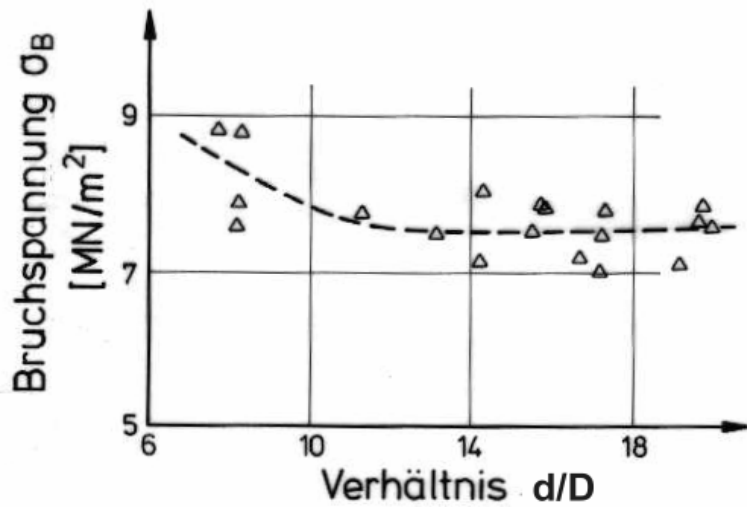
Nohguchi et al, 1979 untersuchten den Einfluss des Verhältnisses zwischen Probenhöhe  $h$  und Probendurchmesser  $D$  auf die einaxiale Druckfestigkeit von Meereis. Für verschiedene Verhältnisse  $h/D$  sind die Ergebnisse in Abb. 6.2 wiedergegeben.



**Abb. 6.2: Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit von Meereis von der Probengeometrie (nach Nohguchi et al, 1979)**

Der Einfluss von  $h/D$  ist bei einer reibungsarmen Lagerung (Stahlplatten) geringer als bei der Verwendung von Platten, die eine starke Reibung ausüben (Sandpapier). Der infolge der starken Reibung verursachte mehrdimensionale Spannungszustand führt bei kurzen Proben zu höheren Festigkeiten. Bei einem Verhältnis von  $h/D \geq 1$  ist keine Abhängigkeit von den Lagerbedingungen mehr festzustellen. Nach Schwarz et al, 1980 soll  $h/D$  zwischen 2 und 3 liegen. Für die Versuche wurde ein Verhältnis von  $h/D=2$  gewählt. Zur weiteren Reduzierung der Endplattenreibung wurden je zwei Gummilagen zwischen die Probe und die Platten gelegt. Eine zusätzlich aufgetragene Gleitpaste zwischen den beiden Gummilagen führte zu einer weiteren Verminderung der Endplattenreibung.

Jones et al, 1983 untersuchten den Einfluss des Verhältnisses der Korngröße  $d$  zum Probendurchmesser  $D$  auf die Druckfestigkeit polykristallinen Eises. Abb. 6.3 verdeutlicht, dass ab  $D/d \geq 13$  die Druckfestigkeit unbeeinflusst bleibt.

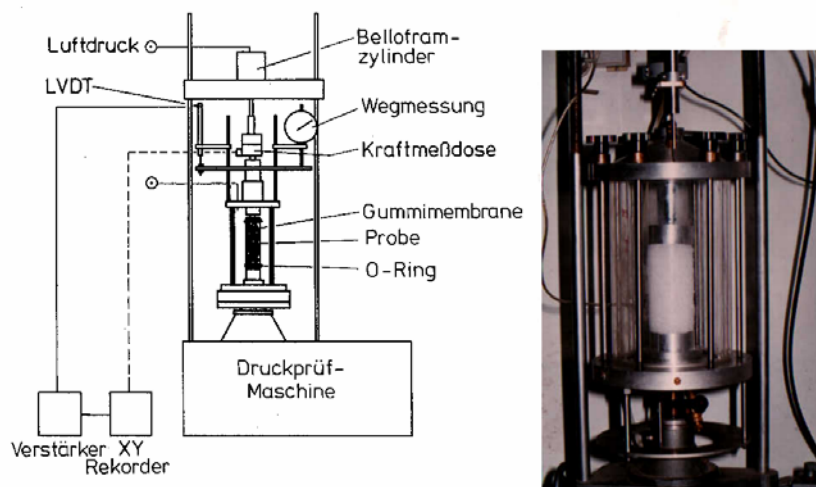


**Abb. 6.3: Abhängigkeit der Druckfestigkeit polykristallinen Eises vom Verhältnis des Probendurchmessers zur Korngröße (Jones et al, 1983)**

Die Untersuchungen in Kap. 3 (Abb. 3.12) ergaben für die getesteten Kerne Korngrößen von 0,6 mm bis 5 mm. Bezogen auf den Bohrkerndurchmesser von 75 mm ist bei einem minimalen Verhältnis von  $75/5 = 15$  demnach kein Einfluss auf die Versuchsergebnisse zu erwarten.

## 6.2 GERÄTE UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Zur Kontrolle der Dichte wurden die Proben vermessen und gewogen, bevor sie in die in Abb. 6.4 gezeigte Standard-Triaxialzelle eingebaut wurden.



**Abb. 6.4: Versuchsstand zur Durchführung der Druck und Kriechversuche**

Bei der in Abb. 6.4 dargestellten Druckprüfmaschine bewegte sich die untere Lastplatte mit einer wählbaren Geschwindigkeit nach oben, wodurch die oben fixierte Probe belastet wurde. Die benutzte Presse ermöglichte die Durchführung der Druckversuche mit konstanten Verformungsgeschwindigkeiten von 1,52 mm/min bis zu 0,0006 mm/min.

Über eine elastische Gummimembrane, die an den Lastplatten mit O-Ringen abgedichtet war, erfolgte durch Druckluft die hydrostatische Belastung der Proben in Höhe des angenommenen in-situ Seitendruckes, unter denen sie 24 Stunden lang konsolidierten.

Während der Kriechversuche hielt ein Bellophramzylinder die Axialspannung konstant. Die sich mit zunehmender Flächenvergrößerung durch die Probenstauchung ergebende Verringerung des Axialdruckes wurde durch Nachjustierung des Luftdruckes auf den Bellophramzylinder ausgeglichen.

Die Vertikallast konnte über eine Kraftmessdose eingestellt bzw. während der Druckversuche kontinuierlich auf einen X-Y-Schreiber aufgezeichnet werden. Ein induktiver Wegaufnehmer erfasste die vertikalen Probenverformungen, die ebenfalls auf einen X-Y-Schreiber protokolliert wurden.

Ein in den X-Y-Schreiber eingebauter Zeitgenerator zeichnete während der Kriechversuche den zeitlichen Verlauf der Verformungen auf. Der Versuchsstand befand sich in einem Frostraum, in dem für alle Versuche eine Temperatur von  $-11^{\circ}\text{C}$  eingestellt wurde.

### 6.3 UNTERSUCHUNG DES BRUCHVERHALTENS

Die Druckfestigkeit wird nach Fritz, 1981 u.a. von den Versuchsrandbedingungen beeinflusst. Ein Beispiel für den Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit zeigt Abb. 6.5.

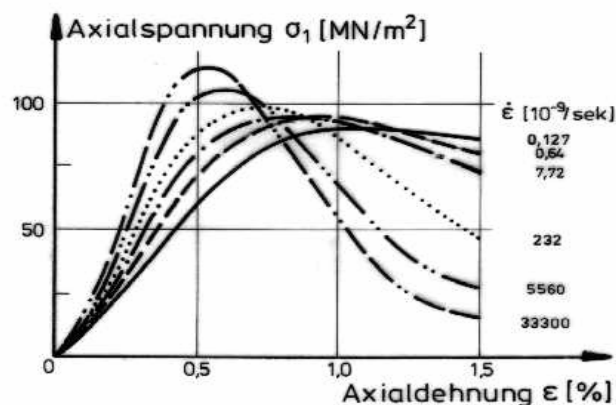


Abb. 6.5: Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit auf das Deformationsverhalten von Sandstein (nach Fritz, 1981)

Diese Untersuchungen machen deutlich, dass die Druckfestigkeiten mit abnehmenden Verformungsraten sinken und die Bruchdehnungen ansteigen. Dadurch verflachen bei Versuchen mit geringen Verformungsraten die Anstiege bis zur Bruchspannung. Der Elastizitätsmodul wird kleiner.

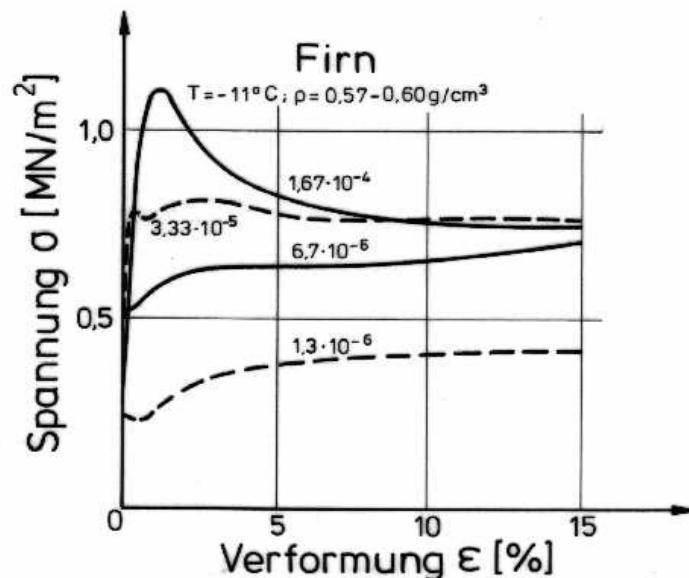
Der Spannungsabfall wird nach Erreichen der Druckfestigkeit mit abnehmender Verformungsrate geringer. Gleichzeitig stellt sich ein Anstieg der Restscherfestigkeit ein.

Zur Prüfung, ob Firn und Eis ein ähnliches Spannungs-Verformungsverhalten aufweisen, wurden in einer zusätzlichen Versuchsserie die Einflüsse der Verformungsgeschwindigkeit untersucht.

### 6.3.1 EINFLUSS DER VERFORMUNGSGESCHWINDIGKEIT

Proben mit nahezu konstanter Dichte ( $0,57 \text{ g/cm}^3$  bis  $0,60 \text{ g/cm}^3$ ) wurden mit unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten der Presse abgedrückt. Die Verformungsraten lagen dabei im Bereich von  $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  bis  $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ . (Versuchsbedingungen und Auswertung siehe Anlage 1).

Die vom X-Y-Plotter aufgezeichneten Last-Verformungskurven wurden digitalisiert und in Form von Spannungs-Verformungskurven aufgezeichnet. Aus Abb. 6.6 ist der Einfluss der Verformungsrate für die Firnproben gleicher Dichten zu ersehen.



**Abb. 6.6:** Spannungs-Verformungsdiagramme aus Druckversuchen an Firn mit variierenden Verformungsraten



Ähnlich wie in Abb. 6.5 erhöht sich die Bruchspannung mit ansteigender Verformungsrate. Der Spannungsabfall bis zur Restscherfestigkeit ist nicht so stark ausgeprägt. Weiterhin ist ein fast linearer Anstieg der Spannungen bis zum Erreichen der Festigkeit erkennbar. Danach stellen sich Entfestigungen ein, die auf Kornverbindungsbrüche hindeuten.

Bei einer Verformungsgeschwindigkeit von  $1,67 \cdot 10^{-4} \text{s}^{-1}$  ist noch eine große Differenz zwischen der Bruchspannung und der Restscherfestigkeit zu erkennen.

Geringere Verformungsgeschwindigkeiten führen zu einem ersten Festigkeitsmaximum. Nach einem geringen Abfall der Spannungen, steigen diese wieder an und erreichen ein zweites über dem ersten liegendes Maximum. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangte Mellor et al, 1982 für polykristallines Eis. Seine Versuche sind in der Abb. 6.7 wiedergegeben. Für das dort getestete Eis ist der Anstieg der Spannungen nach Erreichen des ersten Maximums ausgeprägter als für den in Abb. 6.6 untersuchten Firn. Dies kann auf die geringere Porosität des Eises zurückgeführt werden, die, im Gegensatz zum Firn, ein Ausweichen der Eiskörner einschränkt und dadurch einen stärkeren Spannungsanstieg verursacht. Hawks et al, 1972 deuteten das erste Festigkeitsmaximum als beginnende Bruchaktivitäten in den Kristallen.

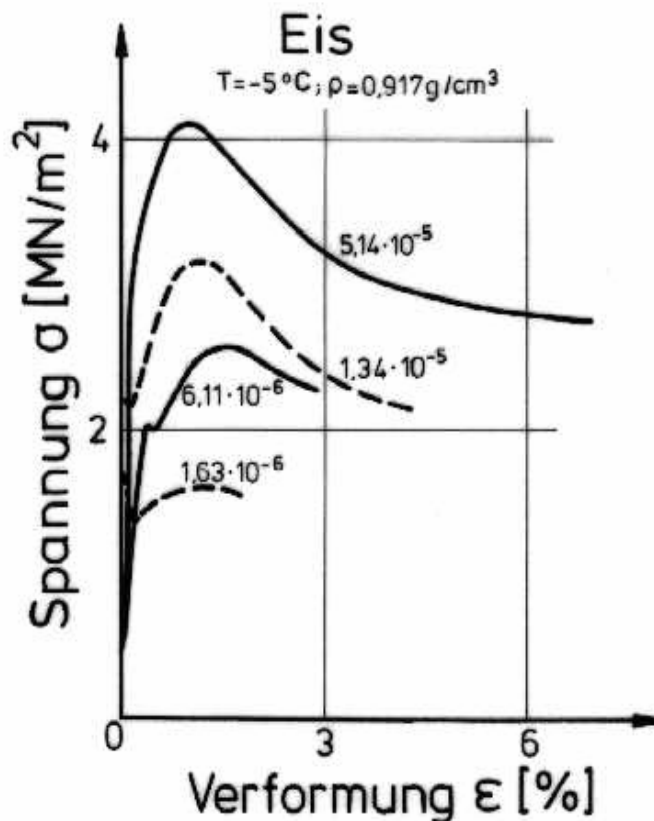
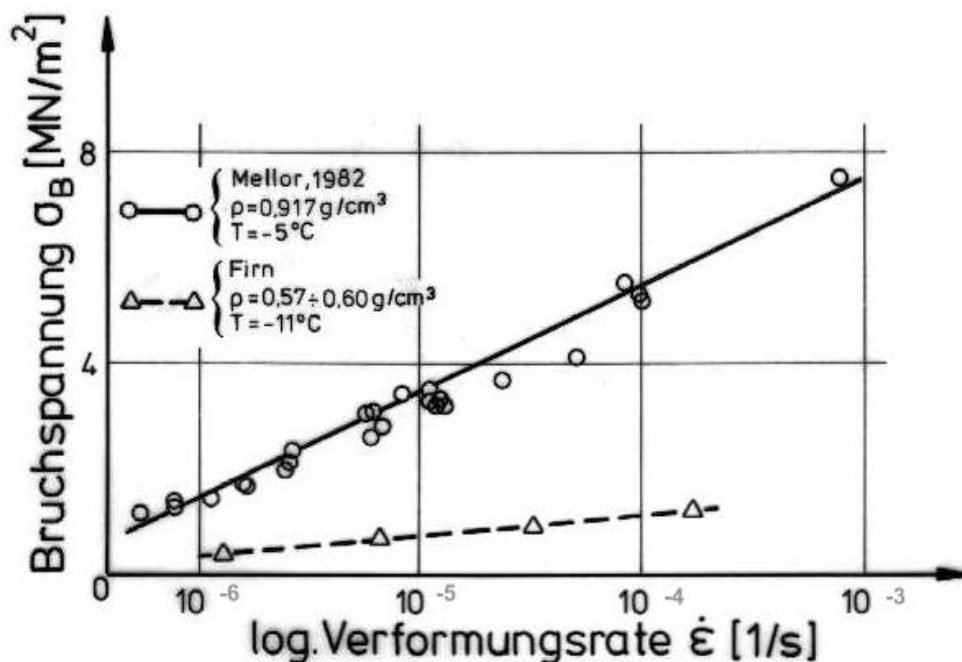


Abb. 6.7: Spannungs-Verformungskurven aus Druckversuchen mit unterschiedlichen Verformungsraten an polykristallinem Eis (Mellor et al, 1982)

Möglicherweise führen die sich bei geringen Verformungsgeschwindigkeiten einstellenden plastischen Deformationen zunächst zu einer "Verkittung" der während des ersten Festigkeitsmaximums entstandenen Brüche. In der so vorübergehend ausgeheilten Probe stellt sich ein erneuter Spannungsanstieg ein. Bei Erreichen des zweiten Maximums treten dann irreversible Kornbrüche oder Verschiebungen an den Korngrenzen auf, die in einen Spannungsabfall bis auf die Restscherfestigkeit resultieren.

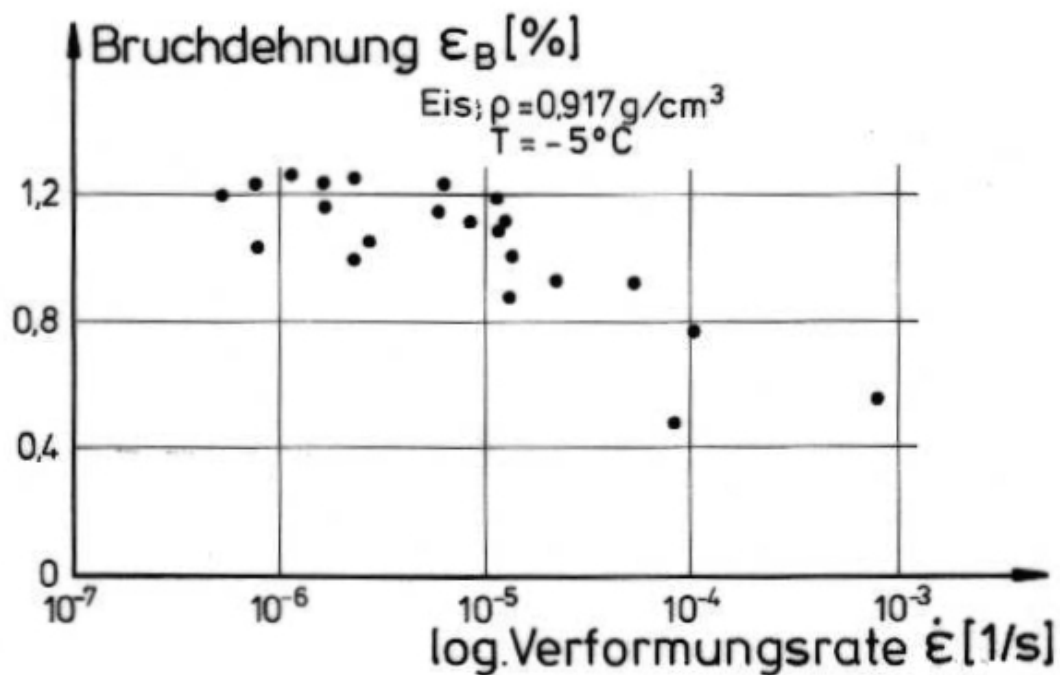
Die mit zunehmender Verformungsrate ansteigende Festigkeit ist aus Abb. 6.8 ersichtlich. Neben den geschwindigkeitsabhängigen Festigkeiten aus den Laborversuchen an Firn, sind Werte aus Untersuchungen an polykristallinem Eis von Mellor et al, 1982 angegeben.



**Abb. 6.8: Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Verformungsrate für Firn und Eis**

Die Festigkeit zeigt nach Abb. 6.8 eine logarithmische Abhängigkeit von der Verformungsrate sowohl für das von Mellor et al, 1982 untersuchte Eis wie auch für die hier getesteten Firnproben. Es sind erhebliche ratenabhängige Festigkeitsunterschiede feststellbar, die bei späteren Bruchspannungsbetrachtungen unbedingt berücksichtigt werden müssen. Bedingt durch die dichtere Eisstruktur ist mit zunehmender Verformungsgeschwindigkeit der Festigkeitsanstieg für Eis ausgeprägter.

Wie Untersuchungen von Mellor et al, 1982 an polykristallinem Eis zeigen, ist mit zunehmender Verformungsrate eine Abnahme der Bruchverformung verbunden. Aus Abb. 6.9 ist eine Reduzierung der Bruchverformung um die Hälfte erkennbar, wenn die Verformungsrate von  $10^{-6}\text{s}^{-1}$  auf  $10^{-3}\text{s}^{-1}$  erhöht wird.



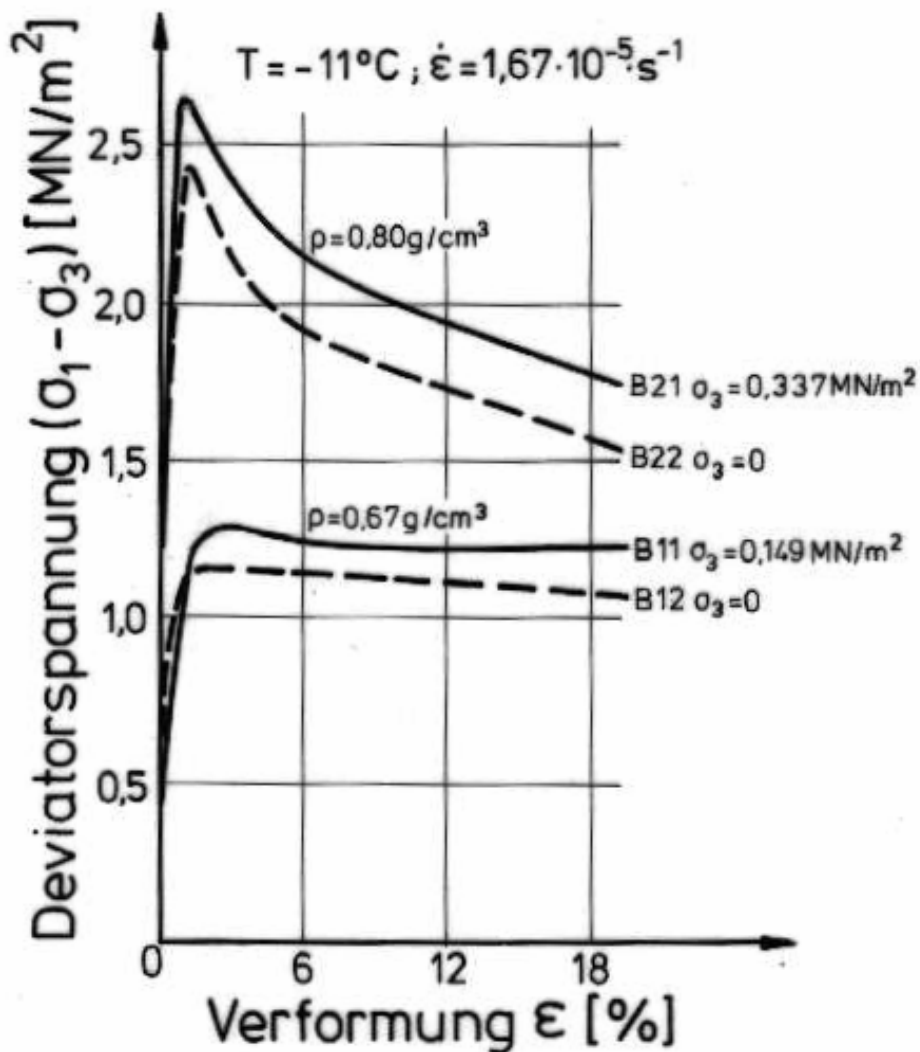
**Abb. 6.9: Bruchdehnungen für Eis in Abhängigkeit von der Verformungsrate (Mellor et al, 1982)**

Da mit zunehmender Verformungsrate die Druckfestigkeit ansteigt und sich die Bruchverformung reduziert, folgt für den Elastizitätsmodul eine ausgeprägte Verformungsratenabhängigkeit, auf die im Zusammenhang mit der Dichteabhängigkeit des E-Moduls noch näher eingegangen wird.

### 6.3.2 EINFLUSS DER FIRNDICHTE

In einer zweiten Versuchsserie wurden die Druckversuche mit einer konstanten Verformungsrate durchgeführt. In Anlehnung an die Empfehlungen von Baker et al, 1983 wurde eine Geschwindigkeit von  $1,67 \cdot 10^{-5} \text{s}^{-1}$  gewählt.

Stellvertretend für die Versuchsserie sind in Abb. 6.10 für die Dichten  $0,8 \text{ g/cm}^3$  (B21, B22) und  $0,67 \text{ g/cm}^3$  (B11, B12) die Spannungs-Verformungsverläufe gezeigt. Jeweils ein Versuch wurde ohne Seitendruck durchgeführt.



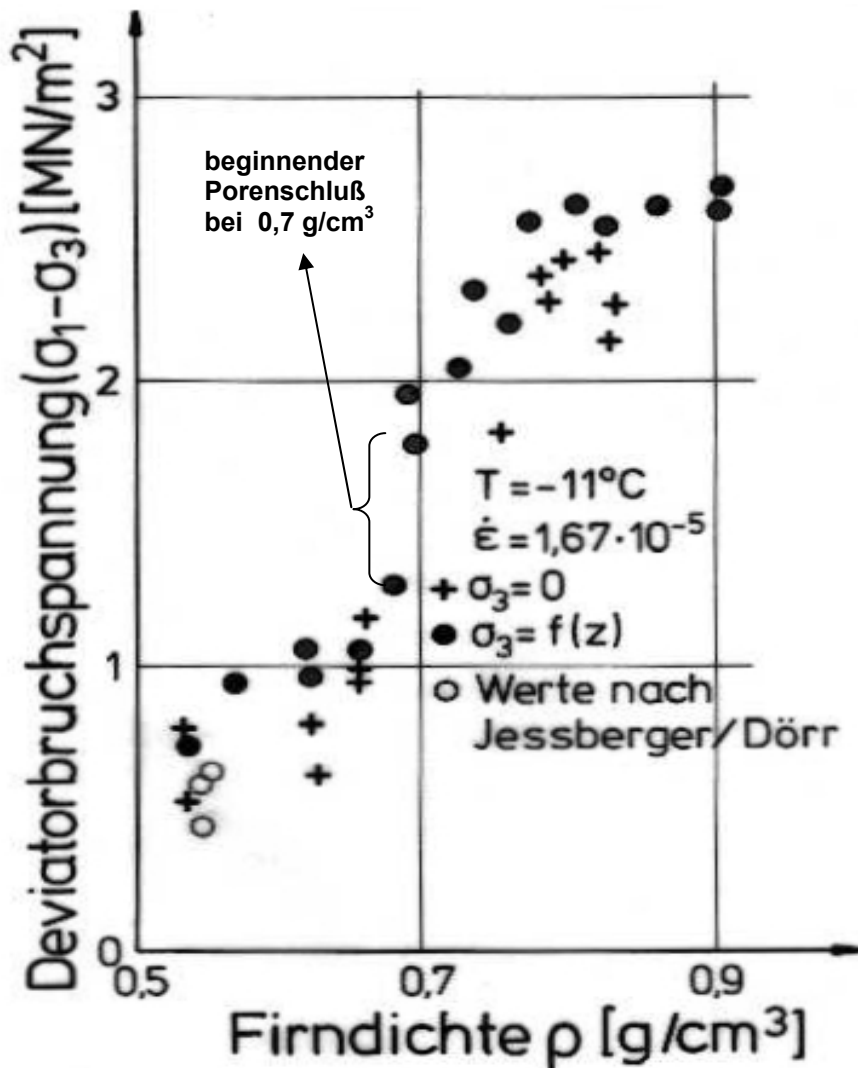
**Abb. 6.10: Spannungs-Verformungsverläufe aus Druckversuchen an Firnproben unterschiedlicher Dichte**

Die Versuche B 21 und B 22 mit einer Dichte von  $0,8 \text{ g/cm}^3$  weisen nahezu zweifach höhere Festigkeiten auf als die Versuche B 11 und B 12 mit einer Dichte von  $0,67 \text{ g/cm}^3$ . Der starke Spannungsabfall bei hohen Dichten nach Erreichen der Festigkeit deutet darauf hin, dass sich zwischen den dort einstellenden Bruchflächen eine geringere Verzahnung einstellt als bei Proben mit niedrigeren Dichten.

Der Seitendruck bewirkt hauptsächlich eine geringe Festigkeitssteigerung gegenüber der einaxialen Festigkeit um rund 10%. Die Ergebnisse der anderen Versuche sind in der Anlage 2 und 2a aufgeführt. Nachfolgend werden die dichteabhängigen elastischen Materialparameter näher untersucht.

### 6.3.2.1 DRUCKFESTIGKEITEN

Abb. 6.11 enthält die Zusammenstellung der Druckfestigkeiten als Funktion der Dichte.



**Abb. 6.11: Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Firndichte**

Im Dichtebereich von 0,5 g/cm<sup>3</sup> bis zum Porenschluß bei 0,82 g/cm<sup>3</sup> steigt die Druckfestigkeit nahezu linear an. Im Bereich um 0,7 g/cm<sup>3</sup> deutet sich ein Spannungsversatz an, der auf das Abkapseln der Poren hinweist.

Bei weiterer Dichtezunahme stellt sich ein geringerer Anstieg der Festigkeit ein. Tendenziell ist eine geringe Erhöhung bei den mit Seitendruck durchgeführten Versuchen erkennbar.

Eine Beziehung zwischen Firndichte und Festigkeit wird ausgehend von der später folgenden Beschreibung des Kriechverhaltens abgeleitet.

### 6.3.2.2 BRUCHVERFORMUNGEN

Zur Beschreibung der Dichteabhängigkeit der Bruchverformungen wird die Dichte durch die Porosität  $n$  ausgedrückt. Mit der Dichte des inkompressiblen Eises von  $0,917 \text{ g/cm}^3$  ergibt sich die Porosität aus Gl. 6.1.

$$\text{Gl. 6.1} \quad n = (1 - \rho/\rho_E)$$

Die Verformungen, die sich bei Erreichen der Festigkeit einstellen, nehmen wie Abb. 6.12 zeigt, mit abnehmender Dichte zu.

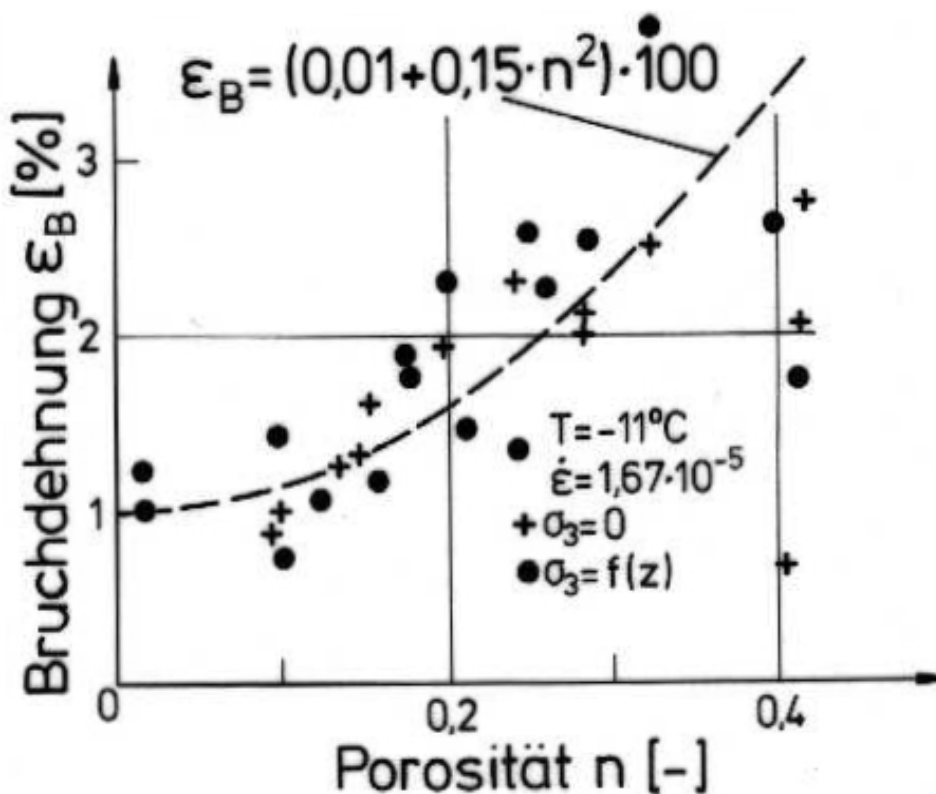


Abb. 6.12: Bruchverformungen als Funktion der Porosität

Ein Einfluss des Seitendrucks auf die Bruchverformungen ist aus Abb. 6.12 nicht erkennbar. Eine gute Näherung für die Beschreibung der Dichteabhängigkeit der Bruchverformungen wird mit Gl. 6.1a erreicht.

$$\text{Gl. 6.1a} \quad \epsilon_B = 0,01 + 0,15 \cdot n^2$$

Dabei wurden die Ergebnisse der Untersuchungen von Mellor et al, 1982 und 1983 berücksichtigt, die aufzeigen, dass die Bruchstauchung für polykristallines Eis ca. 1 % beträgt.

### 6.3.2.3 ELASTIZITÄTSMODUL UND QUERDEHNUNGSZAHL

Aus den labormäßig ermittelten Spannungs-Verformungsbeziehungen wurde der E-Modul aus der Steigung der Verbindungsgeraden zwischen dem Ursprung und dem Bruchpunkt (Sekantenmodul) bestimmt. Bei der in Abb. 6.13 gezeigten Auftragung des E-Moduls über die Porosität ergibt sich mit zunehmender Porosität ein nichtlinearer Abfall des E-Moduls bis auf ca. 20 MN/m<sup>2</sup>. Eine Beschreibung dieses Verlaufs abhängig von der Dichte erlaubt die Gl. 6.2a.

Gl. 6.2a  $E_S = 0,7 \cdot 10^3 \cdot \rho$  [Dicht in g/cm<sup>3</sup>; E in MN/m<sup>2</sup>]  
 $(E_S = 0,7 \cdot 10^3 \cdot (1-n) \cdot \rho_{Eis})$

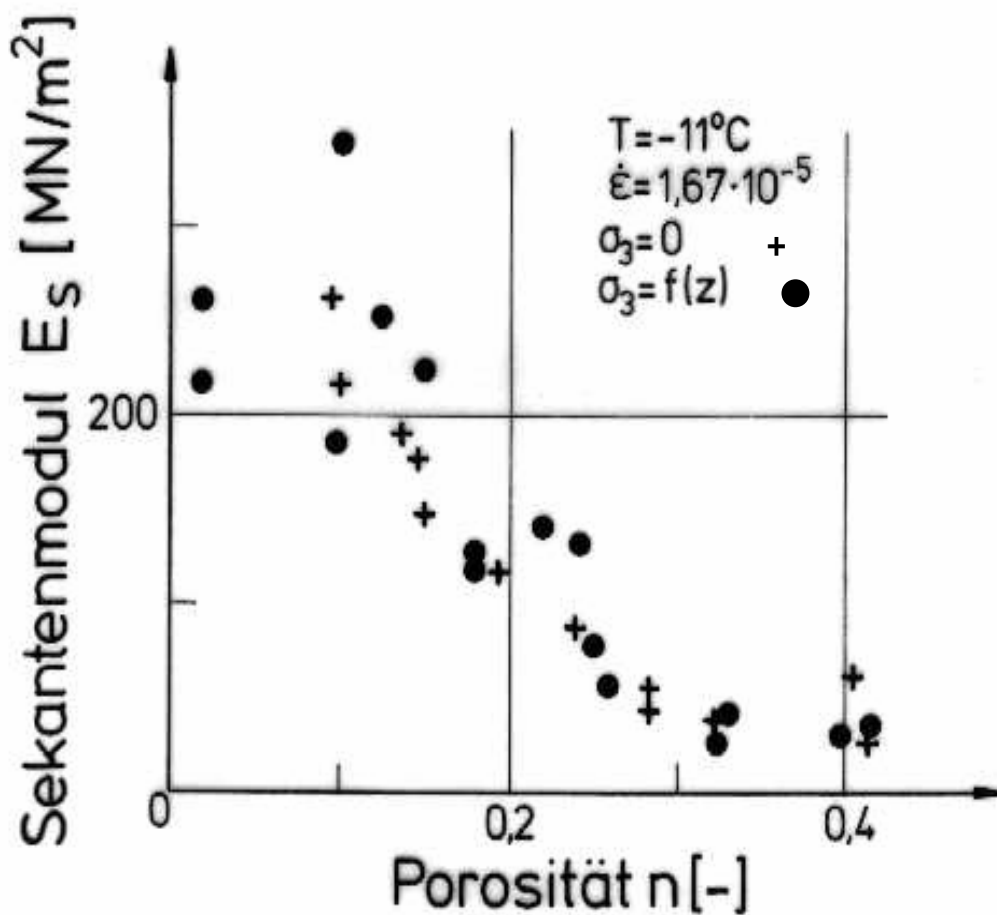


Abb. 6.13: Sekantenmodul in Abhängigkeit von der Porosität

Die Temperaturabhängigkeit des E-Moduls untersuchte Nakaya, 1959 für Eis. Wie aus Abb. 6.14 ersichtlich wird, nimmt der E-Modul mit fallender Temperatur geringfügig zu. Ausgehend von den bei -11<sup>0</sup>C (262,5 K) durch Gl. 6.2a bestimmbaren E-Moduli kann mit Gl. 6.2b eine Übertragung auf andere Temperaturverhältnisse kleiner als -11<sup>0</sup>C durchgeführt werden.

Gl. 6.2b

$$E(T) = E_{(262,5)} - [0,002444 \cdot (T - 262,5) \cdot E_{(262,5)}] \quad T \text{ in } ^\circ\text{K}$$

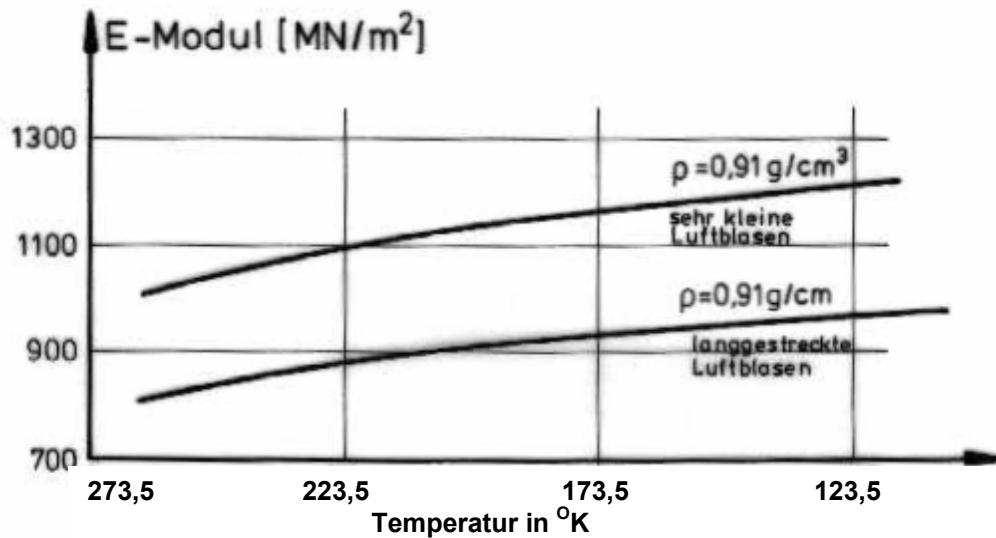


Abb. 6.14: E-Modul für Eis in Abhängigkeit von der Temperatur (Nakaya, 1959)

An dieser Stelle sei noch kurz auf die Querdehnungszahlen eingegangen, die nach Bader et al, 1951 mit Gl. 6.2c eine Beziehung für den gesamten Dichtebereich angeben.

Gl. 6.2c

$$\nu = \rho / [1,48 \cdot (1 - 0,8 \cdot \rho) \cdot (1 + 3,87 \cdot \rho)] \quad \rho \text{ in g/cm}^3$$

Aus Gl. 6.2c folgt für Eis mit einer Dichte von 0,917 g/cm<sup>3</sup> eine Querdehnungszahl nahe 0,5. Damit wird die Inkompressibilität des Eises beschrieben. Die Querdehnungszahl des abgelagerten Firns mit einer Dichte von 0,4 g/cm<sup>3</sup> ergibt sich nach Gl. 6.2c zu 0,16 und verdeutlicht den kompressibelen Charakter. Da Ultraschallmessungen eine Querdehnzahl für Eis kleiner als 0,5 ergaben, ist die Gl. 6.2d nach Mellor, 1964 anzusetzen.

Gl. 6.2d

$$\nu = 0,15 \cdot \rho + 0,2 \quad \rho \text{ in g/cm}^3$$

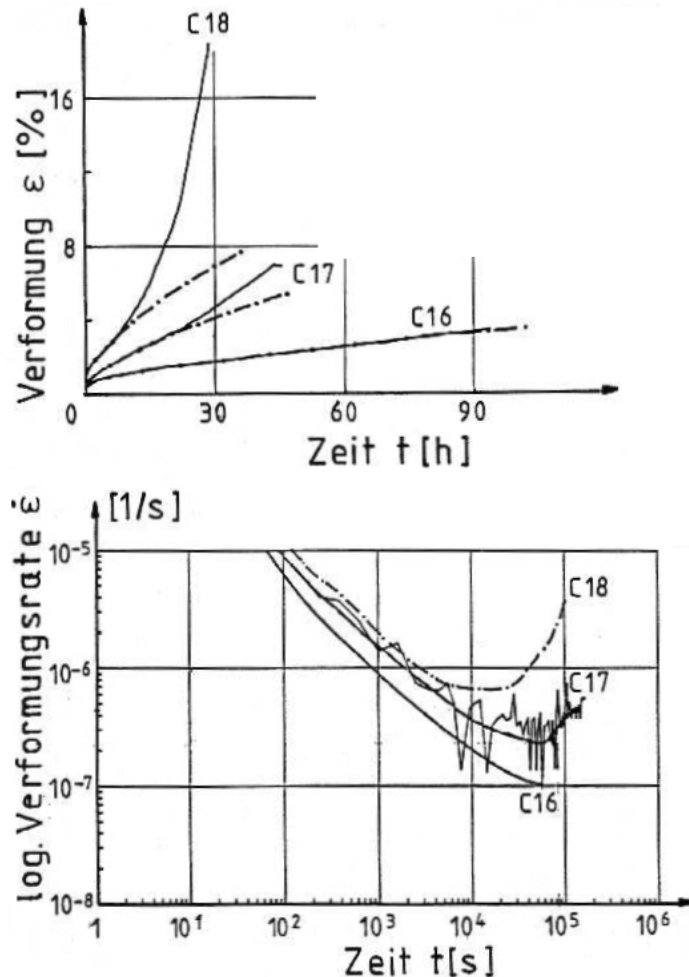
Mit Gl. 6.2d für den Dichtebereich von 0,4 g/cm<sup>3</sup> bis 0,917 g/cm<sup>3</sup> kann die Querdehnzahl zutreffender ermittelt werden.

#### 6.4 UNTERSUCHUNG DES KRIECHVERHALTENS

Die während der Versuche vom X-Y-Schreiber aufgezeichneten Zeit-Verformungskurven wurden durch punktweise Digitalisierung in die EDV eingelesen und ausgewertet.



Abb. 6.15 zeigt beispielhaft eine so gewonnene Darstellung der Verformungen und der Verformungsraten über die Zeit für drei Versuche an Proben mit nahezu konstanten Dichten aus einer Tiefe von 50 m.



**Abb. 6.15: Beispiel für die Darstellung der Versuchsdatenaufzeichnungen und Auswertungen**

Die Zuordnung der Verformungsraten-Zeitverläufe zu den Kriechversuchen erfolgt über die Versuchsnummern. Bedingt durch die Digitalisierung der Kriechkurven, ergaben sich bei der Berechnung der Verformungsraten Schwankungen, wie sie für den Versuch C 17 in der Abb. 6.15 dargestellt sind. Durch eine Ausgleichskurve wird der Verlauf geglättet. Die Verformungsraten-Zeitverläufe in Abb. 6.15 zeigen für alle Deviatorspannungen zunächst eine kontinuierliche Abnahme der Verformungsrate bis zu einem Minimum. Der Wiederanstieg der Verformungsgeschwindigkeit kennzeichnet den Beginn des tertiären Kriechbereichs. Abhängig von der Höhe der Spannung erreichen nicht alle Versuche den tertiären Bereich, sondern kriechen mit nahezu konstanter Verformungsgeschwindigkeit (siehe z.B. die Versuche C 4 und C 5 in der Anlage 3, Blatt 2). Aus den Verformungsverläufen der Abb. 6.15 ist zu ersehen, dass die Anfangsverformungen, verglichen mit den Gesamtverformungen, gering sind. Auf die

Anfangsverformung folgt eine kurze Primärphase, die beim Versuch C 16 in eine quasi-stationäre Kriechphase übergeht.

In den Versuchen C 17 und C 18 wird die quasi-stationäre Kriechphase nur kurz angedeutet und von der tertiären Phase abgelöst, in der in kurzer Zeit sehr große Verformungen auftreten, die zu einem Bruch der Proben führen. Der am Schluss von C 17 sichtbare Rückgang der Verformung ist auf die am Versuchsende durchgeführte Entlastung zurückzuführen. Die Größe des Verformungsrückganges entspricht dabei der zu Versuchsbeginn eingetretenen elastischen Sofortverformung.

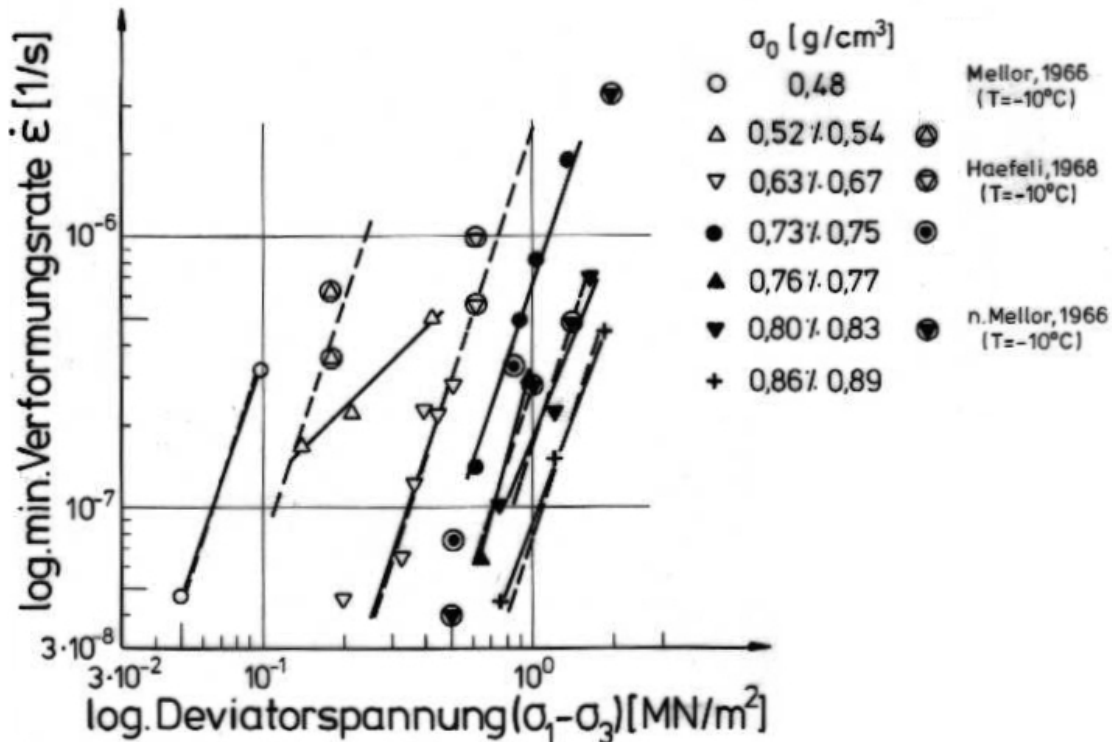
Eine Zusammenstellung der gesamten Versuchsserie mit den jeweiligen Randbedingungen ist in der Anlage 3, Blatt 1 bis 7 aufgeführt.

#### **6.4.1 ABLEITUNG DES DICHTEABHÄNGIGEN ZEITUNABHÄNGIGEN NICHTLINEAREN KRIECHMODULS**

Die Ermittlung des Spannungsexponenten  $B$  nach Gl. 4.6 erfolgt aus der doppelt-logarithmischen Auftragung der minimalen Verformungsgeschwindigkeiten, die aus den Verformungsratenverläufen bestimmt wurden, über die Spannungsdeviatoren nach Abb. 6.16. Die Symbole im Diagramm stehen für die Probendichten. Die Zuordnung wird in der Legende zur Abb. 6.16 erklärt.

In der Regel sind pro Dichtebereich mindestens drei Kriechversuche mit verschiedenen Deviatorspannungen durchgeführt worden. Für Dichten von  $0,48 \text{ g/cm}^3$  und  $0,83 \text{ g/cm}^3$  ermittelte Mellor, 1966 die in Abb. 6.16 aufgenommenen minimalen Verformungsraten. Werte von Haefeli et al, 1968 ergänzen die Dichtebereiche von  $0,52 \text{ g/cm}^3$  bis  $0,75 \text{ g/cm}^3$ . Alle Verformungsraten wurden bei einer Versuchstemperatur von  $-10^\circ \text{ C}$  (Mellor und Haefeli) bzw. von  $-11^\circ \text{ C}$  (Laborversuche) ermittelt. Die Werte von Haefeli et al, 1968 und Mellor, 1966 fügen sich gut in die hier ermittelten Versuchsdaten ein.

Mit zunehmender Dichte wurden höhere Deviatorspannungen aufgebracht, um mit  $0,14 \text{ MN/m}^2$  bis  $1,9 \text{ MN/m}^2$  weit oberhalb der von Hutter, 1983 und Bader et al, 1962 angegebenen Grenzen für linear viskoelastisches Verhalten für Firn ( $0,06 \text{ MN/m}^2$ ) und Eis ( $0,1 \text{ MN/m}^2$ ) zu bleiben.



**Abb. 6.16: Spannungs-Verformungsratebeziehungen der Kriechversuche (aus den Laborversuchen ergänzt durch Werte von Mellor et al, 1966 und Haefeli, 1968)**

Erkennbar ist der von links nach rechts mit zunehmender Dichte ansteigende Verformungswiderstand. Weiterhin führen höhere Deviatorspannungen zu größeren sekundären Verformungsraten. Die Neigungen der Verbindungsgeraden zwischen den Werten aus Versuchen mit gleichen Dichten liegen zwischen  $69^\circ$  und  $72^\circ$ . Der Spannungsexponent B ergibt sich aus dem Tangens des Neigungswinkels und liegt im Bereich zwischen 2,6 und 3,1.

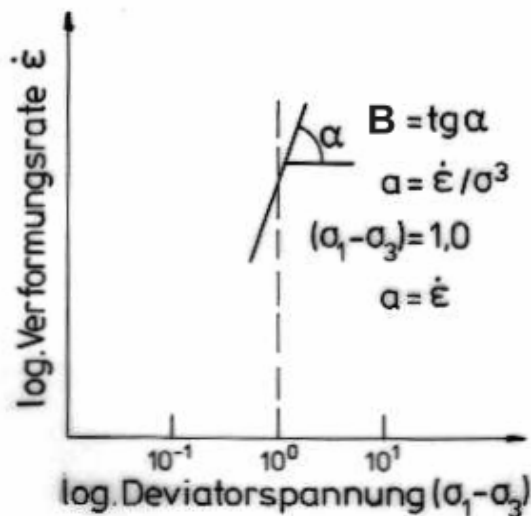
Für den Dichtebereich  $0,52 \text{ g/cm}^3$  bis  $0,54 \text{ g/cm}^3$  weicht die Geradenneigung von den Neigungen der anderen Dichtebereiche ab. Eine Erklärung für die Abweichung kann mit Ungenauigkeiten während der Versuchsdurchführung gegeben werden. Die drei Versuche waren die ersten Kriechversuche, die mit den vorhandenen Bohrkernen durchgeführt wurden. Da kein weiteres Probenmaterial aus diesem Dichtebereich zu Vergleichsversuchen zur Verfügung stand, wird mit Werten von Haefeli et al, 1968 die Lage der Ausgleichsgerade für diesen Dichtebereich bestimmt.

Um die Abhängigkeit des Verformungsverhaltens von der Dichte über den Kriechmodul A zu beschreiben, wird für B ein Wert von 3,0 angesetzt. In Abb. 6.16 sind die unter  $71.6^\circ$  (inv tangens(3)) geneigten Geraden gestrichelt eingetragen.

Nachfolgend wird zunächst der aus Abb. 6.16 ohne Berücksichtigung der Verfestigung sich einstellende Verlauf des Kriechmoduls nach Gl. 4.6 bestimmt, indem der Zeitexponent C zu 1 gesetzt wird. Für die Verformungsrate folgt aus Gl. 4.6 nach Ableitung nach der Zeit t:

$$\text{Gl. 6.3} \quad d\varepsilon/dt = A \cdot \sigma^B \cdot C \cdot t^{C-1}$$

Mit C=1 geht Gl. 6.3 in Gl. 4.4 über und der instationäre Kriechmodul A ist gleich dem stationären Kriechmodul a. In Abb. 6.16 ermittelt sich a bei einer Spannung von 1 MN/m<sup>2</sup> nach der in Abb. 6.17 dargestellten Art.



**Abb. 6.17: Schematische Darstellung zur Ermittlung des Kriechmoduls a**

Der Schnittpunkt der Ausgleichsgerade für B=3 mit der Abszisse 1 MN/m<sup>2</sup> ergibt die Verformungsrate, deren Wert dem Kriechmodul a entspricht. Der sich aus den hier durchgeführten Laborversuchen ergebende Bereich für a ist in Abb. 6.18 schraffiert eingetragen. Aus Untersuchungen von Haefeli et al, 1968 ergibt sich der in Abb. 6.18 dunkel unterlegt eingezeichnete Streubereich.

Haefeli et al, 1968 nähern diesen Bereich mit einer Geraden nach Gl. 6.4 an.

$$\text{Gl. 6.4} \quad a = 88 \cdot 10^{-1,7+7,9 \cdot \rho/\rho_E} \quad [(\text{m}^2/\text{MN})^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

hier mit  $\rho_E = 0,92 \text{ g/cm}^3$  nach Haefeli et al, 1968

Der Faktor 88 ergibt sich aus einer notwendigen Umrechnung, der nach Haefeli et al, 1968 aus Schubspannungen berechneten a-Werte auf die hier betrachteten Axialdruckspannungen.

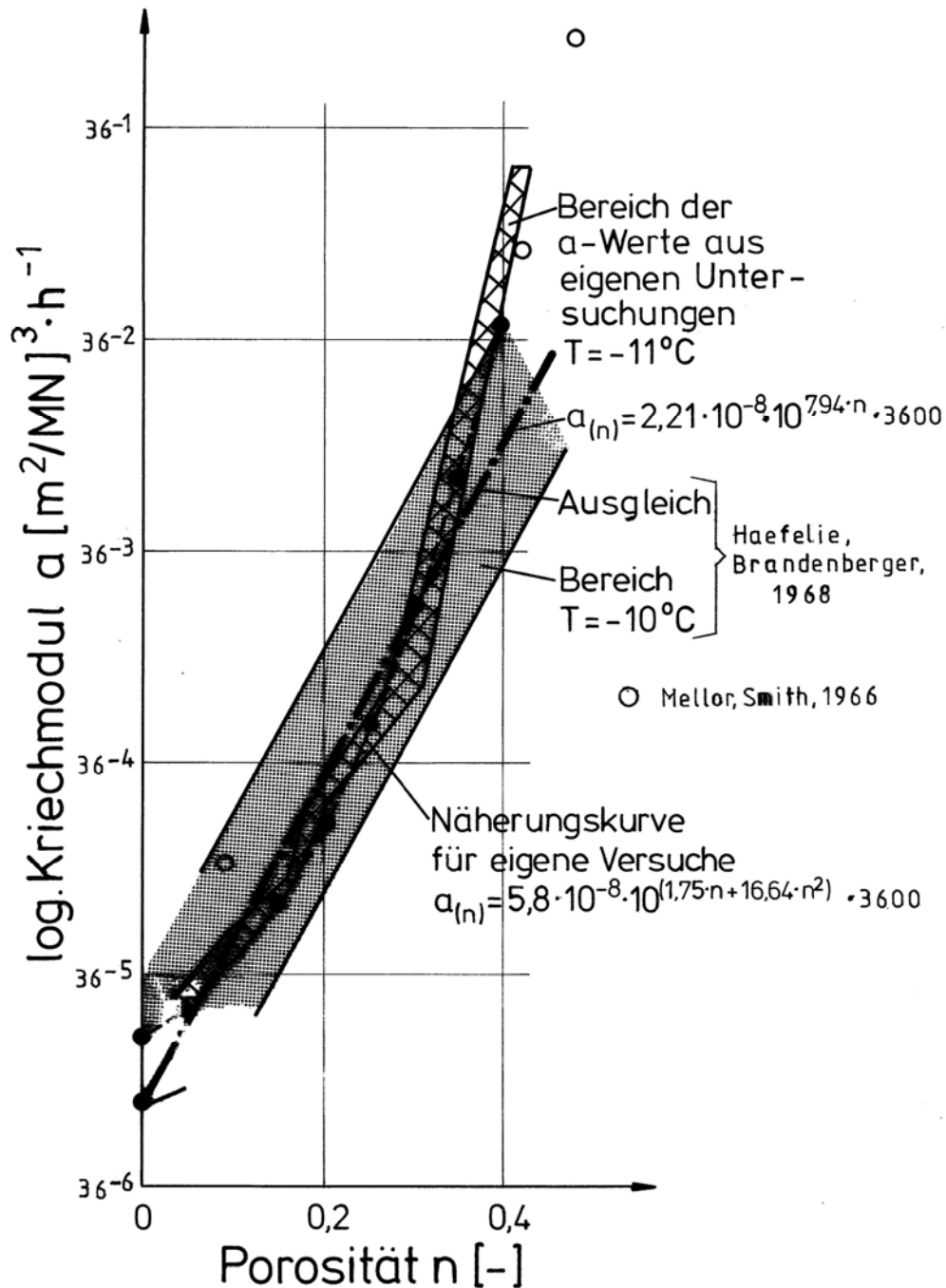


Abb. 6.18: Abhängigkeit des zeitunabhängigen Kriechmoduls  $a$  von der Porosität

Weiterhin wurde Abb. 6.18 durch Werte von Mellor et al, 1966 ergänzt.

Alle Untersuchungen zeigen einen starken Abfall des Kriechmoduls mit abnehmender Porosität. Zur Vereinheitlichung der Kriechmodulbeschreibung wird die in Gl. 6.4 gewählte Abhängigkeit von der Dichte durch die Abhängigkeit von der Porosität  $n$  ersetzt.

Gl. 6.5  $a = 88 \cdot 10^{-9} \cdot (9,6 - 7,9 \cdot n)$   $[(\text{m}^2/\text{MN})^3 \cdot \text{s}^{-1}]$

Weiterhin soll die mit Gl. 6.5 angegebene Gerade nach Haefeli et al, 1968 vereinfachend durch den Ansatz  $a=b \cdot 10^{(d \cdot n)}$  ersetzt werden, um einen direkten Faktorenvergleich mit den hier abgeleiteten Kriechmoduli zu ermöglichen.

Für die Untersuchungen von Haefeli et al, 1968 ermittelt sich der Kriechmodul des inkompressiblen Eises, der Faktor b für den oben gewählten Ansatz, zu  $2,21 \cdot 10^{-8} [(m^2/MN)^3 s^{-1}]$ . Die weitere Auflösung für ein beliebiges von 0 verschiedenes n ergibt  $d = 7,94$ . Die Beziehung nach Haefeli et al, 1968 kann nun mit Gl. 6.6 beschrieben werden.

$$\text{Gl. 6.6} \quad a = 2,21 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{(7,94 \cdot n)} \quad [(m^2/MN)^3 s^{-1}]$$

Der aus den eigenen Versuchen gewonnene schraffierte Bereich der a-Werte, lässt einen quadratischen Ansatz für die Porosität im Exponenten vermuten. Mit dem vorhergehenden Ansatz und einem aus dem schraffierten Bereich extrapoliertem b-Wert von  $5 \cdot 10^{-8}$  wird der Exponent d aus dem Ansatz  $\{d=1/n \cdot \log(a/b)\}$  ermittelt. Nach Auftragung der d-Werte über n ergibt sich eine Regressionsgerade für d und daraus Gl. 6.7, deren Verlauf Abb. 6.18 zeigt.

$$\text{Gl. 6.7} \quad a = 5 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{(1,75 \cdot n + 16,64 \cdot n^2)} \quad [(m^2/MN)^3 s^{-1}]$$

Der Vergleich zwischen den abgeleiteten Beziehungen der Gl. 6.6 und 6.7 ergibt im Dichtebereich von  $0,6 \text{ g/cm}^3$  bis ca.  $0,87 \text{ g/cm}^3$  ( $n=0,3$  bis  $0,05$ ) eine gute Übereinstimmung. Für die außerhalb dieses Bereichs liegenden Dichten stellen sich nach Haefeli et al, 1968 geringere Verformungsraten ein.

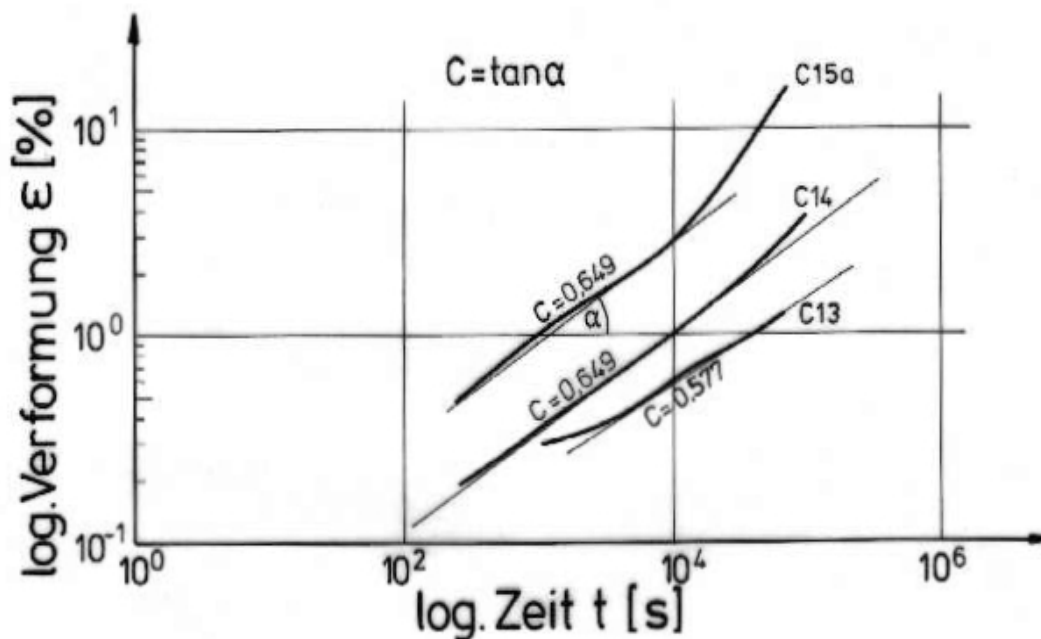
Die aus Mellor et al, 1966 ermittelten Kriechmoduli für geringe Dichten lassen sich gut in Gl. 6.7 einbinden (vgl. Abb. 6.18). Versuche von Mellor et al, 1982 deuten weiterhin auf einen Kriechmodul für Eis ( $n=0$ ), der noch oberhalb des nach Gl. 6.7 ermittelten Wertes liegt.

Mit den abgeleiteten Beziehungen nach Gl. 6.6 und 6.7 kann der Kriechverlauf durch den stationären nichtlinearen Kriechmodul a im sekundären Kriechbereich beschrieben werden. Die in der Primärphase erfolgten Verformungen werden dabei nicht erfasst.

Eine Möglichkeit, die bis zum Erreichen der Sekundärphase akkumulierten Verformungen zu berücksichtigen, besteht in der Einführung eines Zeitexponenten  $C < 1$ . Durch Anwendung der Gl. 4.6 mit  $C < 1$  wird im folgenden Abschnitt der zeitabhängige nichtlineare Kriechmodul A aus den durchgeführten Kriechversuchen bestimmt.

#### 6.4.2 ABLEITUNG DES DICHTEABHÄNGIGEN NICHTLINEAREN ZEITABHÄNGIGEN KRIECHMODULS

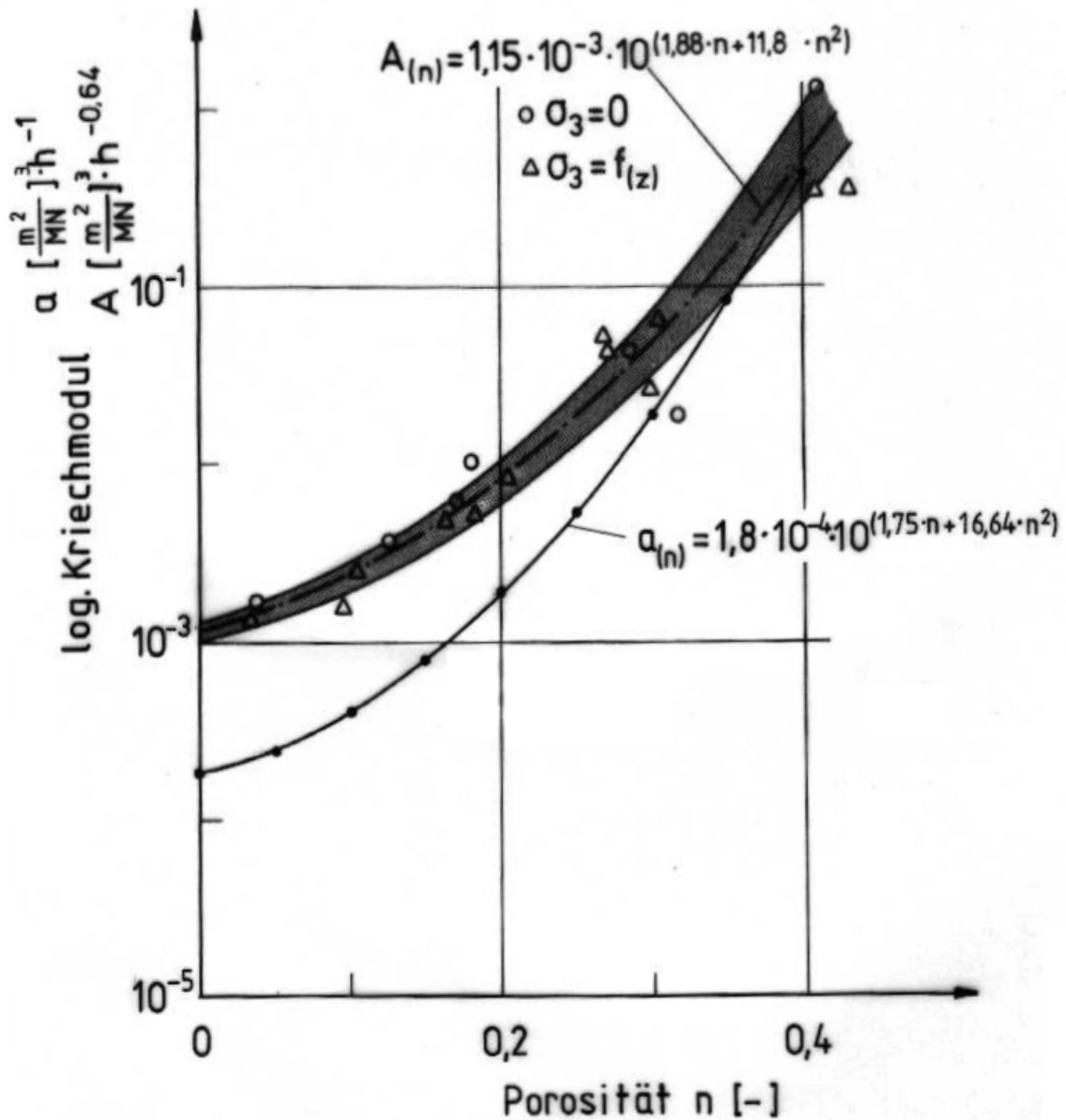
Der Zeitexponent  $C$  nach Gl. 4.6 wurde von Ramseier et al, 1964 aus den doppelt-logarithmischen Darstellungen der Zeit-Verformungskurven gewonnen. Er ist nach den Ausführungen des Kapitels 4.3.2 unabhängig von der Firndichte und der Belastung. Die Abb. 6.19 zeigt in dieser Form durchgeführte Auswertungen der Kriechversuche und unterstreicht die Unabhängigkeit des Zeitexponenten von der Spannung und der Dichte.



**Abb. 6.19: Doppelt-logarithmische Darstellung der Laborversuche**

In Abb. 6.19 stellt sich nach Abklingen der Primärphase annähernd eine Gerade ein, aus deren Neigung sich der Spannungsexponent  $C$  ermittelt. Mit  $C=0,64$  konnten bei der Ermittlung der Kriechmoduli  $A$  durch 'curve fitting' die Krümmungen der Kriechkurven im primären und sekundären Kriechbereich gut beschrieben werden. Das Eintreten der tertiären Kriechphase zeigt sich in einem Anstieg der Geradenneigung wie es die Versuche C 14 und C 15a erkennen lassen.

Mit dem konstanten Spannungsexponenten  $B=3$  und dem Zeitexponenten  $C=0,64$  wurden die Kriechmoduli  $A$  durch die beste Annäherung an die Kriechkurvenverläufe bestimmt und in Abb. 6.20 abhängig von der Porosität dargestellt.



**Abb. 6.20: Abhängigkeit des zeitabhängigen Kriechmoduli A von der Porosität**

Die rechnerisch ermittelten Kriechkurven sind zum Vergleich zusätzlich zu den in der Anlage 3 aufgeführten gemessenen Kurven strichpunktiert eingetragen. Die Kriechmoduli sind für Tests mit behinderter und unbehinderter Seitendehnung mit verschiedenen Signaturen gekennzeichnet.

Die ohne Seitendruck erhaltenen Werte liegen größtenteils über den Werten, die aus Kriechversuchen mit behinderter Seitendehnung ermittelt wurden. Jedoch erlaubt die Streuung der Werte, speziell im Bereich geringer Dichten, keine Aussage, die eine Differenzierung zwischen den einaxialen und triaxialen Versuchen rechtfertigt.



Deshalb werden zunächst Funktionen ermittelt, die den gefundenen Streubereich weitgehend eingrenzen. Zur Beschreibung der Abhängigkeit zwischen der Porosität und dem Kriechmodul wird wie im Abschnitt 6.4.1 verfahren.

Als obere und untere Begrenzung des in Abb. 6.20 sichtbaren Streubereichs der Versuchswerte ergeben sich die Grenzfunktionen

$$\text{Gl. 6.8} \quad \mathbf{A_O = 0,0013 \cdot 10^{(2 \cdot n + 12,8 \cdot n^2)}} \quad [(m^2/MN)^3 \cdot h^{-0,64}]$$

$$\text{Gl. 6.9} \quad \mathbf{A_U = 0,001 \cdot 10^{(1,75 \cdot n + 10,8 \cdot n^2)}} \quad [(m^2/MN)^3 \cdot h^{-0,64}]$$

Aus Gl. 6.8 und Gl. 6.9 folgt die gemittelte Funktion

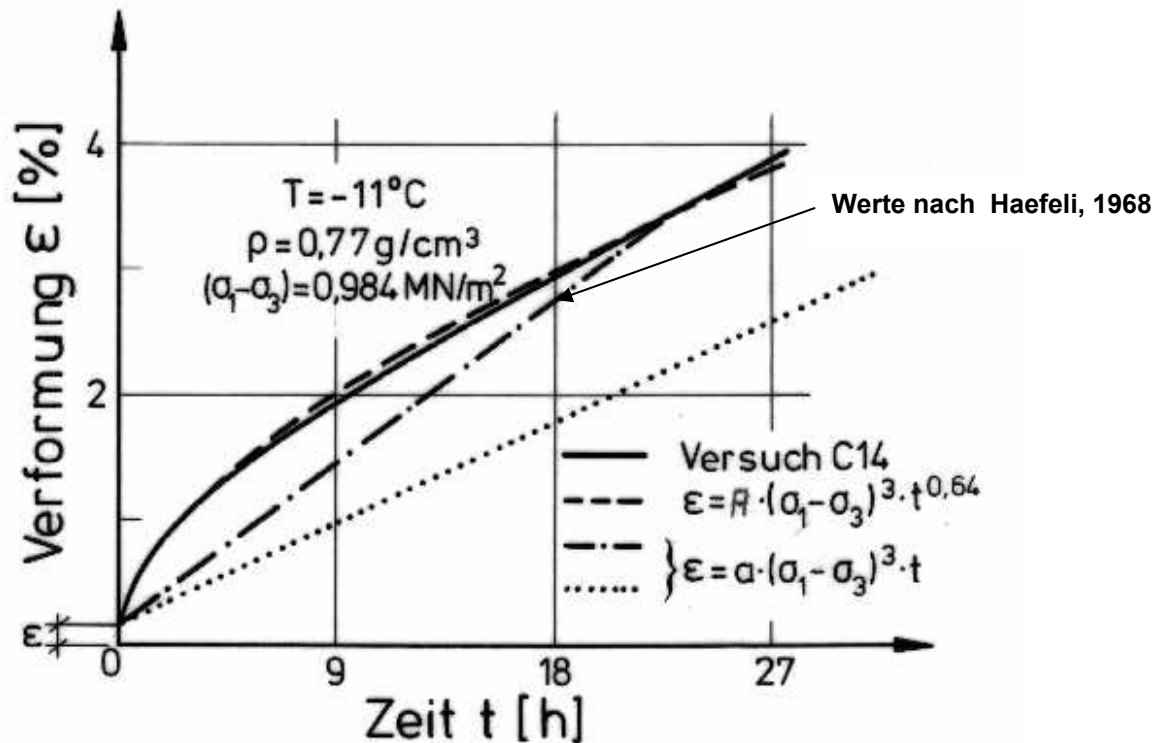
$$\text{Gl. 6.10} \quad \mathbf{A = 0,00115 \cdot 10^{(1,88 \cdot n + 11,8 \cdot n^2)}} \quad [(m^2/MN)^3 \cdot h^{-0,64}]$$

Nach Einbau von Gl. 6.10 in Gl. 4.6 wird die Verformung des Firms abhängig von der Dichte und der Spannung durch Gl. 6.11 beschrieben.

$$\text{Gl. 6.11} \quad \mathbf{\varepsilon = 0,00115 \cdot 10^{(1,88 \cdot n + 11,8 \cdot n^2)} \cdot \sigma^3 \cdot t^{0,64}} \quad [-]$$

Für den Versuch C 14 ist der Verlauf der mit Gl. 6.11 berechneten Verformungen im Vergleich zu den Messwerten in Abb. 6.21 dargestellt. Die Anfangsverformungen wurden nicht berechnet, sondern aus dem Versuch übernommen.

Die Berechnungen erfolgten einerseits mit den nichtlinearen stationären Ansätzen der Kriechmoduli  $a$  nach Gl. 6.6 (strich-punktierte Linie, basierend auf Haefeli et al, 1968) und den nach Gl. 6.7 ermittelten  $a$ -Werten (punktierte Linie) sowie mit dem nichtlinearen instationären Ansatz nach Gl. 6.11.



**Abb. 6.21: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Kriechkurven**

Im Vergleich zu der gemessenen Kurve ist die Geradensteigung nach Haefeli et al, 1968 zu steil und liefert nach Ablauf der Primärphase zu große Verformungen.

Demgegenüber liefert die Verwendung der hier ermittelten  $a$ -Werte eine Gerade, die um die in der Primärphase akkumulierten Verformungen parallel versetzt ist. Der quasi-stationäre Kriechbereich der experimentellen Kurve wird durch die annähernd gleiche Verformungsrate gut beschrieben.

Den gekrümmten Verlauf der Kriechkurve, speziell im primären Bereich, nähert die Berechnung nach Gl. 6.11 an. Durch die zeitliche Abnahme der Verformungsrate können die in der Primärphase auftretenden größeren Verformungen berücksichtigt werden.

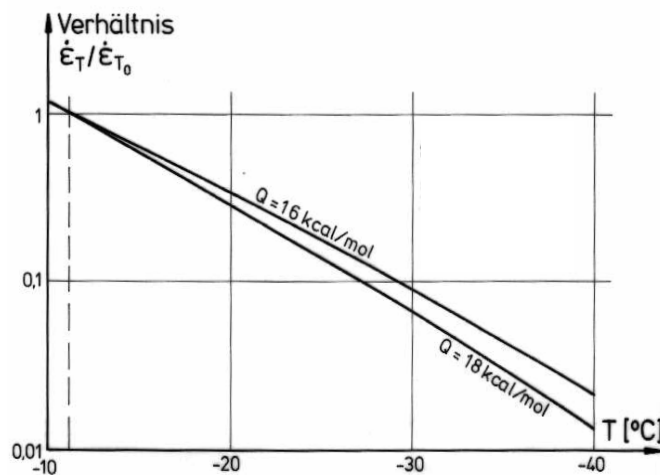
## 6.5 BERÜCKSICHTIGUNG DES TEMPERATUREINFLUSSES

Nach Kapitel 4.2.2 verringert sich die Verformungsgeschwindigkeit bei abnehmender Temperatur. Bader et al, 1962 beschreiben den Zusammenhang zwischen der Verformungsrate, die bei der Versuchstemperatur  $T_0$  ermittelt wurde und der unbekanntem Verformungsrate bei der Temperatur  $T$  durch den Ansatz der Gl. 6.12

$$\text{Gl. 6.12} \quad d\epsilon_T / dt = (d\epsilon_{T_0} / dt) \cdot e^{-Q/(R \cdot T)} / e^{-Q/(R \cdot T_0)}$$

mit	$d\epsilon_T/dt$	Verformungsrate bei der Temperatur T
	$d\epsilon_{T_0}/dt$	Verformungsrate der Vergleichstemperatur $T_0$
	Q	Aktivierungsenergie (16 – 18 kcal/mol)
	R	Gaskonstante (1,987 cal/mol)
	T	Temperatur in $^{\circ}\text{K}$

Die Aktivierungsenergie für Firn wird von Mellor, 1964 mit 11 kcal/mol bis 18 kcal/mol (dichteabhängig) angegeben. Sorgfältige Untersuchungen von Mellor et al, 1969 ergaben für die Aktivierungsenergie von polykristallinem Eis einen Wert von 16,4 kcal/mol. Michel, 1978 gibt für Schneeeis einen Wert von 17,43 kcal/mol an. Die Rechenwerte für die Aktivierungsenergie liegen demnach zwischen 16 bis 18 kcal/mol. Für diese beiden Grenzwerte kann die Umrechnung der aus den Versuchen ermittelten Verformungsgeschwindigkeiten auf andere Temperaturen (kleiner als  $-11^{\circ}\text{C}$ ) mit Abb. 6.22 für den stationären Fall ( $C=1$ ) durchgeführt werden.



**Abb. 6.22: Diagramm zur Ermittlung des temperaturabhängigen Verhältnissfaktors bezogen auf  $-11^{\circ}\text{C}$**

Für Temperaturen oberhalb  $-10^{\circ}\text{C}$  besteht keine linear exponentielle Abhängigkeit mehr zwischen der Temperatur und der Verformungsgeschwindigkeit (s. Abb. 4.9), so dass die Temperaturumrechnung nach Gl. 6.12 auf den Bereich mit Temperaturen unter  $-10^{\circ}\text{C}$  beschränkt bleiben muss. Bei Zeitabhängigkeit ( $C \neq 1$ ) führt nach Klein, 1978 der Ansatz für die Dehnung

$$\epsilon = \hat{A} \cdot \sigma^B \cdot [t \cdot e^{-Q/(R \cdot T)}]^C$$

und daraus Gl. 6.13

$$\text{Gl. 6.13} \quad A = \hat{A} \cdot e^{-Q \cdot C / (R \cdot T)}$$

zu der Umrechnung der Kriechmoduli auf eine Anpassung an andere Temperaturen.

## 7. SPANNUNGSBEREICHE DER STOFFGESETZE

Bei stationärer Betrachtung unter geringen Spannungen liefert der lineare Ansatz nach Gl. 4.2 höhere Verformungsraten als das kubische Stoffgesetz nach Gl. 6.3. Die Stoffgesetze mit linearen oder kubischen Spannungsansatz sind deshalb nicht für alle Spannungen beliebig anwendbar. Es bedarf der Festlegung von Spannungsgrenzen innerhalb derer sie sinnvoll angewandt werden können.

Unabhängig voneinander werden für beide Stoffgesetze die Verformungen über ein breites Spannungsspektrum für mehrere Dichten ermittelt; ausgehend von Gl. 4.2 und den Werten der Druckviskosität nach Gl. 5.9a bzw. 5.12 für den linearen sowie mit der Gl. 6.11 für den kubischen Spannungsansatz.

Für jede Dichte ergibt sich zwischen der linearen und der kubischen Beschreibung ein Schnittpunkt. Aus der Betrachtung aller Dichtebereiche resultiert ein Überschneidungsbereich der Spannungs-Verformungsraten Beziehungen, der als Grenzbereich zwischen linearen und nichtlinearen Verhalten angesehen wird.

Da die aus dem linearen Spannungsansatz abgeleitete Spannungs-Verformungsraten-Relation für die quasi-stationäre Verformungsrate Gültigkeit hat, ist für das nichtlineare instationäre Stoffgesetz zunächst der Zeitpunkt bis zum Erreichen der minimalen Verformungsrate abzuschätzen.

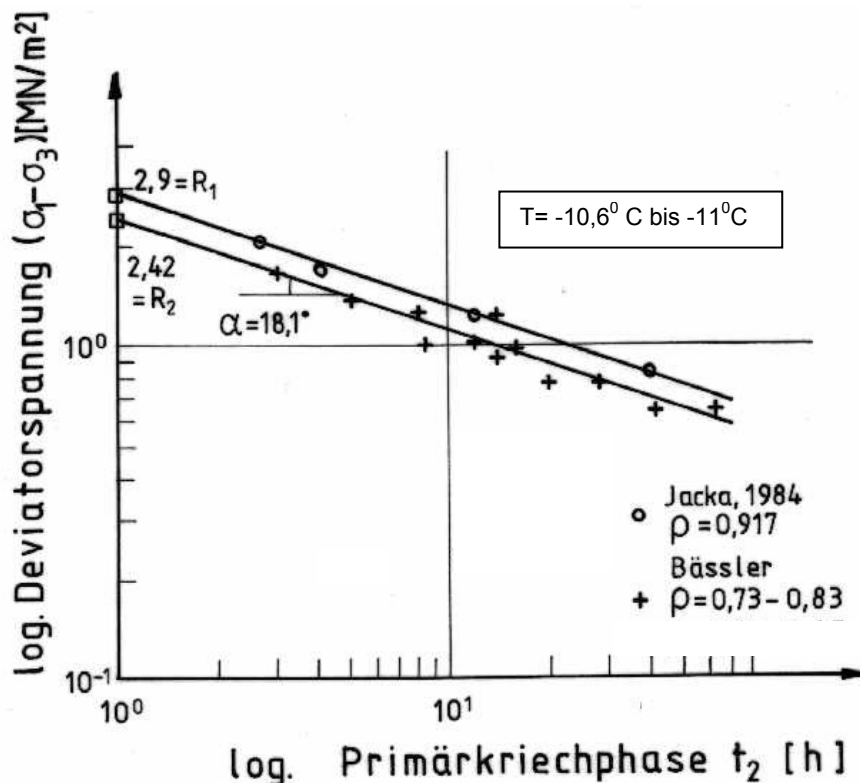
### 7.1 ABSCHÄTZUNG DER DAUER DES PRIMÄRKRIECHENS

Die Primärkriechphase wird durch die Abnahme der Verformungsrate bei konstanter Spannung gekennzeichnet. Wie in Abb. 4.5 gut erkennbar, erreicht die Verformungsrate zum Zeitpunkt  $t_2$  einen Minimalwert. Nach Gl. 6.11 wird jedoch eine permanente Abnahme der Verformungen berechnet, die keinen direkten Vergleich mit den von Beginn an stationären Materialgesetzen und den dafür abgeleiteten Stoffparametern zulässt.

Wie Ramseier et al, 1964 feststellten, ist die Dauer der Primärphase eine Funktion der Firndichte, der Firntemperatur und der aufgetragenen Belastung. Mellor et al, 1982 und 1983, sowie Jacka, 1984b geben Beziehungen für die Abhängigkeit der Übergangskriechdauer von der Spannung und der Temperatur für polykristallines Eis an. Danach verringert sich mit zunehmender Spannung die Dauer des Primärkriechens.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen von Ramseier et al, 1964 an Firn, stellte Jacka, 1984b für Eis eine Zunahme von  $t_2$  bei abnehmender Temperatur fest.

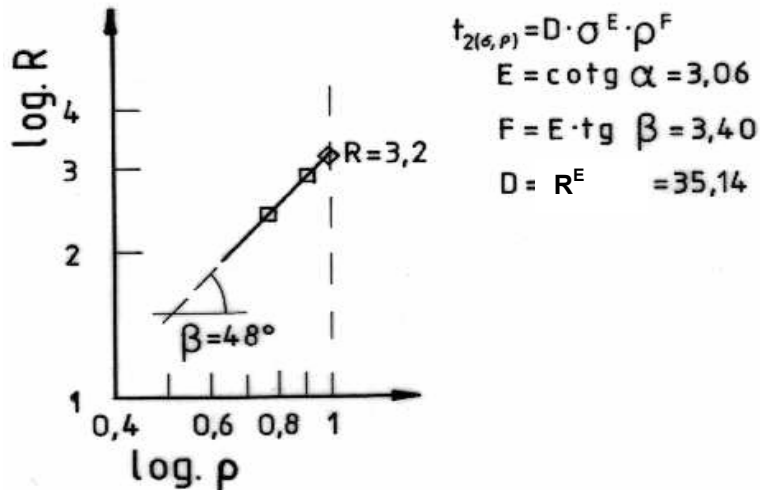
Nachfolgend werden aus den Kriechversuchen und den daraus ermittelten doppelt-logarithmischen Darstellungen der Verformungsraten-Zeitverläufe die Zeitpunkte bis zum Erreichen der minimalen Verformungsrate abgeschätzt und in Anlehnung an Mellor et al, 1983 abhängig von der Kriechspannung für den Dichtebereich  $0,73 \text{ g/cm}^3$  bis  $0,83 \text{ g/cm}^3$  doppelt-logarithmische aufgetragen. Ergänzt werden die aus den Versuchen gewonnenen Werte durch Angaben von Jacka, 1984b, die aus Kriechversuchen an Eis bei  $-10,6^\circ\text{C}$  gewonnen wurden. Aus der doppelt-logarithmischen Darstellung der Abb. 7.1 ist eine stetige Abnahme der Primärkriechphase mit zunehmender Spannung erkennbar.



**Abb. 7.1: Doppelt-logarithmische Darstellung der Dauer der Primärkriechphase in Abhängigkeit von der Kriechspannung**

Die aus den Laborversuchen ermittelten Werte für Firn mit Dichten von  $0,73 \text{ g/cm}^3$  bis  $0,83 \text{ g/cm}^3$  lassen sich durch eine Gerade verbinden, die parallel etwas unterhalb zu der von Jacka, 1984b gefundenen Geraden verläuft.

Bei hohen Spannungen geht die Primärkriechphase gegen 0, so wie es der in der Anlage 3 gezeigte Versuch C 18 deutlich erkennen lässt. Nach Durchlaufen einer kurzen Primärphase wird nur für eine kurze Zeit die minimale Verformungsrate erreicht, worauf die tertiäre Phase folgt, in der die Verformungsgeschwindigkeit wieder ansteigt.



**Abb. 7.2: Ansatz zur Bestimmung der Dichte- und Spannungsabhängigkeit von  $t_2$**

Die Auswertung hinsichtlich der Dichte- und Spannungsabhängigkeit von  $t_2$  erfolgt nach Klein, 1978 in der in Abb. 7.2 dargestellten Weise unter Benutzung der in Abb. 7.1 erhaltenen R-Werte und kann in einem ersten Ansatz für den Dichtebereich von  $0,73 \text{ g/cm}^3$  bis  $0,917 \text{ g/cm}^3$  mit Gl. 7.1 beschrieben werden.

$$\text{Gl. 7.1} \quad t_2(\sigma, \rho) = 35,14 \cdot \sigma^{-3,06} \cdot \rho^{3,4} \quad [\text{h}]$$

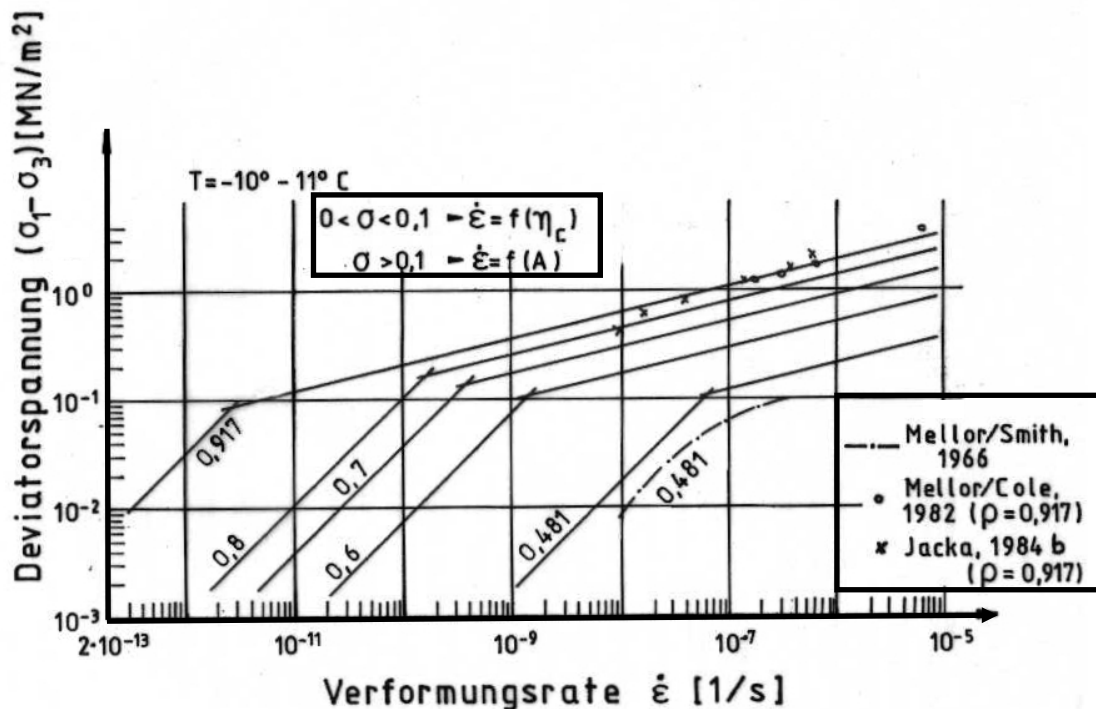
Da kein ausreichendes Datenmaterial zur Auswertung für geringere Dichten vorhanden ist, wird die hier gefundene Abhängigkeit für den gesamten Dichtebereich angesetzt. Wie die späteren Ableitungen in Kapitel 8 zeigen erscheint diese Annahme als vertretbar.

## 7.2 ANWENDUNGSGRENZEN DER STOFFGESETZE

Nach der Ableitung der Gl. 6.11 nach  $t$  und Einsetzen der Gl. 7.1 für  $t$  führt Gl. 7.2 zur Ermittlung der quasi-stationären Verformungsrate.

$$\text{Gl. 7.2} \quad d\epsilon_2/dt = (2,2722 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{(1,88 \cdot n + 11,8 \cdot n^2)} \cdot (1-n)^{-1,224} \cdot \sigma^{4,102}) / 3600 \quad [\text{s}^{-1}]$$

Mit den Werten nach Gl. 7.2 für den nichtlinearen und der nach  $d\epsilon/dt$  umgestellten Gl. 4.2 unter Einbeziehung der in Kapitel 5 abgeleiteten Druckviskositäten für den linearen Bereich wurde Abb. 7.3 erstellt.



**Abb. 7.3: Quasi-stationäre Verformungsraten  $d\varepsilon_2/dt$  als Funktion der Spannung für unterschiedliche Dichten  $\rho$**

Abb. 7.3 zeigt die Spannungs-Verformungsraten Beziehungen für unterschiedliche Dichten bei einer Temperatur von  $-11^{\circ}\text{C}$  mit den aus den beiden Gesetzen resultierenden Verläufen. Für die Dichten  $0,481\text{ g/cm}^3$  und  $0,917\text{ g/cm}^3$  sind Werte aus Versuchen von Mellor et al, 1966 und 1982 sowie Jacka, 1984b an künstlich hergestellten Firn- und Eisproben eingetragen.

Die Verwendung der hier ermittelten Parameter für die nichtlineare Spannungsabhängigkeit ergibt für  $0,917\text{ g/cm}^3$  eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen der genannten Autoren. Für  $0,481\text{ g/cm}^3$  liegen die hier ermittelten Verformungsraten geringfügig niedriger als die von Mellor, Smith, 1966 abgeleiteten Werte, zeigen aber die gleiche Tendenz.

Die Geraden für den linearen Spannungsbereich verlaufen unter  $45^{\circ}$ . Nach Gl. 7.2 stellt sich für den nichtlinearen Spannungsbereich ein unter  $76,3^{\circ}$  geneigter Verlauf der Geraden ein.

Die Schnittpunkte der zueinander parallelen Verbindungsgeraden für die dargestellten Dichten liegen im Bereich von  $0,1\text{ MN/m}^2$  bis  $0,2\text{ MN/m}^2$ . Generell ist ersichtlich, dass Spannungen unterhalb  $0,1\text{ MN/m}^2$  mit der linearen Beziehung und über  $0,2\text{ MN/m}^2$  mit der nichtlinearen Beziehung zu höheren Verformungsgeschwindigkeiten führen. Wegen eines fehlenden kontinuierlichen Überganges zwischen den Stoffgesetzen wird aus Sicherheitsüberlegungen vorgeschlagen, in diesem Bereich die Verformungsraten nach beiden Stoffgesetzen zu bestimmen und die jeweils höhere anzusetzen.

## 8. BERECHNUNG DER DRUCKFESTIGKEITEN VON FIRN ÜBER DIE ZUVOR ERMITTELTEN FUNKTIONEN ZUR BESCHREIBUNG DER KRIECHVORGÄNGE

Die durchgeführten Druck- und Kriechversuche unterscheiden sich durch die Verformungsraten bzw. die aufgebrachten Spannungen. Bei den Versuchen zur Bestimmung der Festigkeit wird die Verformungsrate konstant gehalten. Dadurch steigt die Spannung bis zur Druckfestigkeit an. Wird hingegen die Spannung konstant gehalten, so variiert die Verformungsrate. Liegt die Verformungsrate unterhalb einer gewissen Grenze, so geht das spröde in ein duktileres Verhalten über.

Es ist offensichtlich, dass zwischen den Druck- und Kriechversuchen Zusammenhänge bestehen, die mit den abgeleiteten Stoffgesetzen beschreibbar sein sollten.

Durch Umstellung der für die Kriechversuche ermittelten Gesetzmäßigkeiten werden nachfolgend dichte- bzw. verformungsratenabhängige Druckfestigkeiten berechnet, die zur Kontrolle mit Werten aus der Literatur bzw. den eigenen Versuchen verglichen werden. Der sich ergebende Grad der Übereinstimmung ist damit indirekt ein Maß für die Aussagekraft der in den Laborversuchen abgeleiteten Materialparameter und der mit ihnen verwandten Stoffgesetze.

### 8.1 DRUCKFESTIGKEIT ALS FUNKTION DER FIRNDICHTE

Aus Gl. 6.3 kann bei Auflösung nach der Spannung und bei Kenntnis der Zeit bis zum Erreichen der Festigkeit und der bis dahin eingetretenen Bruchverzerrung die Verbindung zu den Druckversuchen mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit hergestellt werden. Die Auflösung der Gl. 6.3 nach der Spannung ergibt

$$\text{Gl. 8.1} \quad \sigma = \left[ \frac{d\varepsilon/dt}{A \cdot C \cdot t^{C-1}} \right]^{1/3} \quad [\text{MN/m}^2]$$

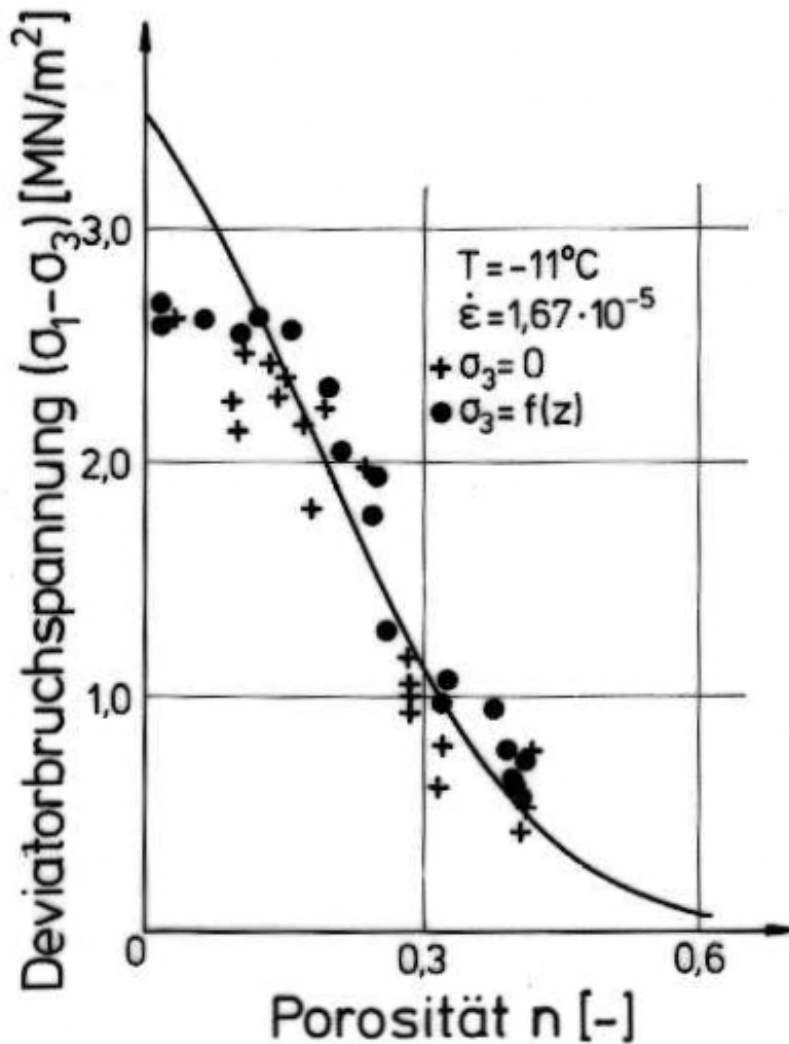
Bei den Druckversuchen blieb die Verformungsrate mit  $0,06 \text{ h}^{-1}$  konstant. Die Zeit bis zum Bruch folgt aus dem Quotienten der Bruchverzerrung und der Verformungsrate.

Über Gl. 6.1a ergeben sich die von der Porosität abhängigen Bruchverzerrungen. Nach Einsetzen der ermittelten Beziehungen in Gl. 8.1 ergibt sich die Druckfestigkeit zu

$$\text{Gl. 8.2} \quad \sigma_B = (0,64 \cdot A)^{-1/3} \cdot \varepsilon_B^{0,12} \cdot (d\varepsilon/dt)^{0,213} \quad [\text{MN/m}^2]$$



Abb. 8.1 gibt den Verlauf der nach Gl. 8.2 ermittelten Festigkeiten in Abhängigkeit von der Porosität wieder. Zum Vergleich sind die aus den von den Kriechversuchen unabhängig durchgeführten Druckversuchen ermittelten Festigkeiten eingetragen.



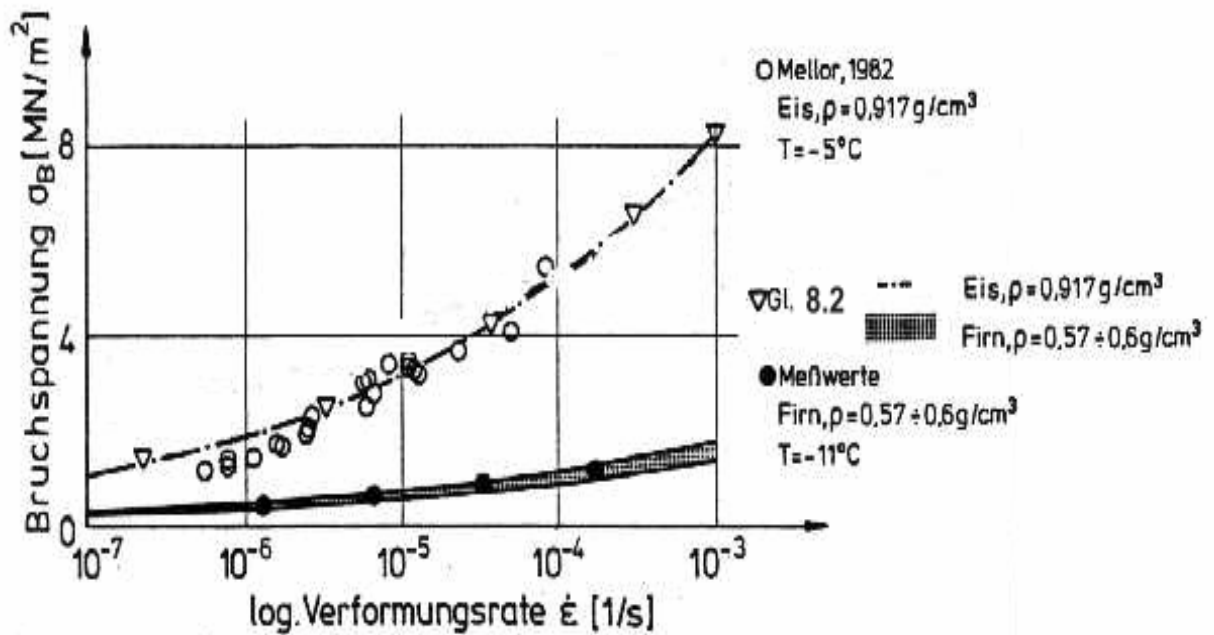
**Abb. 8.1: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Porosität**

Im Dichtebereich von  $0,5 \text{ g/cm}^3$  bis  $0,8 \text{ g/cm}^3$  ( $n=0,45$  bis  $0,13$ ) ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Druckfestigkeiten.

Die gemessene Abnahme des Festigkeitszuwachses ab  $0,8 \text{ g/cm}^3$  wird durch den rechnerischen Verlauf (durchgezogene Linie) nicht erfasst. Extrapoliert man aus dem Verlauf der Messwerte die Festigkeit des inkompressiblen Eises und errechnet sich über Gl. 8.2 den erforderlichen A-Wert, so ergibt sich ein A von  $2,5 \cdot 10^{-3}$  bis  $2,8 \cdot 10^{-3}$  anstatt  $1,15 \cdot 10^{-3}$ , der anzeigt, dass die in Abb. 6.20 dargestellte Kriechmodulabhängigkeit mit abnehmender Porosität stärker gekrümmt sein könnte.

## 8.2 DRUCKFESTIGKEIT ALS FUNKTION DER VERFORMUNGSRATE

Durch die Variation der Verformungsrate in Gl. 8.2 kann die Änderung der Festigkeit simuliert werden. Abb. 8.2 zeigt den durch Variation der Verformungsrate in Gl. 8.2 ermittelten Bereich der Festigkeiten für die in den Versuchen verwendeten Dichten von  $0,57 \text{ g/cm}^3$  bis  $0,6 \text{ g/cm}^3$  im Vergleich zu den eigenen Messwerten.



**Abb. 8.2: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Verformungsrate**

Weiterhin werden Untersuchungsergebnisse von Mellor et al, 1982 an polykristallinem Eis mit Gl. 8.2 verglichen. Die Festigkeiten nach Mellor et al, 1982 wurden bei einer Temperatur von  $-5^\circ\text{C}$  ermittelt. Der rechnerische Verlauf approximiert gut diese Werte ab einer Verformungsrate von  $5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ . Da aber Gl. 8.2 für  $T = -11^\circ\text{C}$  abgeleitet wurde, sind die kalkulierten Festigkeiten geringfügig kleiner. Das lässt wiederum auf zu kleine A-Werte bei Dichten über  $0,8 \text{ g/cm}^3$  schließen.

Michel, 1978 stellte Untersuchungsergebnisse für polykristallines Eis bei einer Testtemperatur von  $-10^\circ\text{C}$  für den Verformungsgeschwindigkeitsbereich  $10^{-8} \text{ s}^{-1}$  bis  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  zusammen. Wie aus Abb. 8.3 hervorgeht, ist die über Gl. 8.2 erhaltene Annäherung sehr gut.

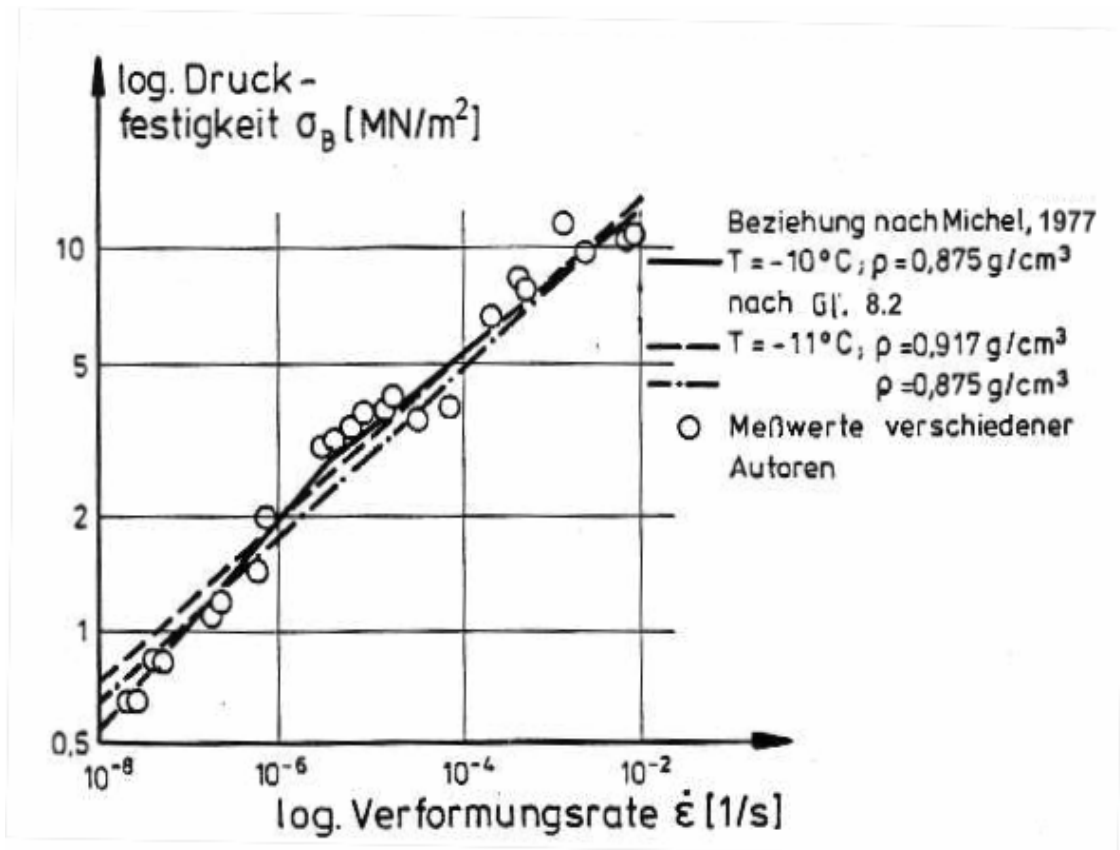


Abb. 8.3: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Verformungsrate

## 9. SCHLUSSBETRACHTUNG UND AUSBLICK

Die Bauaktivitäten in der Antarktis werden durch den Einstieg weiterer Nationen in die Antarktisforschung stärker zunehmen. Bauten im und auf dem Firn müssen hinsichtlich ihrer Ausführbarkeit berechnet werden. Besondere Aufmerksamkeit ist dabei auf die Kontaktstelle zwischen Firn und Bauwerk zu legen.

Zur Berechnung stehen dem Ingenieur eine Reihe unterschiedlicher Methoden zur Verfügung. Er hat die Auswahl zwischen numerischen und analytischen Verfahren.

Die Vorteile, die numerische Lösungen bieten, werden infolge der notwendigen umfangreichen Vor- und Auswertarbeiten jedoch noch wenig genutzt. Eine eingehende Einarbeitung in die Verfahren und die Rechnertechnologie sowie ein kritisches Urteilsvermögen gegenüber den Ergebnissen sind weitere unabdingbare Voraussetzungen zur Anwendung derartiger Methoden.

Die einfachere Handhabung analytischer Verfahren verlangt Abstriche bezüglich der berechenbaren Geometrien und Randbedingungen. Als ein Beispiel zur Reduktion der räumlichen Geometrie auf ein ebenes analytisch berechenbares Problem sei der unendlich lange Hohlzylinder angeführt, der bereits von Landauer, 1957 für eine Schacht- und Tunnelkonvergenzberechnung im Firn und Eis genutzt wurde. Dazu transformierte Landauer, 1957 elastische Materialparameter in deren viskoses Pendant und ermittelte die Verformungen unter Vernachlässigung der elastischen Anfangsverformungen. Seine Ableitungen sind nur für den Fall zutreffend, dass die Verzerrungsrate linear von der Spannung abhängt.

Ein Berechnungsverfahren nach Ladanyi, 1984 berücksichtigt nicht-lineares instationäres Kriechen, setzt aber Inkompressibilität des Materials und einen hydrostatischen Spannungszustand voraus. Diese Annahmen treffen für die oberen Firnschichten nicht zu. Deshalb sind hier ergänzende Betrachtungen zur Kompressibilität des Firms anzustellen. Mit zunehmender Tiefe nähert sich die Firndichte der Dichte des Eises, in der dann ein hydrostatischer Spannungszustand angenommen werden kann.

Die hier vorgestellten Materialparameter für Firn und Eis ermöglichen Verformungsabschätzungen für nahezu alle im polaren Bauwesen vorkommenden Firndichten über den gesamten Spannungsbereich bis hin zur Bruchspannung. Nach dem Einbau in geeignete Rechenverfahren kann die Interaktion zwischen Firn und Bauwerk abgeschätzt werden.

## SYMBOLVERZEICHNIS

Symbol	Dimension	Bedeutung
a	$(\text{m}^2/\text{MN})^{3 \cdot h}$	linear zeitabhängiger Kriechmodul
A''	$(\text{g}/\text{cm}^2 \cdot a)$ ; $(\text{cm}/a)$	Akkumulationsrate
A	$(\text{m}^2/\text{MN})^{3 \cdot h \cdot C}$	nichtlinear zeitabhängiger Kriechmodul
Å	$(\text{m}^2/\text{MN})^{3 \cdot h \cdot C}$	Temperaturumrechnungsparameter
b	(-)	Rechenvariable
B	(-)	Spannungsexponent
C	(-)	Zeitexponent
d	$(\text{cm})$ ; (-)	Korndurchmesser; Rechenvariable
D	$(\text{cm})$ ; (-)	Probendurchmesser; Rechenvariable
E	$(\text{MN}/\text{m}^2)$	Hook'scher Elastizitätsmodul
E <sub>0</sub>	$(\text{MN}/\text{m}^2)$	Federsteifigkeit des Maxwellmodells
E <sub>1</sub>	$(\text{MN}/\text{m}^2)$	Federsteifigkeit des Voigt-Kelvinmodells
E <sub>s</sub>	$(\text{MN}/\text{m}^2)$	Sekantenmodul
F	$(\text{cm}^2)$	Dünnschlifffläche
h	$(\text{cm})$	Probenhöhe
Δh	$(\text{cm})$ ; $(\text{m})$	Probenverformung, Schichtsetzung
K <sub>0</sub>	(-)	Seitendruckverhältnis $\sigma_v / \sigma_h$
m	(-)	Poissonzahl
n	(-); (%)	Porosität
N	(-)	Kornanzahl
Q	$(\text{kcal}/\text{mol})$	Aktivierungsenergie
R	$(1,987 \text{ cal}/\text{mol})$	uni. Gaskonstante ( $1 \text{ cal}/\text{mol} = 4,18443 \text{ J}/\text{molK}$ )
s	$(\text{cm})$	Horizontalverformung
t	$(\text{s})$ ; $(\text{h})$ ; $(\text{d})$	Zeit, Belastungsdauer
t <sub>2</sub>	$(\text{s})$ ; $(\text{h})$ ; $(\text{d})$	Beginn der quasi-stationären Kriechphase
t <sub>3</sub>	$(\text{s})$ ; $(\text{h})$ ; $(\text{d})$	Beginn der tertiären Kriechphase
T	$(^\circ\text{C})$ ; $(^\circ\text{K})$	Temperatur

$u_o$	(m/a); (cm/a)	Fließgeschwindigkeit an der Firnoberfläche
$u_u$	(m/a); (cm/a)	Fließgeschwindigkeit zwischen Eisunter- und Gesteinsoberkante
$z$	(m)	Tiefe unter Geländeoberkante
$z_o$	(m)	Tiefeneinheit (1 m)
$z''$	(-)	dimensionslose Tiefe $z/z_o$
$\alpha$	( $^\circ$ )	Winkel zwischen Flächennormale und c-Achse
$\varepsilon$	(%)	Verformung
$\dot{\varepsilon}, d\varepsilon/dt$	(1/s)	Verformungsrate
$\varepsilon_B$	(-) (%)	Bruchverformung
$\varepsilon_V$	(-) (%)	Vertikalverformung
$d\varepsilon_V/dt$	(1/s)	Vertikalverformungsrate
$\varepsilon_o$	(-)	elastische Sofortverformung
$\varepsilon_1$	(-)	Verformung in der primären Phase
$d\varepsilon_1/dt$	(1/s)	Verzerrungsrate in der primären Phase
$\varepsilon_2$	(-)	Verformung in der sekundären Phase
$d\varepsilon_2/dt$	(1/s)	Verformungsrate in der sekundären Phase
$\eta, \eta_c$	(P); (MN/m <sup>2</sup> ) $\cdot$ h	Druckviskosität
$\eta_2$	(P); (MN/m <sup>2</sup> ) $\cdot$ h	Viskosität des Dämpfers im Maxwell-Modell
$\nu$	(-)	Querdehnungszahl
$\rho$	(g/cm <sup>3</sup> ); (kN/m <sup>3</sup> )	Firndichte
$\rho_o$	(g/cm <sup>3</sup> ); (kN/m <sup>3</sup> )	Firndichte an der Schneeoberfläche
$\rho_E$	(g/cm <sup>3</sup> ); (kN/m <sup>3</sup> )	Dichte des inkompressiblen Eis
$\Phi$	(s); (h)	Retardationszeit
$\sigma, \sigma_V$	(kN/m <sup>2</sup> ); (MN/m <sup>2</sup> )	Spannung; Auflastspannung
$\sigma_B$	(kN/m <sup>2</sup> ); (MN/m <sup>2</sup> )	Bruchspannung; Druckfestigkeit
$\sigma_1$	(kN/m <sup>2</sup> ); (MN/m <sup>2</sup> )	Vertikalspannung
$\sigma_3$	(kN/m <sup>2</sup> ); (MN/m <sup>2</sup> )	Horizontalspannung; Seitendruck
$(\sigma_1 - \sigma_3)$	(kN/m <sup>2</sup> ); (MN/m <sup>2</sup> )	Spannungsdeviator

## LITERATURVERZEICHNIS

**Ambach, W., Eisner, H., 1985;** Proposal for a constitutive equation of temperate firn. In Vorbereitung

**Anderson, D.C., Benson, C.S., 1963;** The densification and diagenesis of snow. *Ice and Snow*, pp. 391-411, Cambridge

**Bader, H., Hansen, B.L., Joseph, J.H., Sandgren, M.A., 1951;** Preliminary investigations of some physical properties of snow. SIPRE Report 7

**Bader, H., 1953;** Sorge's Law of densification of snow on high polar glaciers. SIPRE Research Paper 2

**Bader, H., 1960;** Theory of densification of dry snow on high polar glaciers. CRREL Research Report 69

**Bader, H., Kuroiwa, D., 1962;** The physics and mechanics of snow as a material. CRREL Monographie II-B

**Baker, T.H.W., Gallavresi, F., Jessberger, H.L., Kinoshita, S., Sego, D., Sayles, F.H., Sadovskiy, A.V., Vyalov, S.S.;** Guidelines for classification and laboratory testing of artificially frozen ground. ISGF, Fairbanks, Alaska

**Dörr, R., 1984;** Zeitabhängiges Setzungsverhalten von Gründungen in Schnee, Firn und Eis der Antarktis am Beispiel der deutschen Georg-von-Neumayer und Filchner-Station. Schriftenreihe des Institutes für Grundbau, Wasserbau und Verkehrswesen der Ruhr-Universität, Bochum, Heft 7

**Drewry, D.J., 1983;** Antarctic glaciological and geophysical folio. Scott Polar Research Institute, University of Cambridge

**Fifield, R., 1987;** International Research in the Antarctic. Oxford University Press

**Fritz, P., 1981;** Numerische Erfassung rheologischer Probleme in der Felsmechanik. Mitteilung Nr. 47 des Institutes für Straßen-, Eisenbahn- und Felsbau der ETH Zürich

**Glen, J.W., 1954;** The creep of polycrystalline ice, *Proceedings of the Royal Society London*. Vol. 228, No.1175, pp. 519-538

**Haefelie, R., Brandenberger, F., 1968;** Rheologisch-glaziologische Untersuchungen im Firngbiet des grönländischen Inlandeises. *Meddelelser om Grønland*, Bd. 177

**Hawks, J., Mellor, M., 1972;** Deformation and fracture of ice under uniaxial stress. *Journal of Glaciology*, Vol. 11, No. 61

**Hutter, K., 1983;** Theoretical glaciology, Mathematical approaches to geophysics. D. Reidel Publishing Company

**Jacka, T.H., 1984a;** Laboratory studies on relationships between ice crystal size and flow rate. *Cold Regions Science and Technology* 10, pp. 31-42

**Jacka, T.H., 1984b;** The time and strain required for development of minimum strain rates in ice. *Cold Regions Science and Technology* 8, p.261-268

**Jessberger, H.L., 1983;** Studie für die Herstellung eines Schachtes und eines Tunnels im antarktischen Schelfeis für Aufschlußbohrungen im darunterliegendem Gestein. Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum (unveröffentlicht)

**Jessberger, H.L., Dörr, R., 1981;** Untersuchungen des Bruch- und Verformungsverhaltens von antarktischen Schelfeis. Die Bautechnik, Nr. 58, Heft 11, S. 388-394

**Jessberger, H.L., Dörr, R., 1982;** Recent experiences with a modified Rufli Ice Drill. CRREL Special Report 84-34, pp. 45-49

**Jessberger, H.L., Bässler, K.-H., 1985;** Eiskernbohrungen und Bohrlochuntersuchungen auf dem Filchner-Ronne Schelfeis, Antarktis. Filchner Ronne Ice Shelf Programme, Report No. 2, pp. 32-41

**Jessberger, H.L., Bässler, K.-H., 1987;** Ingenieurglaziologische Untersuchungen zur Dynamik von Schelfeisen und dem Verhalten von Bauwerken auf und im Eis der Antarktis. Ruhr-Universität Bochum, Forschungsbericht 87-1

**Jones, S.J., 1982;** The confined compressive strength of polycrystalline ice. Journal of Glaciology, Vol. 28, pp. 171-177

**Jones, S.J., Chew, H.A.M., 1983;** Effect of sample and grain size on the compressive strength of ice. Annals of Glaciology 4, pp. 129-132

**Kinosita, S., 1967;** Compression of snow at constant speed. Institute of Low Temperature Science, Contribution No. 784, Sapporo

**Klein, J., 1978;** Nichtlineares Kriechen von künstlich gefrorenem Emschermergel. Schriftenreihe des Institutes für Grundbau, Wasserwesen und Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 2

**Köhler, M., 1983;** Geodätische Arbeiten während der Aufbauphase der deutschen Antarktisstation. Internationale Polartagung, Bamberg

**Körner, H., 1964;** Schnee- und Eismechnik und einige ihrer Beziehungen zur Geologie. Sonderabdruck aus Felsmechanik und Ingenieurgeologie, Vol. II-1

**Kohnen, H., Bentley, C.R., 1973;** Seismologische Untersuchungen nahe Byrd Station, Antarktis. Arch. Met., Geoph. Biokl., Ser. A 22, pp. 311-324, Springer Verlag

**Kohnen, H., 1983;** Erforschung der antarktischen Eisbedeckung. Geographische Rundschau 3, pp. 104-111

**Kovacs, A., Weeks, W.F., Michitti, F., 1969;** Variation of some mechanical properties of polar snow. Camp Century, Greenland, CRREL Research Report 276

**Kry, P.R., 1975;** The relationship between the visco-elastic and structural properties of fine-grained snow. Journal of Glaciology, Vol. 14, pp. 479-499

**Ladanyi, B., 1984;** Tunnel lining design in a creeping rock. Symposium on Design and Performance of Underground excavations, ISRM, BGS, Cambridge

**Landauer, J.K., 1957;** On the deformation of excavations in the Greenland neve. SIPRE Research Report 30

**Medenbach, W., 1985;** Persönliche Kommunikation.

**Mellor, M., 1964;** Properties of snow. CRREL Monographie, III-A1

**Mellor, M., 1966;** Snow mechanics. Applied Mechanics Review, Vol. 19, No. 5, pp. 379-389

**Mellor, M., Smith, H.J., 1966;** Creep of snow and ice. CRREL Research Report 220



- Mellor, M., 1969;** Foundation and subsurface structures in snow. CRREL Monographie III-A2c
- Mellor, M., Testa, R., 1969;** Effect of temperature on the creep of ice. Journal of Glaciology, Vol. 52, pp. 131-145
- Mellor, M., 1974;** A review of basic snow mechanics. International Symposium on Snow Mechanics, Grindelwald, Schweiz
- Mellor, M., Cole, D., 1982;** Deformation and failure of ice under constant stress or constant strain-rate. Cold Regions Science and Technology 5, pp. 201-219
- Mellor, M., Cole, D., 1983,** Stress-strain relations for ice under uniaxial compression, Cold Regions Science and Technology 6, pp. 207-230
- Meussen, Mahrenholtz, Oerter, 1999 ;** Creep of polar firn. Cold Regions Science and Technologie 29, pp. 117-200, Elsevier Science, Amsterdam
- Michel, B., 1978 ;** Ice mechanics. Les presses de l'Université Laval, Quebec
- Nakaya, U., 1959;** Visco-elastic properties of processed snow. SIPRE Research Report 58
- Nohguchi, Z., Tabata, T., 1979;** Effect of sample length on uniaxial compressive strength of sea ice. Institute of Low Temperature Science, Ser. A38, pp. 129-133
- Paterson, W.S.B., 1982;** The physics of glaciers. Second Edition, Pergamon Press, Oxford
- Paterson, W.S.B., 1983;** Deformation within polar ice sheets: An analysis of the Byrd Station and Camp Century borehole tilting measurements. Cold Region Science and Technology 8, pp. 165-179
- Ramseier, R.O., Pavlak, T.L., 1964;** Unconfined creep of polar snow. Journal of Glaciology, Vol. 5, pp. 325-332
- Reinwarth, O., 1982;** Arbeiten der Gruppe Glaziologie-Meteorologie der Filchner-Schelfeis-Expedition 1980-81. Berichte zur Polarforschung 1, pp. 22-25
- Rodenheber, E., 1985;** Einfluß der Struktur auf das Verformungsverhalten von Firn und Eis. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum
- Schwarz, J., Frederking, R., Gavrillo, V., Petrov, I.G., Hirayama, K., Mellor, M., Tryde, P., Vaudrey, K.D., 1981;** Standardized testing methods for measuring mechanical properties of ice. Cold Regions Science and Technology 4, pp. 245-253
- Sell, W.;** Schauversuche zur Wirkungsweise der heutigen Polarisationsfilter. Erweiterter Nachdruck der Optischen Werkstätten Erwin Käsemann GmbH nach "Praxis der Physik 1-10", pp. 285-291 und "Kinotechnik" 19, 7, pp. 163-165
- Shoji, H., Higashi, A., 1979;** Mechanical properties of Antarctic deep-core ice. Journal of Glaciology
- Sievers, J., 1986;** Persönliche Kommunikation.
- Sorge, E., 1935;** Glaziologische Untersuchungen in Eismitte. Wissenschaftliche Ergebnisse der dt. Grönland-Expedition Alfred-Wegener, F.A. Brockhaus, Vol. 3, Leipzig
- St. Lawrence, W.F., Lang, T.E., 1981;** A constitutive relation for the deformation of snow. Cold Regions Science and Technology 4, pp. 3-14
- Thomas, R.H., 1979;** Ice shelves; A review. Journal of Glaciology, Vol. 24, No. 90 pp. 273-285

## **ANLAGENVERZEICHNIS**

**Anlage 1:** Zusammenstellung der Druckversuche an Firnproben konstanter Dichte bei unterschiedlichen Verformungsraten

**Anlage 2:** Zusammenstellung der Druckversuche mit konstanter Verformungsrate und tiefenabhängigem Seitendruck bei veränderlicher Firndichte

Blatt 1: Erläuterung und tabellarische Zusammenfassung

Blatt 2: Spannungs-Verformungsdiagramme (Versuche B1-B13a)

Blatt 3: Spannungs-Verformungsdiagramme (Versuche B15-B29)

**Anlage 2a:** Zusammenstellung der Druckversuche mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit ohne Seitendruck bei veränderlicher Firndichte

Blatt 1: Erläuterung und tabellarische Zusammenfassung

Blatt 2: Spannungs-Verformungsdiagramme (Versuche B2 -B12)

Blatt 3: Spannungs-Verformungsdiagramme (Versuche B14-B26)

**Anlage 3:** Zusammenstellung der Kriechversuche mit und ohne Seitendruck bei veränderlicher Firndichte

Blatt 1: Verformungs-Zeit- und Verformungsraten-Zeitdiagramm  
(Versuche C1-C3, Dichtebereich 0,521-0,544)

Blatt 2: Verformungs-Zeit- und Verformungsraten-Zeitdiagramm  
(Versuche C4-C6, Dichtebereich 0,626-0,646)

Blatt 3: Verformungs-Zeit- und Verformungsraten-Zeitdiagramm  
(Versuche C7-C9, Dichtebereich 0,656-0,673)

Blatt 4: Verformungs-Zeit- und Verformungsraten-Zeitdiagramm  
(Versuche C10-C12, Dichtebereich 0,728-0,753)

Blatt 5: Verformungs-Zeit- und Verformungsraten-Zeitdiagramm  
(Versuche C13-C15, Dichtebereich 0,751-0,769)

Blatt 6: Verformungs-Zeit- und Verformungsraten-Zeitdiagramm  
(Versuche C16-C18, Dichtebereich 0,803-0,831)

Blatt 7: Verformungs-Zeit- und Verformungsraten-Zeitdiagramm  
(Versuche C19-C21, Dichtebereich 0,857-0,888)

**ANLAGE 1    Druckversuche zur Ermittlung der Verformungsraten-Festigkeitsbeziehungen bei konstanter Dichte**

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Verformungsrate wurden Firnproben mit nahezu identischer Dichte mit den Verformungsraten nach der unten aufgeführten Tabelle 1 abgedrückt. Die Festigkeiten 1 und 2 beziehen sich auf die in Kapitel 6.3.1 erwähnten 1. und 2. Festigkeitsmaxima. Der Verlauf der Spannungs-Verformungskurven ist der Abb. An 1 zu entnehmen.

**TABELLE 1:**

Vers Nr. (-)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Poren - volumen (-)	Verform. rate (10 <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup> )	Seiten- druck (MN/m <sup>2</sup> )	Festig- keit 1 (MN/m <sup>2</sup> )	Festig- keit 2 (MN/m <sup>2</sup> )
A9	0,576	0,37	1,670	0,0	1,111	--
A10	0,599	0,35	1,670	0,2	1,288	--
A11	0,572	0,38	0,333	0,0	0,782	0,816
A12	0,565	0,38	0,333	0,2	0,707	0,755
A13	0,581	0,37	0,068	0,0	0,528	0,639
A14	0,597	0,35	0,068	0,2	0,631	0,769
A15	0,580	0,37	0,013	0,0	0,245	0,365
A16	0,576	0,37	0,013	0,2	0,370	0,447

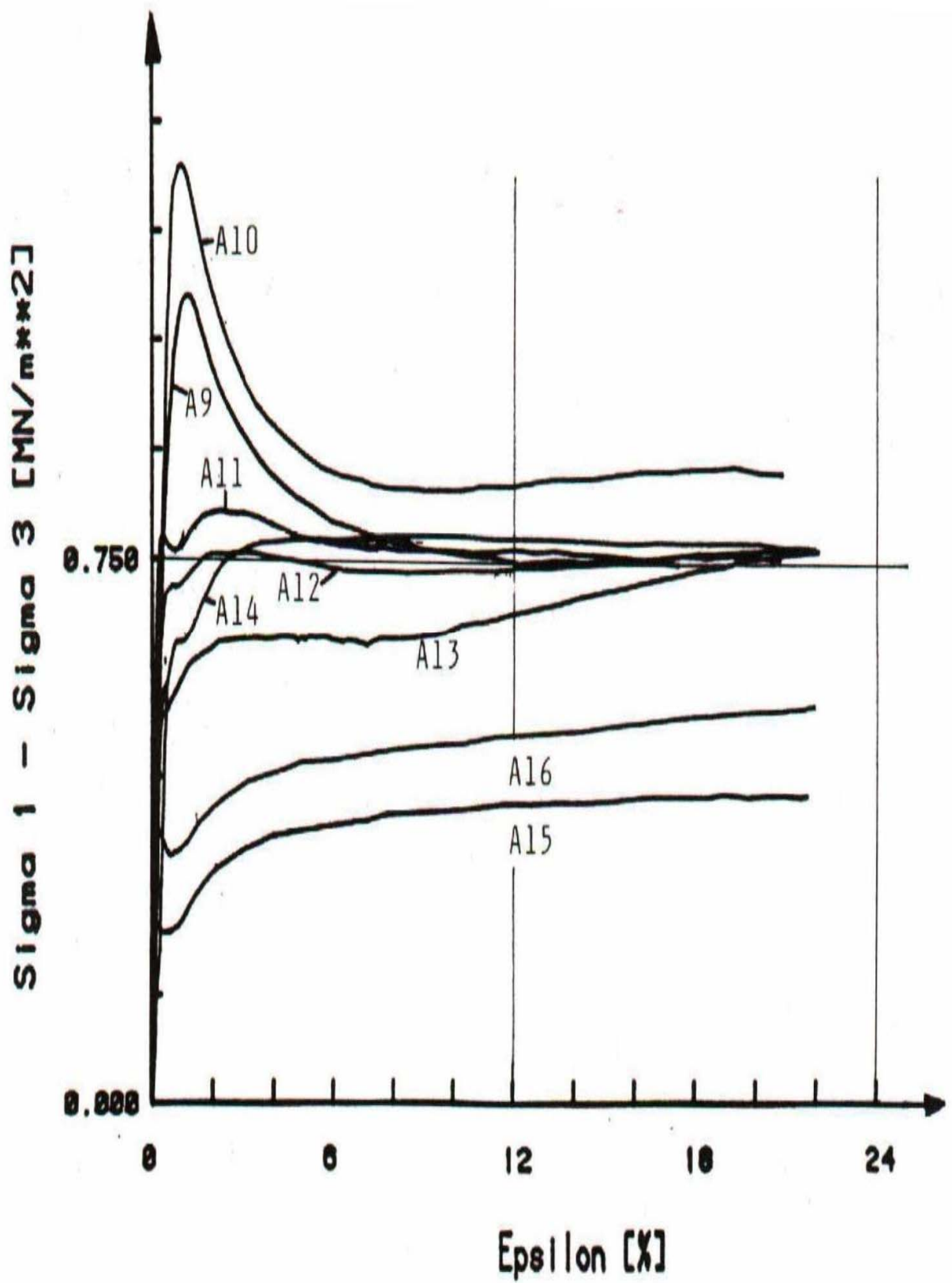


Abb. AN 1: Druckversuche zur Ermittlung der Verformungsrate-Festigkeits-Beziehungen bei konstanter Dichte

## ANLAGE 2 / Blatt 1

In der Anlage 2 sind die Druckversuche mit konstanter Verformungsrate aufgeführt, aus denen die dichteabhängigen Festigkeiten  $\sigma_B$  ermittelt wurden. Der Seitendruck wurde dabei abhängig von der Probtiefe, aus der sie gewonnen wurde mit einem Seitendruckbeiwert  $K_0=1$  nach Gl. 5.3 ermittelt. Die Verformungsrate betrug bei allen Versuchen konstant  $\dot{\epsilon} = 1.67 \cdot 10^{-5} \text{s}^{-1}$

**TABELLE 2:**

Vers Nr. (-)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Poren - volumen (-)	Tiefe (m)	Seiten- druck (MN/m <sup>2</sup> )	Festig- keit 1 (MN/m <sup>2</sup> )	Festig- keit 2 (MN/m <sup>2</sup> )
B1	0,545	0,41	1,0	0,000	0,440	---
B3	0,539	0,41	5,0	0,024	0,523	0,562
B5	0,536	0,42	9,2	0,046	0,584	0,711
B5a	0,553	0,40	9,0	0,042	0,674	0,772
B7	0,622	0,32	13,5	0,073	0,677	0,961
B9	0,655	0,29	22,0	0,128	0,855	1,049
B11	0,679	0,26	24,9	0,140	1,295	---
B13	0,694	0,24	29,9	0,184	1,781	---
B13a	0,688	0,25	29,7	0,184	1,945	---
B15	0,722	0,21	35,1	0,220	2,048	---
B17	0,755	0,18	40,1	0,258	2,212	---
B17a	0,754	0,18	40,5	0,258	2,206	---
B19	0,773	0,16	45,4	0,297	2,570	---
B21	0,802	0,13	50,3	0,337	2,633	---
B23	0,822	0,10	54,8	0,380	2,549	---
B25	0,857	0,07	58,6	0,420	2,672	---
B27	0,901	0,02	68,0	0,489	2,591	---
B28	0,902	0,02	72,0	0,524	2,680	---
B29	0,904	0,01	102,1	0,797	2,610	---

Die Abb. An 2 und An 3 zeigen die in Tabelle 2 aufgeführten Versuche. Parallel zu diesen Versuchen sind Versuche ohne Seitendruck durchgeführt worden, die in der Anlage 2a näher beschrieben sind.

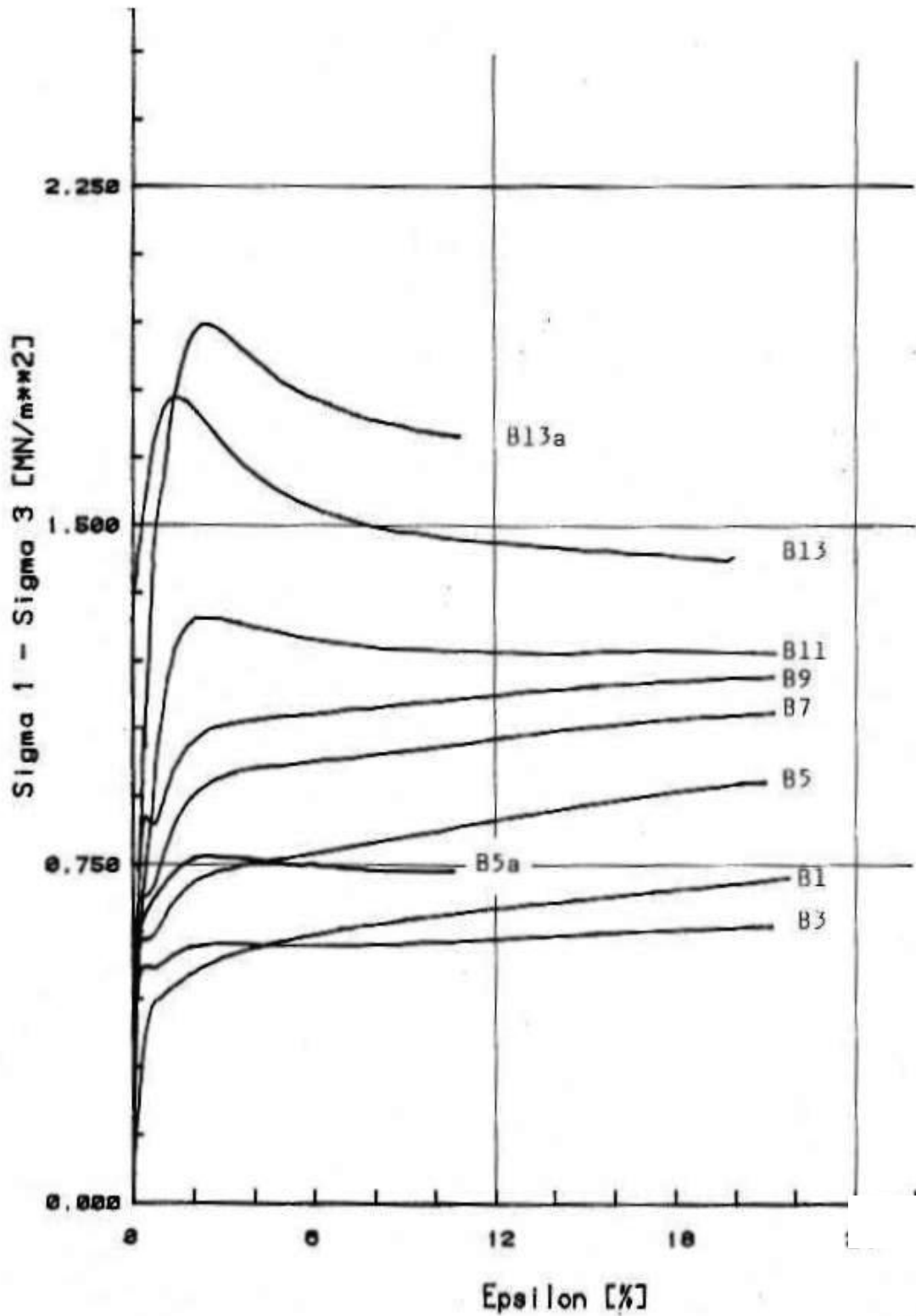


Abb. An 2: Triaxiale Druckversuche zur Ermittlung der Dichten-Festigkeitsbeziehungen

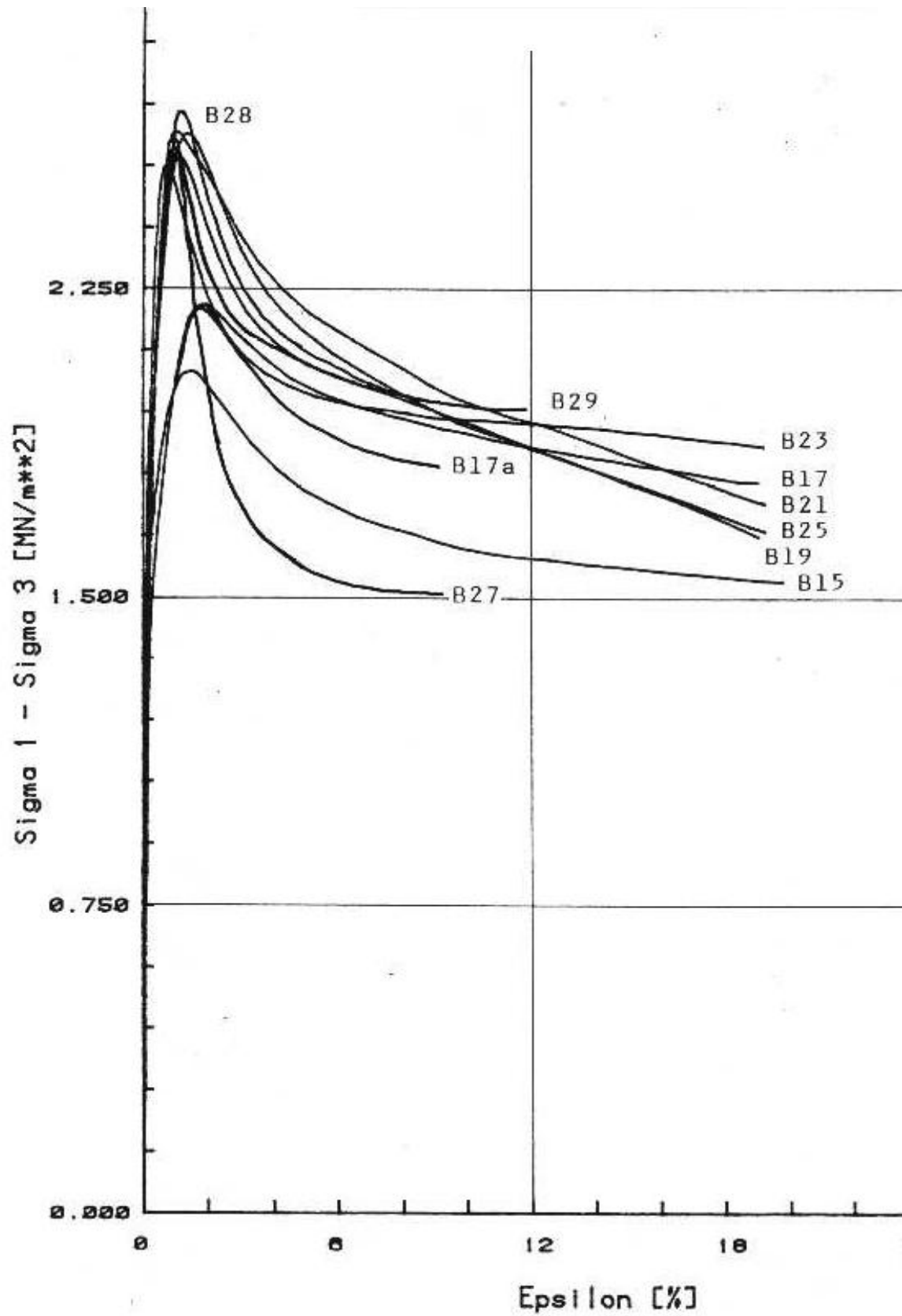


Abb. An 3: Triaxiale Druckversuche zur Ermittlung der Dichten-Festigkeitsbeziehungen

## ANLAGE 2a / Blatt 1

Die Verformungsrate betrug bei allen Versuchen  $\dot{\epsilon} = 1.67 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Die folgenden Versuche wurden ohne Seitendruck durchgeführt.

**TABELLE 3:**

Vers Nr. (-)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Poren - volumen (-)	Tiefe (m)	Seiten- druck (MN/m <sup>2</sup> )	Festig- keit 1 (MN/m <sup>2</sup> )	Festig- keit 2 (MN/m <sup>2</sup> )
B2	0,543	0,41	1,1	0	0,422	---
B4	0,538	0,41	5,2	0	0,475	0,530
B6	0,535	0,42	9,4	0	0,675	0,778
B8	0,620	0,32	13,7	0	0,790	0,995
B10	0,655	0,29	22,1	0	0,761	0,931
B12	0,657	0,28	25,0	0	1,164	---
B14	0,697	0,24	30,1	0	1,985	---
B16	0,737	0,20	35,3	0	2,227	---
B18	0,778	0,15	40,3	0	2,368	---
B20	0,783	0,15	45,6	0	2,274	---
B22	0,792	0,14	49,9	0	2,417	---
B24	0,825	0,10	55,0	0	2,127	---
B26	0,857	0,07	58,8	0	2,265	---

Die Abb. An 4 und An 5 zeigen die in Tabelle 3 aufgeführten Versuche.



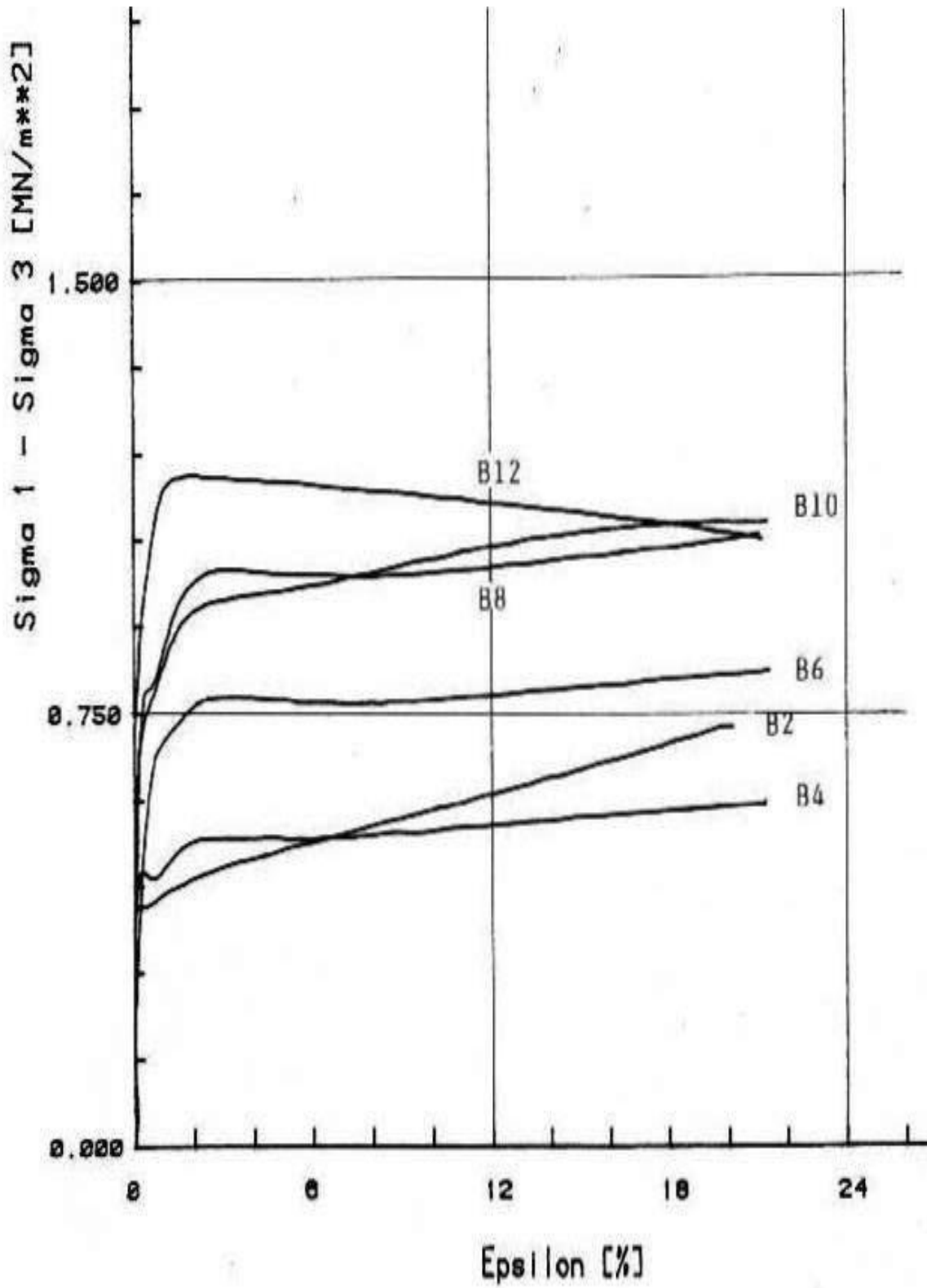


Abb. An 4: Einaxiale Druckversuche zur Ermittlung der Dichten-Festigkeitsbeziehungen

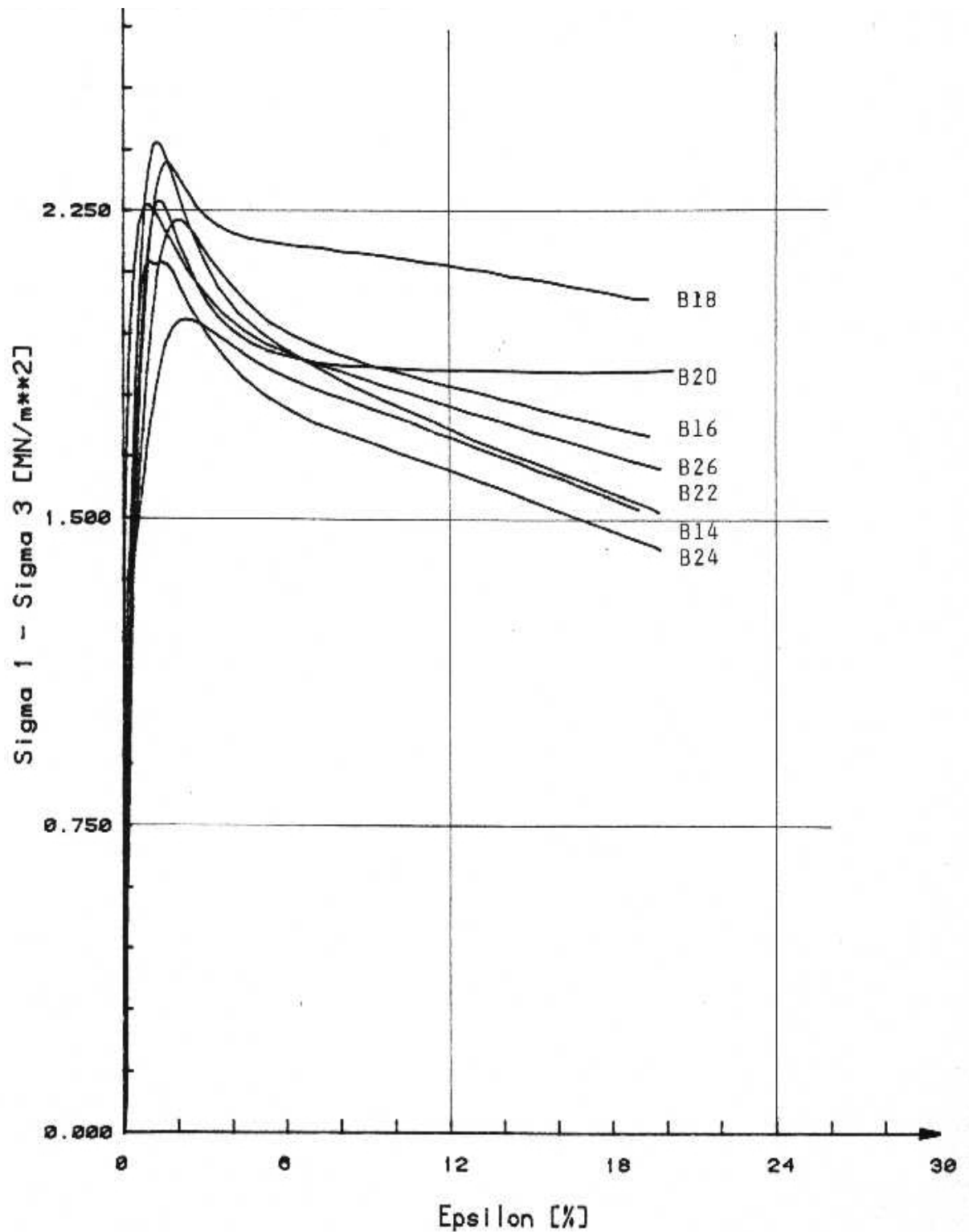
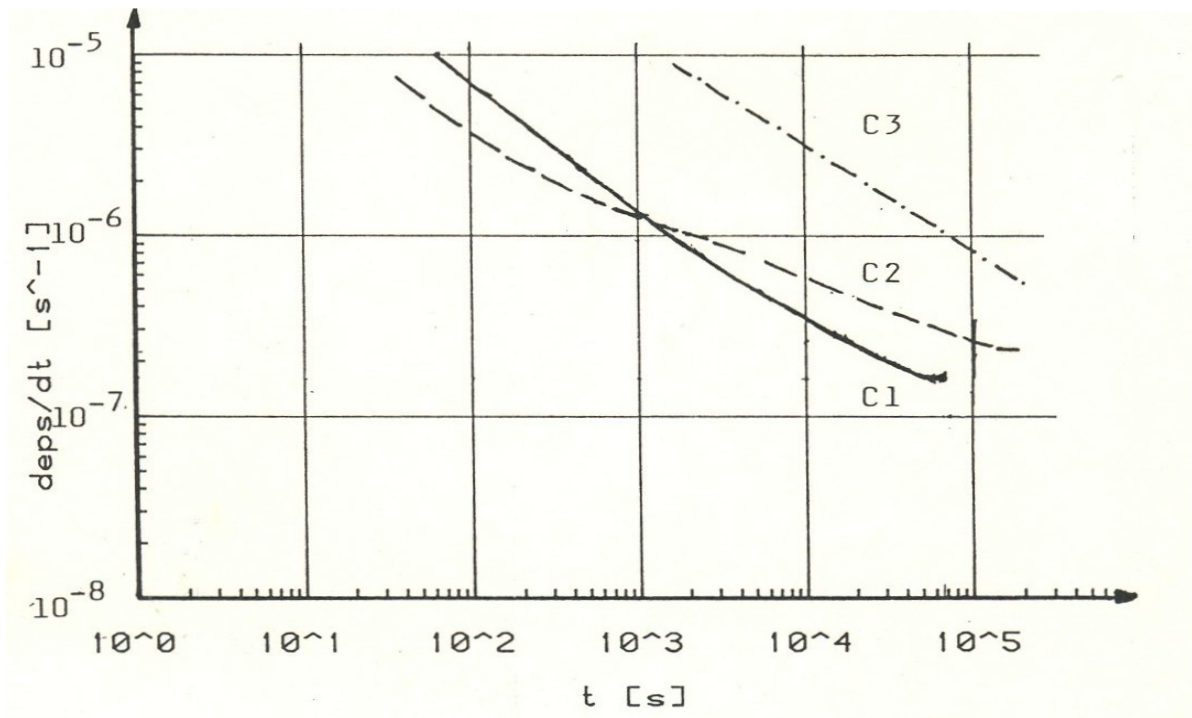
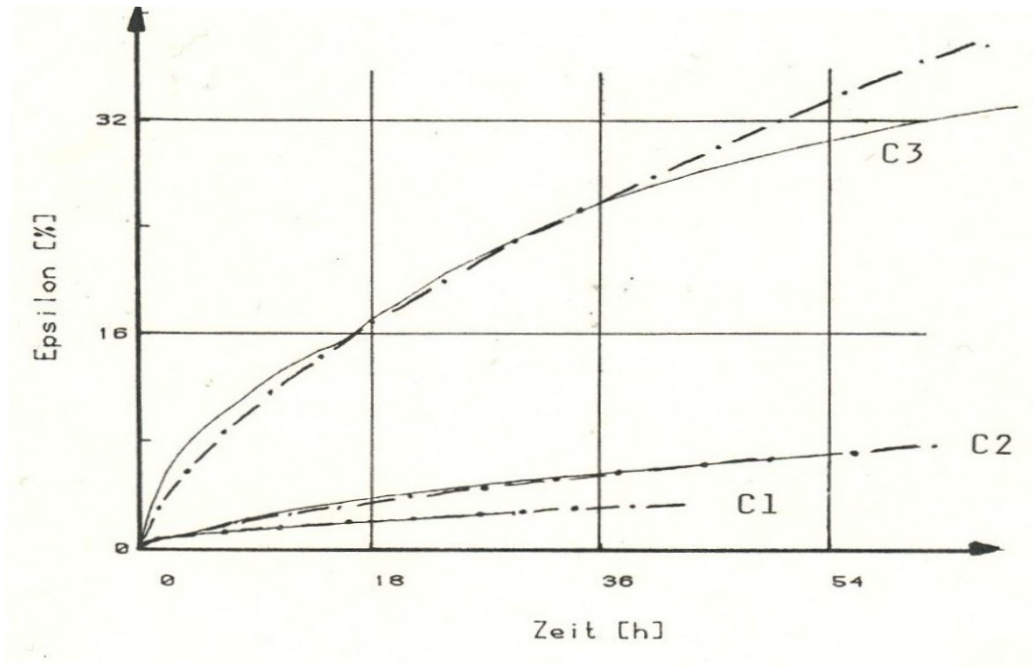


Abb. An 5: Einaxiale Druckversuche zur Ermittlung der Dichten-Festigkeitsbeziehungen

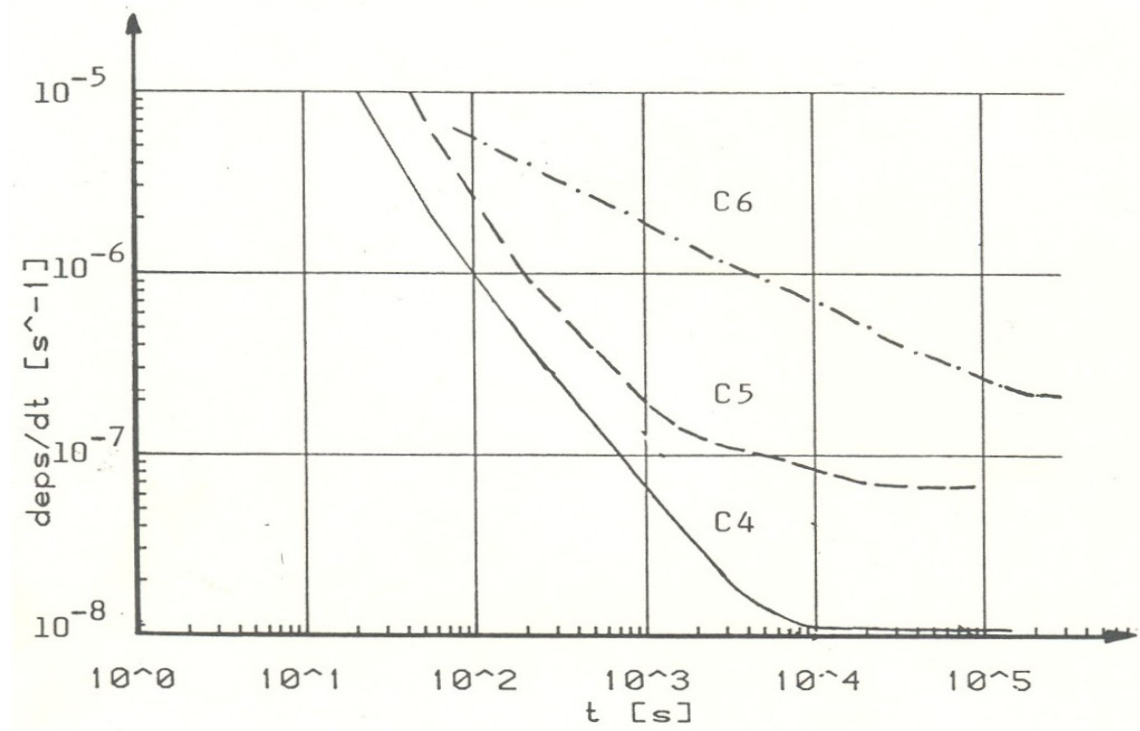
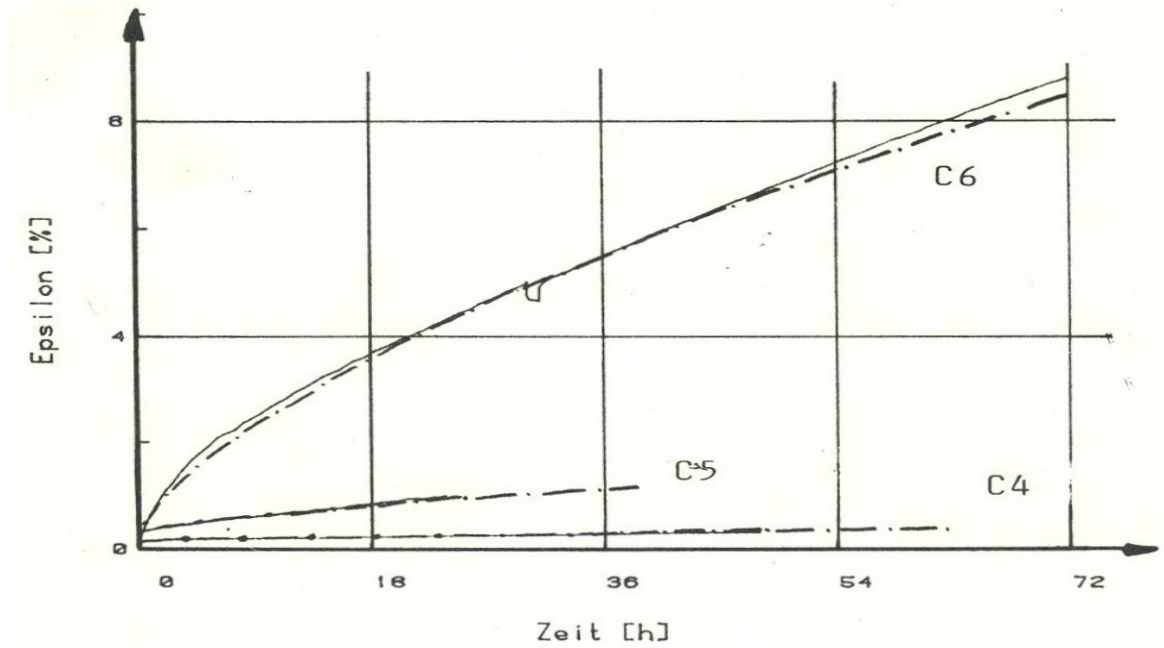
ANLAGE 3 / Blatt 1 (C1 – C3)

Vers. Nr.	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Poren - volumen (-)	Tiefe (m)	Seiten- druck (MN/m <sup>2</sup> )	Druck- spannung (MN/m <sup>2</sup> )	min. Verform.rate (10 <sup>-7</sup> s <sup>-1</sup> )	Kriech- modul (m <sup>2</sup> /MN) <sup>3</sup> *h <sup>-0.64</sup>
C1	0,541	0,41	4,5	0,000	0,140	1,64	1,26900
C2	0,544	0,41	4,6	0,024	0,217	2,20	0,35144
C3	0,521	0,43	2,0	0,024	0,309	2,71	0,35144



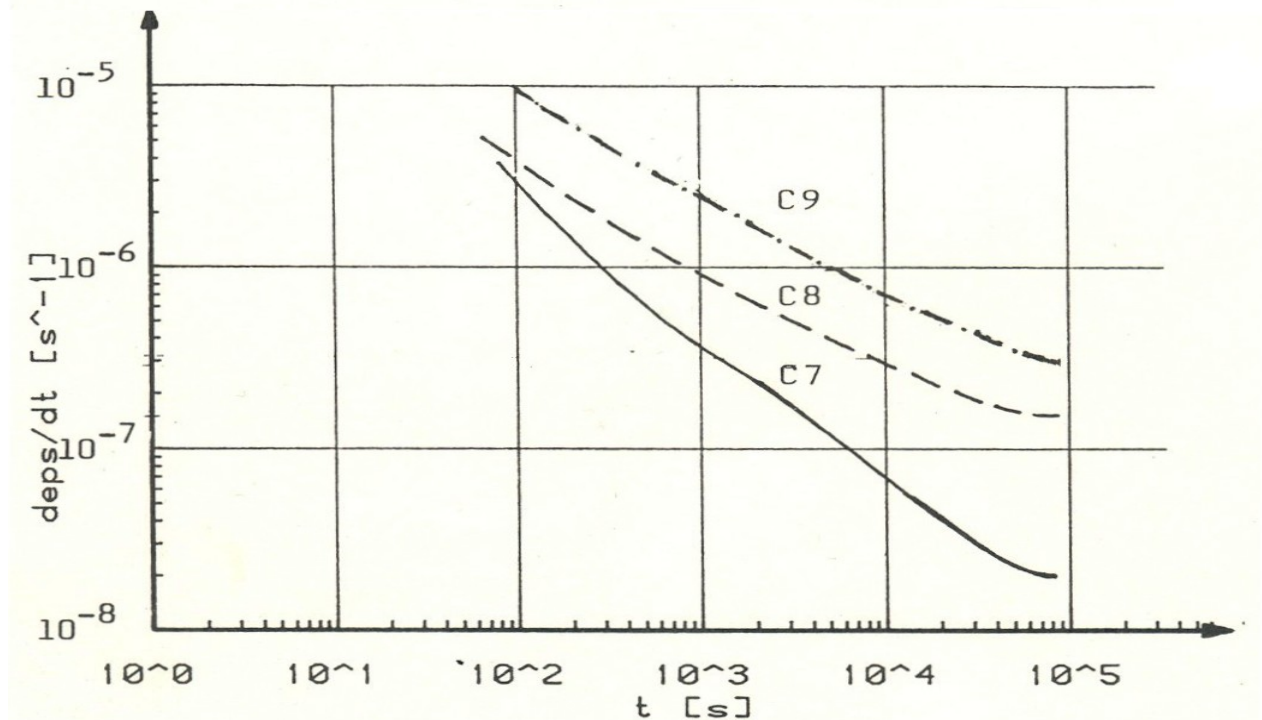
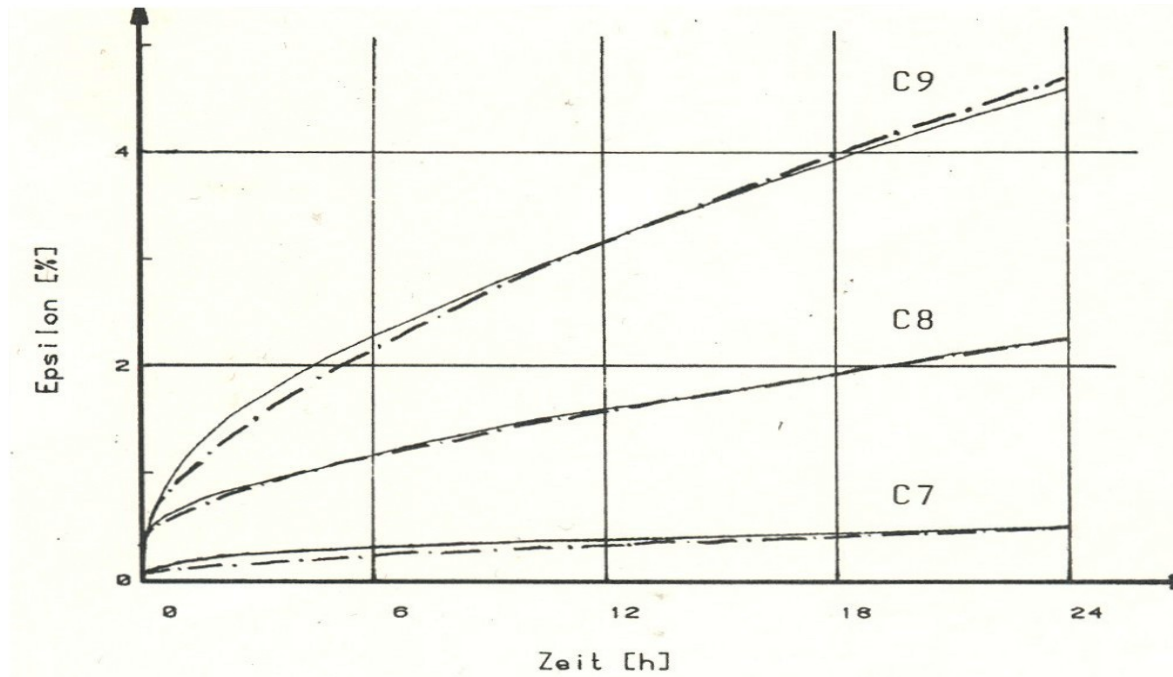
**ANLAGE 3 / Blatt 2 (C4 - C6)**

Vers Nr.	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Poren - volumen (-)	Tiefe (m)	Seiten- druck (MN/m <sup>2</sup> )	Druck- spannung (MN/m <sup>2</sup> )	min. Verform.rate (10 <sup>-7</sup> s <sup>-1</sup> )	Kriech- modul (m <sup>2</sup> /MN) <sup>3</sup> *h <sup>-0.64</sup>
C4	0,626	0,32	15,0	0,000	0,220	0,11	0,01870
C5	0,646	0,30	15,2	0,080	0,325	0,64	0,02500
C6	0,639	0,30	15,4	0,080	0,445	2,20	0,06200



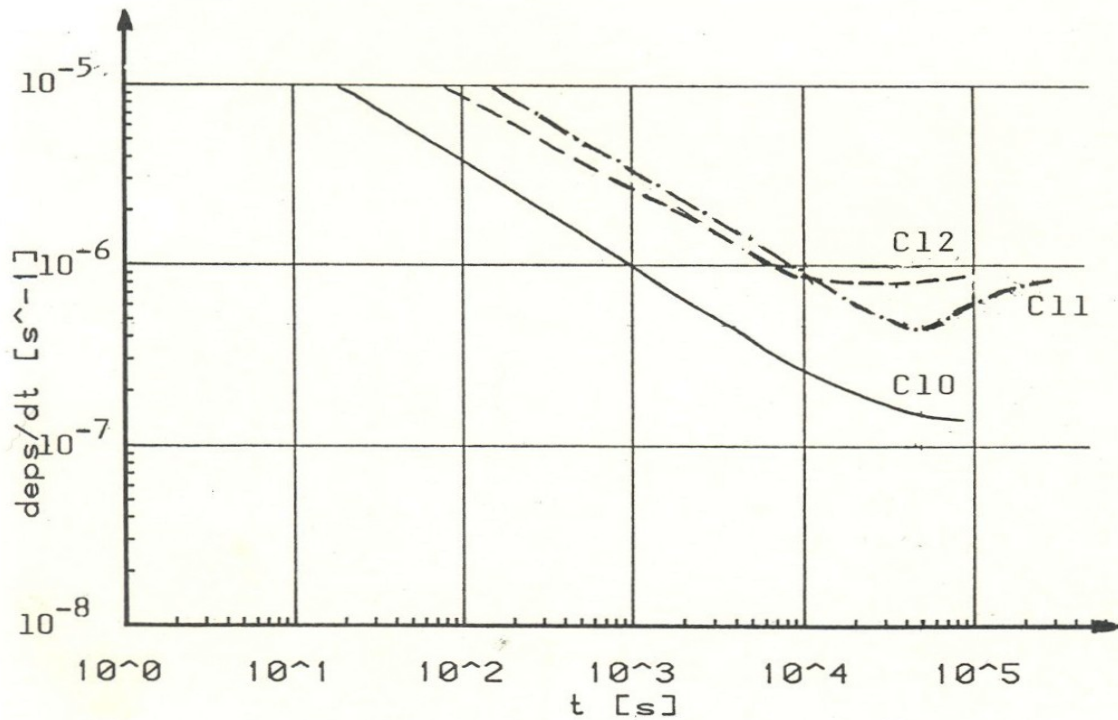
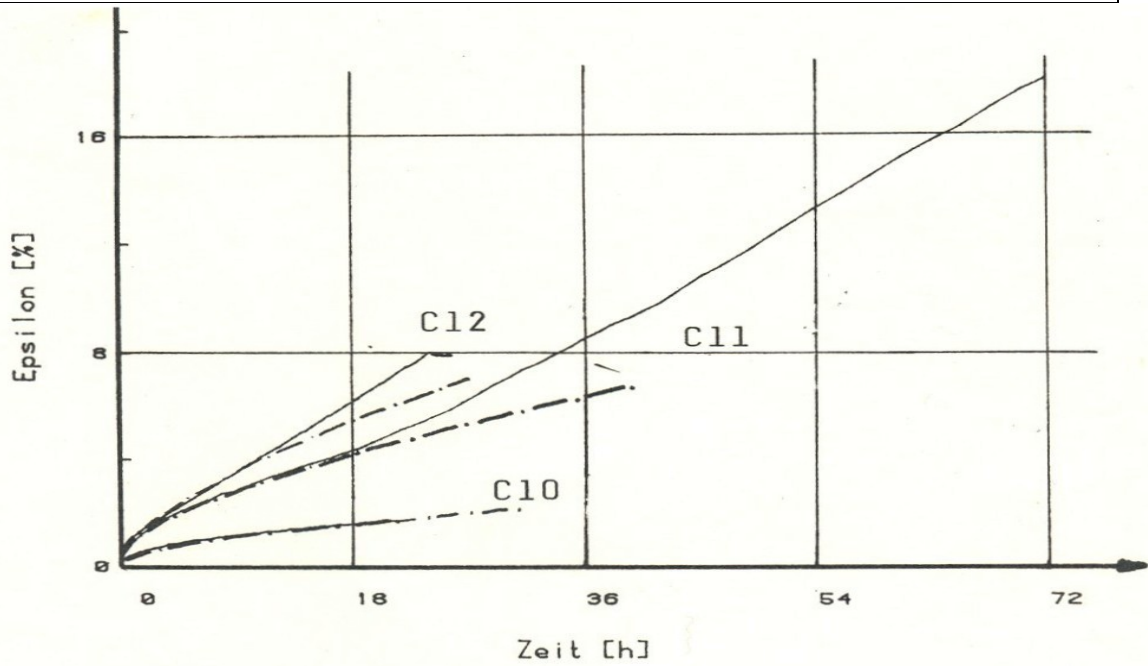
ANLAGE 3 / Blatt 3 (C7 – C9)

Vers. Nr. (-)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Poren - volumen (-)	Tiefe (m)	Seiten- druck (MN/m <sup>2</sup> )	Druck- spannung (MN/m <sup>2</sup> )	min. Verform.rate (10 <sup>-7</sup> s <sup>-1</sup> )	Kriech- modul (m <sup>2</sup> /MN) <sup>3</sup> *h <sup>-0.64</sup>
C7	0,656	0,28	19,8	0,000	0,240	0,21	0,04200
C8	0,673	0,27	20,0	0,110	0,363	1,50	0,05100
C9	0,668	0,27	20,2	0,110	0,513	3,00	0,04200



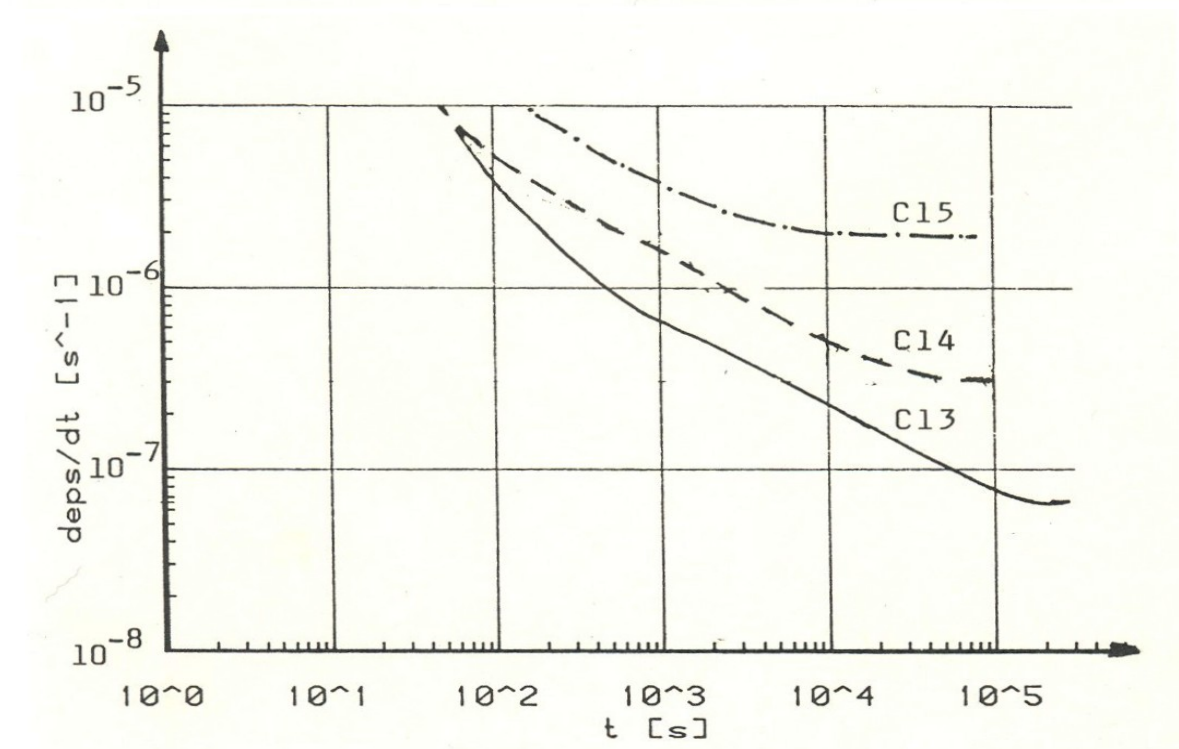
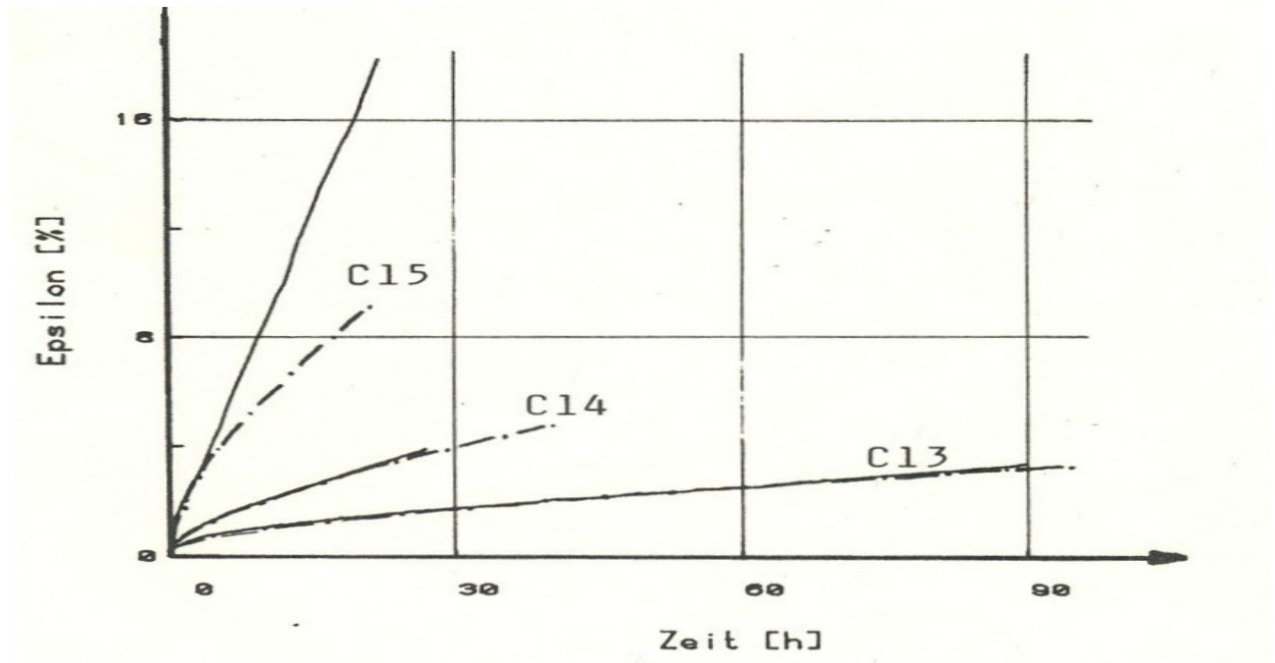
ANLAGE 3 / Blatt 4 (C10 – C12)

Vers. Nr.	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Poren - volumen (-)	Tiefe (m)	Seiten - druck (MN/m <sup>2</sup> )	Druck - spannung (MN/m <sup>2</sup> )	min. Verform.rate (10 <sup>-7</sup> s <sup>-1</sup> )	Kriech - modul (m <sup>2</sup> /MN) <sup>3</sup> *h <sup>-0,64</sup>
C10	0,753	0,18	34,5	0,000	0,610	1,40	0,01000
C11	0,728	0,21	34,0	0,220	0,918	4,80	0,00800
C12	0,733	0,20	34,8	0,220	1,016	7,95	0,00800



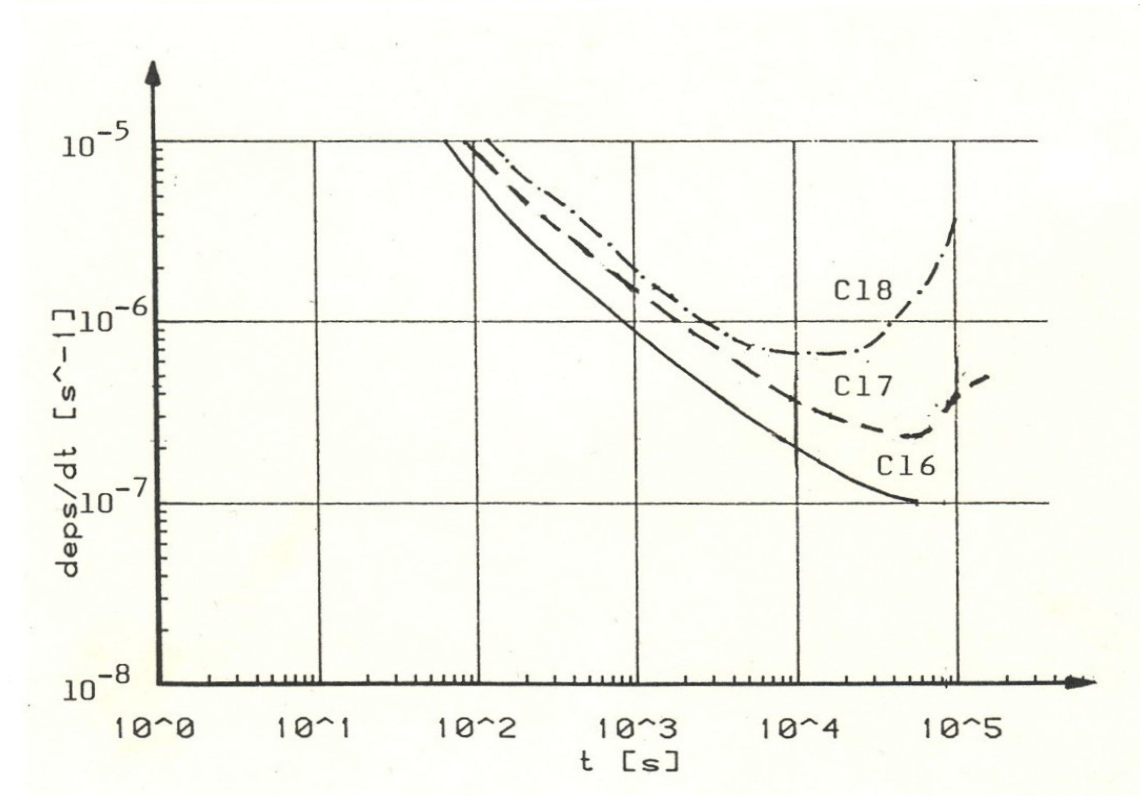
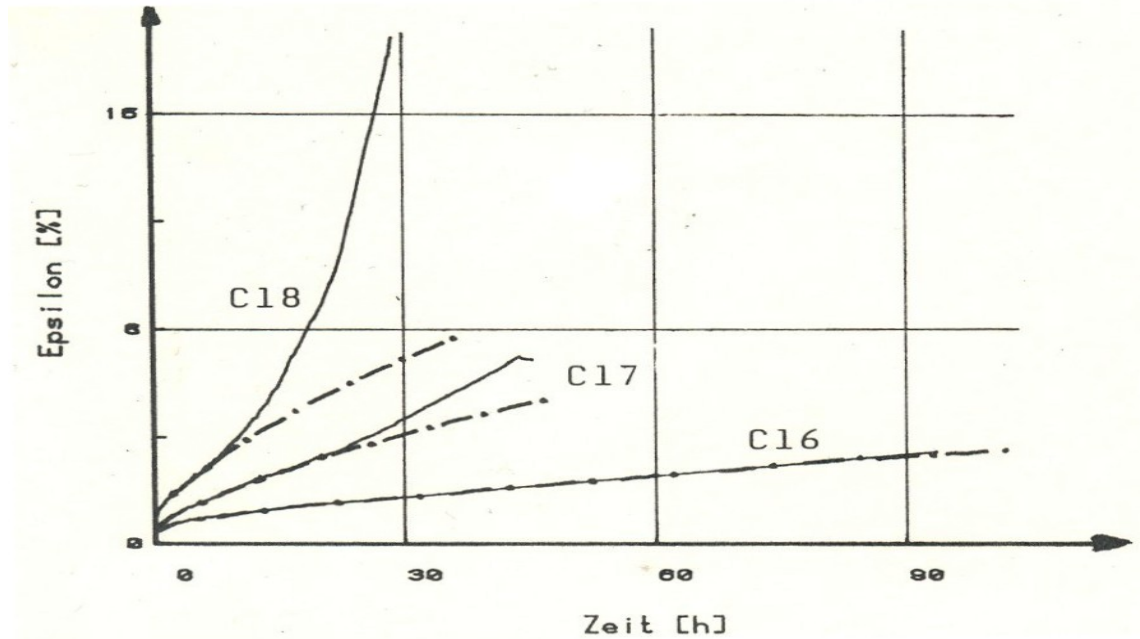
ANLAGE 3 / Blatt 5 (C13 - C15)

Vers. Nr. (-)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Poren - volumen (-)	Tiefe (m)	Seiten- druck (MN/m <sup>2</sup> )	Druck- spannung (MN/m <sup>2</sup> )	min. Verform.rate (10 <sup>-7</sup> s <sup>-1</sup> )	Kriech- modul (m <sup>2</sup> /MN) <sup>3</sup> *h <sup>-0.64</sup>
C13	0,763	0,17	39,6	0,000	0,650	0,65	0,00600
C14	0,769	0,16	39,8	0,260	0,984	3,03	0,00460
C15	0,751	0,18	39,4	0,260	1,350	19,00	0,00500



**ANLAGE 3 / Blatt 6 (C16 - C18)**

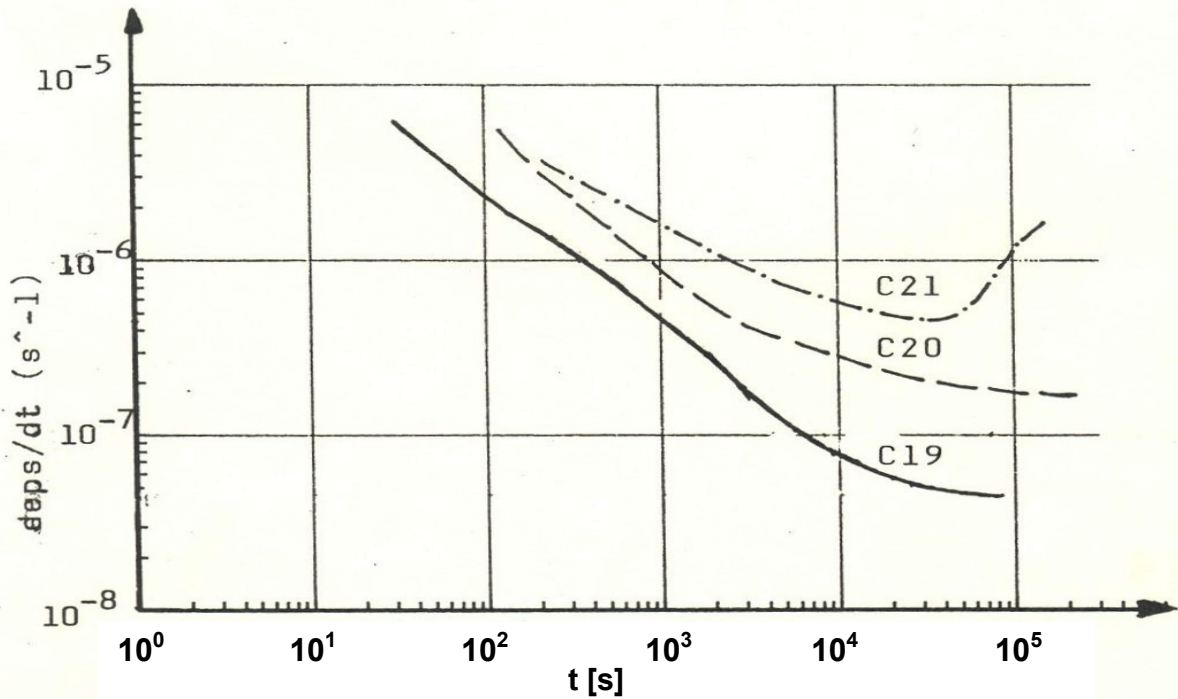
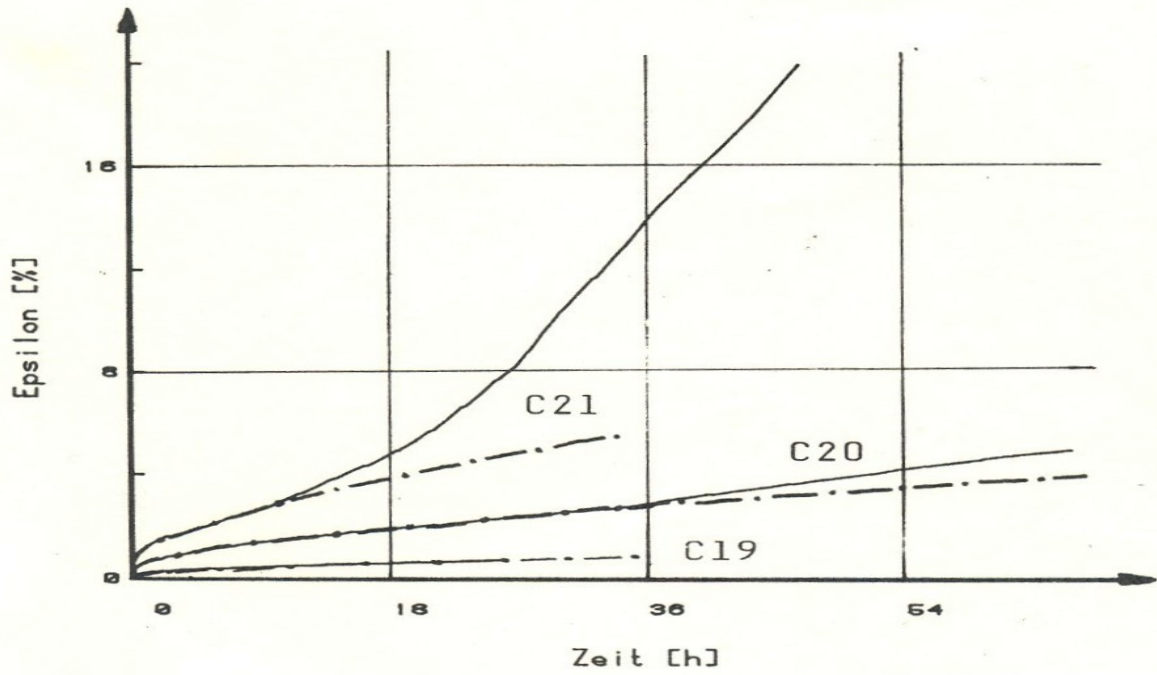
Vers. Nr. (-)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Poren - volumen (-)	Tiefe (m)	Seiten- druck (MN/m <sup>2</sup> )	Druck- spannung (MN/m <sup>2</sup> )	min. Verform.rate (10 <sup>-7</sup> s <sup>-1</sup> )	Kriech- modul (m <sup>2</sup> /MN) <sup>3</sup> *h <sup>-0.64</sup>
C16	0,803	0,12	49,8	0,000	0,760	1,00	0,00360
C17	0,823	0,10	50,0	0,340	1,217	2,20	0,00240
C18	0,831	0,09	50,1	0,340	1,670	7,00	0,00150





**ANLAGE 3 / Blatt 7 (C19 – C21)**

Vers. Nr.	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Poren - volumen (-)	Tiefe (m)	Seiten- druck (MN/m <sup>2</sup> )	Druck- spannung (MN/m <sup>2</sup> )	min. Verform.rate (10 <sup>-7</sup> s <sup>-1</sup> )	Kriech- modul (m <sup>2</sup> /MN) <sup>3</sup> *h <sup>-0.64</sup>
C19	0,883	0,04	59,6	0,000	0,780	0,45	0,00170
C20	0,888	0,03	59,7	0,420	1,241	1,50	0,00130
C21	0,857	0,07	59,9	0,420	1,900	4,50	0,00075



## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1.1a: Ureinwohner der Antarktis .....	1
Abb. 1.1b: Die Lage internationaler Forschungsstationen in der Antarktis (Fifield, 1987).....	2
Abb. 1.2: Die deutsche Forschungsstation „Georg-von-Neumayer“ (Januar 1983) .....	3
Abb. 1.3: Lageplan der Probengewinnungsstätte in Camp Century, Grönland (nach Kovacs et al, 1969) .....	4
Abb. 1.4: Darstellung eines möglichen Schacht-Tunnelprojektes.....	4
Abb. 3.1: Höhenprofil der antarktischen Eiskappe (Drewry, 1983).....	8
Abb. 3.2: Kontinentalprofil zwischen der Hobbs Küste und dem Filchner Schelfeis (Kohnen, 1983).....	8
Abb. 3.3a: Akkumulations- und Ablationsvorgänge eines Schelfeises (Kohnen, 1983) .....	9
Abb. 3.3b: Abbrechende Tafelberge an den Grand Chasms des Filchner Schelfeises und Spaltenzone zwischen Berkner Island und dem Filchner Schelfeis. (Landsat-5-MSS. Datenaufnahmen durch Fa. EOSAT, Lanham, USA. Digitale Aufbereitung durch IfAG, Frankfurt/Main. Senkrechtluftbild: Aufnahme durch IfAG, Frankfurt/Main, 1986/86)....	10
Abb. 3.4 a-d: Struktureller Aufbau von a)-c) Firn nach verschiedenen Belastungszeiten unter einem hydrostatischen Druck von $0.5 \text{ MN/m}^2$ d) Schneeeis (nach Rodenheber, 1985). 11	11
Abb. 3.5: Firnverdichtung und Kristallwachstum in Abhängigkeit von der Tiefe und der Temperatur (nach Bentley aus Kohnen, 1983) .....	13
Abb. 3.6: Schematische Übersicht und Details des „Bochumer Eiskernbohrers“.....	14
Abb. 3.7a: Temperaturmeßsonde in einem Bohrloch auf dem Ekström-Schelfeis .....	14
Abb. 3.7b: Temperaturprofil des Ekström-Schelfeises (Jessberger et al, 1987) .....	15
Abb. 3.8: Orientierung der c-Achsen in einem Dünnschliff aus polykristallinem Eis.....	17
Abb. 3.9: Versuchsaufbau zur Dünnschliffuntersuchung im zirkularpolarisiertem Licht (nach Rodenheber, 1985) .....	18
Abb. 3.10 a-f: Dünnschliffaufnahmen der Firn- und Eisgefüge aus unterschiedlichen Tiefen des Ekström-Schelfeises (nach Rodenheber, 1985) .....	19
Abb. 3.10 g-k: Dünnschliffaufnahmen der Firn- und Eisgefüge aus unterschiedlichen Tiefen des Ekström-Schelfeises (nach Rodenheber, 1985) .....	20
Abb. 3.11 a-e: Mikroskopische Ansichten der Firn- und Eisgefüge aus unterschiedlichen Tiefen des Ekströmschelfeises (nach Rodenheber, 1985) .....	21
Abb. 3.12: Dichte- und Korngrößen-Tiefenprofil des Ekström-Schelfeises (nach Rodenheber, 1985) .....	22
Abb. 3.13: Prozentuale Aufteilung der c-Achsenorientierungen für verschiedene Tiefen des Ekström-Schelfeises.....	23
Abb. 3.14: Dichtegradient gegen die Tiefe (Vergleich mit Kohnen et al, 1973).....	25
Abb. 4.1: Schematische Darstellung des Kraftflusses durch die kettenförmige Struktur des Firns (St. Lawrence et al, 1981) .....	26
Abb. 4.2: Mechanisches Verhalten von Firn bei hohen und bei niedrigen Verformungsraten (Kinosita, 1967) .....	27
Abb. 4.3: Luftporeneinschlüsse in polykristallinem Eis .....	28
Abb. 4.4: Kriechkurven für Firn bei unterschiedlichen Spannungen.....	29
Abb. 4.5: Doppelt-logarithmische Darstellung der Verformungsrate über die Belastungsdauer .....	29

Abb. 4.6: Kriechversuche an Firnproben verschiedener Lokationen (Ramseier et al, 1964) ..	30
Abb. 4.7: Spannungs- Verformungsgraten Relation für Firn (aus Mellor, 1964).....	31
Abb. 4.8: Bruchspannungen von polykristallinem Eis in Abhängigkeit vom Seitendruck für verschiedene Verformungsraten (Jones, 1982).....	31
Abb. 4.9: Minimale Verformungsgeschwindigkeit polykristallinen Eises als Funktion der Temperatur für verschiedene Spannungen .....	32
Abb. 4.10: Rheologisches Modell des Burgers Körper und zeitabhängiges Verformungsverhalten von Firn (Mellor, 1966) .....	34
Abb. 4.11: Zusammenstellung indirekt ermittelter Spannungs-Verformungsgratenbeziehungen für Firn und Eis (Mellor, 1974).....	36
Abb. 4.12: Kriechversuche aus verschiedenen Feldstationen der Antarktis und Grönlands in doppelt-logarithmischer Darstellung (nach Ramseier et al, 1964).....	37
Abb. 5.1: Schematische Darstellung von Geschwindigkeits-Tiefenverläufen bei unterschiedlichen Auflagerbedingungen der Eiskappe.....	39
Abb. 5.2: Geräteanordnung und Funktionsprinzip der Neigungsmessungen .....	40
Abb. 5.3: Ergebnisse der Neigungsmessungen auf dem Ekström-Schelfeis .....	41
Abb. 5.4: Geräteanordnung zur Setzungsmessung .....	42
Abb. 5.5: Ergebnisse der Setzungsmessungen auf dem Ekström- und dem Filchner-Ronne-Schelfeis.....	43
Abb. 5.6: Prinzipielles Vorgehen zur Ermittlung der Verformungsrate.....	45
Abb. 5.7: Vergleich des Verformungsgraten-Tiefenverlaufs für Ekström mit anderen Lokationen (Mellor, 1969) .....	46
Abb. 5.8: Druckviskosität in Abhängigkeit von der Dichte.....	48
Abb. 5.9: Temperaturkompensierte Druckviskositäten für Ekström und Filchner-Ronne als Funktion der Dichte .....	49
Abb. 6.1: Firn- und Eiskerne aus 50 m und 20 m Tiefe .....	52
Abb. 6.2: Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit von Meereis von der Probengeometrie (nach Nohguchi et al, 1979) .....	53
Abb. 6.3: Abhängigkeit der Druckfestigkeit polykristallinen Eises vom Verhältnis des Probendurchmessers zur Korngröße (Jones et al, 1983).....	54
Abb. 6.4: Versuchsstand zur Durchführung der Druck und Kriechversuche .....	54
Abb. 6.5: Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit auf das Deformationsverhalten von Sandstein (nach Fritz, 1981).....	55
Abb. 6.6: Spannungs-Verformungsdiagramme aus Druckversuchen an Firn mit variierenden Verformungsgraten.....	56
Abb. 6.7: Spannungs-Verformungskurven aus Druckversuchen mit unterschiedlichen Verformungsgraten an polykristallinem Eis (Mellor et al, 1982) .....	57
Abb. 6.8: Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Verformungsrate für Firn und Eis .....	58
Abb. 6.9: Bruchdehnungen für Eis in Abhängigkeit von der Verformungsrate .....	59
(Mellor et al, 1982) .....	59
Abb. 6.10: Spannungs-Verformungsverläufe aus Druckversuchen an Firnproben unterschiedlicher Dichte.....	60
Abb. 6.11: Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Firndichte.....	61
Abb. 6.12: Bruchverformungen als Funktion der Porosität .....	62
Abb. 6.13: Sekantenmodul in Abhängigkeit von der Porosität.....	63

Abb. 6.14: E-Modul für Firn in Abhängigkeit von der Temperatur (Nakaya, 1959).....	64
Abb. 6.15: Beispiel für die Darstellung der Versuchsdarstellungen und Auswertungen .....	65
Abb. 6.16: Spannungs-Verformungsbeziehungen der Kriechversuche (aus den Laborversuchen ergänzt durch Werte von Mellor et al, 1966 und Haefeli, 1968) .....	67
Abb. 6.17: Schematische Darstellung zur Ermittlung des Kriechmoduls $a$ .....	68
Abb. 6.18: Abhängigkeit des zeitunabhängigen Kriechmoduls $a$ von der Porosität .....	69
Abb. 6.19: Doppelt-logarithmische Darstellung der Laborversuche.....	71
Abb. 6.20: Abhängigkeit des zeitabhängigen Kriechmoduli $A$ von der Porosität.....	72
Abb. 6.21: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Kriechkurven .....	74
Abb. 6.22: Diagramm zur Ermittlung des temperaturabhängigen Verhältnisfaktors bezogen auf $-11^{\circ}\text{C}$ .....	75
Abb. 7.1: Doppelt-logarithmische Darstellung der Dauer der Primärkriechphase in Abhängigkeit von der Kriechspannung .....	77
Abb. 7.2: Ansatz zur Bestimmung der Dichte- und Spannungsabhängigkeit von $t_2$ .....	78
Abb. 7.3: Quasi-stationäre Verformungsraten $d\varepsilon_2/dt$ als Funktion der Spannung für unterschiedliche Dichten $\rho$ .....	79
Abb. 8.1: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Porosität .....	81
Abb. 8.2: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Druckfestigkeiten in..... Abhängigkeit von der Verformungsrate.....	82
Abb. 8.3: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Verformungsrate.....	83
Abb. AN 1: Druckversuche zur Ermittlung der Verformungsraten-Festigkeits-Beziehungen bei konstanter Dichte .....	92
Abb. An 2: Triaxiale Druckversuche zur Ermittlung der Dichten-Festigkeitsbeziehungen.....	94
Abb. An 3: Triaxiale Druckversuche zur Ermittlung der Dichten-Festigkeitsbeziehungen.....	95
Abb. An 4: Einaxiale Druckversuche zur Ermittlung der Dichten-Festigkeitsbeziehungen.....	97
Abb. An 5: Einaxiale Druckversuche zur Ermittlung der Dichten-Festigkeitsbeziehungen.....	98
ANLAGE 3 / Blatt 1 (C1 – C3).....	99
ANLAGE 3 / Blatt 2 (C4 – C6).....	100
ANLAGE 3 / Blatt 3 (C7 – C9).....	101
ANLAGE 3 / Blatt 4 (C10 – C12).....	102
ANLAGE 3 / Blatt 5 (C13 - C15).....	103
ANLAGE 3 / Blatt 6 (C16 - C18).....	104
ANLAGE 3 / Blatt 7 (C19 – C21) .....	105

## **DANKSAGUNGEN**

Für die Anregung zu dieser Arbeit und die Möglichkeiten der Versuchsdurchführungen in den Labors des Lehrstuhls für Grundbau und Bodenmechanik danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Ludwig Jessberger (†) ganz herzlich.

Für die Motivierung zur Abgabe der Dissertation, fachlichen Hinweisen und der ersten gutachterlichen Stellungnahme sage ich Prof. Dr. Heinrich Miller herzlichen Dank.

Für die Übernahme des Korreferates bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing.

Großer Dank gebührt meinen ehemaligen Feldkollegen Dr. Oskar Reinwarth, Dr. Hans Oerter, Heinrich Reese und Cord Drücker, die mich bei der Eisprobengewinnung und den in-situ Messungen berieten und unterstützten. Für Hinweise und weitere Anregungen bedanke ich mich bei Herrn Dr. Heinz Kohlen (†).

Frau Anette Rattay gebührt mein Dank für die Mithilfe bei der Durchführung der Laborversuche, sowie Herrn Engelsberg für das graphische Layout.

Durch die Unterstützung bei der Korrektur und der Erstellung der Druckversion durch meine Lebensgefährtin konnte ich meine Arbeit kurzfristig zum Abschluss führen.

Mein bisher erfolgreiches Leben verdanke ich meinen Eltern, die mir speziell in kritischen Situationen zur Seite standen. Ihnen möchte ich diese Arbeit widmen.

August, 2009

Karl-Heinz Bässler

## **NACHWORT**

Bei der ersten Standorterkundung 1979/80 für den Bau einer deutschen Überwinterungsstation fanden Sondierungen auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis mit einer vom Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum entwickelten Rammsonde statt. Damit wurden erste schneemechanische Parameter für Gründungsberechnungen im Bereich der deutschen Forschungsstationen ermittelt.

Aus den in den folgenden Jahren bis 1981 durchgeführten ersten Feldmessungen resultierten einfache Berechnungsansätze zur Beschreibung des zeitunabhängigen Spannungs-Verformungsverhalten im linearen Bereich, die von Dörr, 1984 vorgestellt wurden.

Während meiner Zeit am Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum (1982 bis 1986) und in den folgenden Jahren als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Alfred-Wegener-Institutes für Polar- und Meeresforschung (1986 bis 1989), sowie als Mitarbeiter der PolarMar GmbH (1989 bis 1991) hatte ich die Möglichkeit mehrere Versuchsreihen an den gewonnenen Bohrkernen durchzuführen, die Informationen über das Spannungs-Verformungsverhalten im nichtlinearen Bereich lieferten. In diesen rund 10 Jahren führte ich zudem mit Wissenschaftlern anderer Einrichtungen unter der Koordination des AWI während mehrfacher Aufenthalte in der Antarktis weitere Felduntersuchungen sowie Beprobungen der Firn- und Eisschichten bis in über 200 m Tiefe durch.

Als wissenschaftlicher Mitarbeiter des AWI führte ich u.a. die 1981 begonnenen Stationsverformungsmessungen weiter, die dem Germanischen Lloyd kontinuierlich aus Sicherheitsgründen erläutert werden mussten und betreute die nationalen Entwicklungen in der Eiskernbohrtechnologie.

Während meiner Tätigkeit bei PolarMar von 1989 bis 1991, einer speziell zur Konzeption von Antarktisstation eingerichteten Ingenieurgesellschaft, setzte ich bereits gewonnene Firn- und Eisparameter zur Berechnung von ingenieurglazologischen Fragestellungen ein. (Stationssetzungen, Verankerungen im Firn, etc.).

Die "**Berichte zur Polar- und Meeresforschung**" (ISSN 1866-3192) werden beginnend mit dem Heft Nr. 569 (2008) ausschließlich elektronisch als Open-Access-Publikation herausgegeben. Ein Verzeichnis aller Hefte einschließlich der Druckausgaben (Heft 377-568) sowie der früheren "**Berichte zur Polarforschung**" (Heft 1-376, von 1982 bis 2000) befindet sich im Internet in der Ablage des electronic Information Center des AWI (**ePIC**) unter der URL <http://epic.awi.de>. Durch Auswahl "Reports on Polar- and Marine Research" auf der rechten Seite des Fensters wird eine Liste der Publikationen in alphabetischer Reihenfolge (nach Autoren) innerhalb der absteigenden chronologischen Reihenfolge der Jahrgänge erzeugt.

*To generate a list of all Reports past issues, use the following URL: <http://epic.awi.de> and select the right frame to browse "Reports on Polar and Marine Research". A chronological list in declining order, author names alphabetical, will be produced, and pdf-icons shown for open access download.*

#### **Verzeichnis der zuletzt erschienenen Hefte:**

**Heft-Nr. 600/2009** — "Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA: The Expedition Lena 2009, edited by Julia Boike, Katya Abramova, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Mikhail N. Grigoriev, Ulrike Herzschuh, Gerhard Kattner, Christian Knoblauch, Lars Kutzbach, Gesine Mollenhauer, Waldemar Schneider

**Heft-Nr. 601/2009** — "Analyse von Bathymetrie und akustischer Rückstreuung verschiedener Fächersonar- und Sedimentecholot-Systeme zur Charakterisierung und Klassifizierung des Meeresbodens am Gakkel-Rücken, Arktischer Ozean", by Jörn Hatzky

**Heft-Nr. 602/2009** — "Cumacea (Crustacea; Peracarida) of the Antarctic shelf – diversity, biogeography, and phylogeny", by Peter Rehm

**Heft-Nr. 603/2010** — "The Expedition of the Research Vessel 'Polarstern' to the Antarctic in 2009 (ANT-XXV/5)", edited by Walter Zenk and Saad El Naggar

**Heft-Nr. 604/2010** — "The Expedition of the Research Vessel 'Polarstern' to the Antarctic in 2007/2008 (ANT-XXIV/2)", edited by Ulrich Bathmann

**Heft-Nr. 605/2010** — "The Expedition of the Research Vessel 'Polarstern' to the Antarctic in 2003 (ANT-XXI/1)", edited by Otto Schrems

**Heft-Nr. 606/2010** — "The Expedition of the Research Vessel 'Polarstern' to the Antarctic in 2008 (ANT-XXIV/3)", edited by Eberhard Fahrback and Hein de Baar

**Heft-Nr. 607/2010** — "The Expedition of the Research Vessel 'Polarstern' to the Arctic in 2009 (ARK-XXIV/2)", edited by Michael Klages

**Heft-Nr. 608/2010** — "Airborne lidar observations of tropospheric Arctic clouds", by Astrid Lampert

**Heft-Nr. 609/2010** — "Daten statt Sensationen - Der Weg zur internationalen Polarforschung aus einer deutschen Perspektive", by Reinhard A. Krause

**Heft-Nr. 610/2010** — "Biology of meso- and bathypelagic chaetognaths in the Southern Ocean", by Svenja Kruse

**Heft-Nr. 611/2010** — "Materialparameter zur Beschreibung des zeitabhängigen nichtlinearen Spannungs – Verformungsverhaltens von Firn in Abhängigkeit von seiner Dichte", by Karl-Heinz Bässler