

In situ-Messungen der mechanischen Festigkeit von Schnee auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis 1979/80

Von H. Kohnen, O. Reinwarth, N. Diekmann und H. L. Jessberger*

Zusammenfassung: Während der deutschen Antarktis-Expedition 1979/80 zum Filchner-Ronne-Schelf wurden in situ-Messungen der mechanischen Festigkeit von Schnee mit einer am Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum entwickelten Drehflügelsonde und einem Cone-Penetrometer durchgeführt. An mehreren Meßpunkten wurden Tiefenprofile der ungestörten und gestörten Flügelscherfestigkeit, des Eindringwiderstandes der Penetrometersonde sowie der Schneedichte aufgenommen. Die ungestörte Scherfestigkeit nimmt ebenso wie die Schneedichte mit größerer Tiefe zu, wohingegen die geringere gestörte Scherfestigkeit über die gesamte Untersuchungstiefe konstant bleibt. Tendenziell gleiche Ergebnisse konnten auch mit dem Cone-Penetrometer ermittelt werden. Mit Hilfe der Feldgeräte wurde auch die Effektivität einiger Verdichtungsmaßnahmen im Schnee untersucht. Es ergab sich, daß durch eine Umlagerung des Schnees und durch den anschließenden Sinterungsprozeß sowohl die Scherfestigkeit als auch der Eindringwiderstand erheblich gesteigert werden können. Aus den Messungen des Eindringwiderstandes wurden mit empirischen Beziehungen die undrained Scherfestigkeit und der Elastizitätsmodul des Schnees ermittelt. Zwischen der gemessenen Flügelscherfestigkeit und der errechneten undrained Scherfestigkeit sowie dem E-Modul besteht eine gute Übereinstimmung. Auch die mit dem Cone-Penetrometer aufgenommenen CBR-Werte bestätigen die Flügelmessungen und die Rechenwerte.

Summary: During the German Expedition to the Antarctic in 1979/80 in situ measurements of the strength of snow were performed on the Filchner/Ronne Shelf by means of a hand vane tester, developed at the Soil Mechanics Division of the Ruhr University Bochum, and a Cone Penetrometer.

At several measuring points depth profiles were taken of the undisturbed and disturbed shear strength, of the cone resistance, and of the snow density. The undisturbed shear strength and the snow density increase with increasing depth, whereas the smaller disturbed shear strength remains constant over depth. The measurements with the penetrometer show the same tendency. The equipment was also used to prove the effect of some methods of densification. Shear strength and cone resistance considerably increase in a transposed snow and during the following process of sintering. Undrained shear strength and Young's Modulus of snow were calculated with empirical equations using the cone resistance measurements. There exists a good consistency between measured and calculated shear strength. The CBR-values, taken with the Cone Penetrometer, also confirm the measurements with the vane tester and the calculation.

Während der deutschen Antarktis-Expedition 1979/80 wurden u. a. in situ-Messungen der mechanischen Festigkeit des Schnees am projektierten Standort der deutschen Antarktis-Station durchgeführt. Zweck dieser Untersuchungen war es, vor dem Bau der Station im Winter 80/81 einen Überblick über die Untergrundverhältnisse zu erhalten.

Für die geplanten Festigkeitsuntersuchungen des Schnees wurden der Expedition vom Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum eine am Institut entwickelte Drehflügelsonde für Einsatztiefen bis zu max. 5 m, ein kleiner Handdrehflügel sowie ein Cone-Penetrometer mitgegeben.

Im folgenden soll über den Einsatz dieser Geräte und die Ergebnisse der Messungen berichtet werden.

ENTWICKLUNG DER DREHFLÜGELSONDE RUB

Zur Bestimmung der undrained Scherfestigkeit von wassergesättigten bindigen Böden mit weicher bis steifer Konsistenz wird in der Bodenmechanik für Felduntersuchungen die Flügelsondierung angewendet. Sie ergibt die Gesamtfestigkeit des undrained Bodens bei schnellem Abscheren, die vorwiegend durch

* Dr. Heinz Kohnen, Institut für Geophysik der Universität, Corrensstr. 24, D-4400 Münster (Westf.).
Dipl.-Met. Oskar Reinwarth, Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Marstallplatz 8, D-8000 München.
Dipl.-Ing. Norbert Diekmann und Prof. Dr.-Ing. Hans L. Jessberger, Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität, Universitätsstr. 150, D-4360 Bochum-Querenburg.

den am Zylindermantel herrschenden Scherwiderstand bestimmt wird. Somit wird die Scherfestigkeit in senkrechten Ebenen des Untergrunds ermittelt.

Die mit diesem einfachen Gerät gemachten Erfahrungen haben gezeigt, daß die gemessenen Scherfestigkeiten in ausreichend guter Korrelation zu entsprechenden Ergebnissen aus verfeinerten Laborversuchen stehen.

Mit der Annahme, daß Schnee ähnliches strukturelles und mechanisches Verhalten wie ein wassergesättigter bindiger Boden hat, wurde die Drehflügelsonde prinzipiell dem bodenmechanischen Typ nachgebaut.

Die mit der Drehflügelsonde meßbaren Scherfestigkeiten sind im wesentlichen abhängig von den Abmessungen der Flügel, die entsprechend den aus der Literatur bekannten Scherfestigkeitsdaten von Schnee gewählt wurden. Der Scherwiderstand ergibt sich dann entsprechend DIN 4096:

$$\tau = \frac{6 \cdot M_D}{7 \cdot \pi \cdot D^3}$$

Hierin bedeuten M_D = Drehmoment in $\text{kp} \cdot \text{cm}$ und D = Durchmesser der Flügelsonde in cm .

Die Flügelsonde besteht aus einem Stab, an dessen unterem Ende vier Flügel rechtwinklig montiert sind. Die Höhe des Flügels h ist gleich dem doppelten Durchmesser D . Die Wandstärke der Flügel beträgt 2 mm.

In der Werkstatt des Instituts wurden für die Sonde zwei Drehflügel hergestellt mit den Abmessungen $h_A/D_A = 15/7,5 \text{ cm}$ und $h_B/D_B = 10/5 \text{ cm}$. Die Sonde wurde mit einem Drehmomentschlüssel mit einem aufbringbaren Drehmoment von max. $M_D = 600 \text{ kp} \cdot \text{cm}$ ausgerüstet. Somit konnte mit dem Drehflügel A eine Scherfestigkeit von $\tau_A = 0,4 \text{ kp/cm}^2$ und mit dem Flügel B eine Scherfestigkeit von $\tau_B = 1,4 \text{ kp/cm}^2$ gemessen werden.

Die Sonde wurde zusätzlich mit einem 3 kg schweren Fallgewicht versehen, mit dem sie bei einer definierten Fallhöhe von 30 cm in den Schnee eingetrieben werden konnte. Gleichzeitig sollte die Anzahl der Schläge pro festgelegte Eindringtiefe als zusätzliches Ergebnis und Vergleichsmöglichkeit dienen.

ERGEBNISSE DER FLÜGELSONDIERUNGEN

Auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis wurden insgesamt 3 Sondierungen mit der Flügelsonde (Flügel A und B) durchgeführt.

An den Sondierpunkten 1 und 2 wurde zunächst die Scherfestigkeit des ungestörten Schnees bis zu einer Tiefe von ca. 5 m aufgenommen. Das Ergebnis der Messungen der Flügelsondierung 1 ist in Abb. 1 dargestellt. In dem ersten Meter unterhalb des Ansatzpunktes konnten infolge des lockeren Schnees keine Scherwerte aufgenommen werden. Deutlich erkennbar ist dann der Anstieg der Scherfestigkeit mit zunehmender Tiefe. Bei ca. 5 m wird der Maximalwert $\tau = 1,4 \text{ kp/cm}^2$ erreicht. Der un stetige Verlauf der Scherfestigkeitslinie ist auf die unterschiedliche Beschaffenheit des Schnees in den verschiedenen mit der Sonde erfaßten Tiefen zurückzuführen.

Gleichzeitig wurde in Abb. 1 auch die Scherfestigkeit im gestörten Schnee dargestellt. Hierzu wurde nach der Messung der Scherfestigkeit des ungestörten Materials die Flügelsonde an der Untersuchungstiefe fünfmal im Uhrzeigersinn gedreht und danach die Scherfestigkeit wieder bestimmt. Im Gegensatz zur ungestörten Scherfestigkeit ist die Scherfestigkeit des gestörten Materials offenbar nicht von der Tiefe ab-

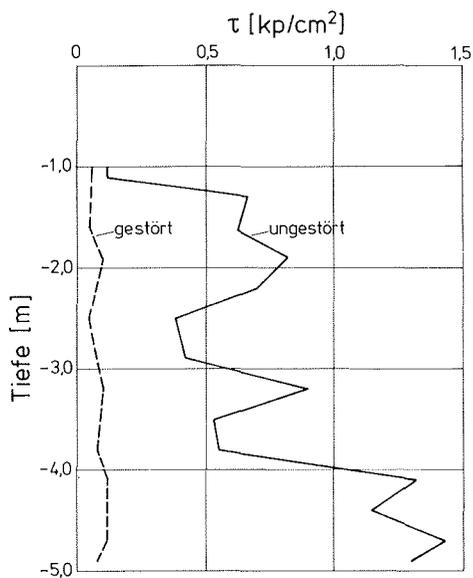


Abb. 1: Ergebnis der Flügelsondierung 1: ungestörte und gestörte Scherfestigkeit des Schnees.

Fig. 1: Results of vane shear test 1: undisturbed and disturbed shear strength of snow.

hängig und beträgt, wie zu erwarten, nur einen Bruchteil der des ungestörten Schnees.

In Abb. 2 ist das Ergebnis der Flügelsondierung am Punkt 2 dargestellt. Sowohl für die Scherfestigkeit des ungestörten als auch des gestörten Schnees ergibt sich ein qualitativ ähnlicher Verlauf wie am Sondierpunkt 1. Zusätzlich sind in diesem Bild noch die zum Erreichen der jeweiligen Untersuchungstiefe erforderlichen Schlagzahlen mit dem 3-kg-Fallgewicht aufgetragen. Es läßt sich erkennen, daß hier eine gute Übereinstimmung zwischen gemessener Scherfestigkeit und Schlagzahl vorhanden ist. Ferner sind in der Abb. 2 die Ergebnisse von Dichtemessungen enthalten. Nähere Angaben zum Dichteprofil enthält der

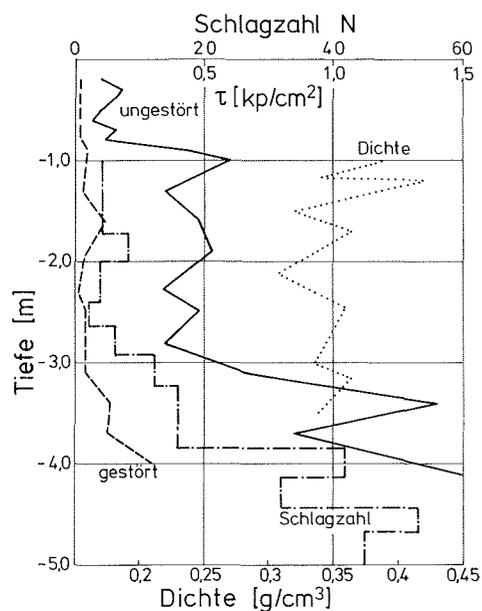


Abb. 2: Ergebnis der Flügelsondierung 2: Scherfestigkeit, Schlagzahl und Dichte.

Fig. 2: Results of vane shear test 2: shear strength, number of blows, and density.

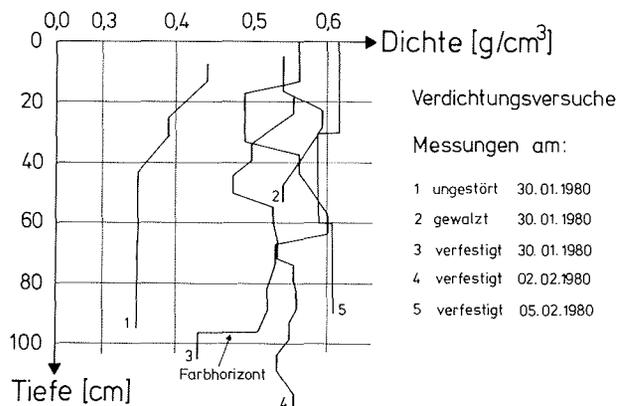


Abb. 3: Scherfestigkeit des Schnees vor und nach verschiedenen Verdichtungsmaßnahmen (Filchner-Station).

Fig. 3: Shear strength of snow before and after different methods of densification (Filchner Station).

Bericht über die glazialmeteorologischen Arbeiten (REINWARTH 1981).

Um die Wirksamkeit einiger Verdichtungsmaßnahmen zur Verbesserung der Tragfähigkeit des Schnees zu überprüfen, wurde nach Aufnahme des Normalprofils der ungestörten Scherfestigkeit bis in 1 m Tiefe am Sondierpunkt 3 eine abgesteckte Fläche mechanisch durch mehrmaliges Überfahren mit einem Kettenfahrzeug verfestigt. Das Ergebnis der anschließend durchgeführten Sondierung ist im Vergleich zum Normalprofil in Abb. 3 dargestellt. Es ist erkennbar, daß infolge der mechanischen Verfestigung eine Verbesserung der Flügelscherfestigkeit im oberflächennahen Bereich zwischen 0,1 und 0,3 m erzielt wird. Eine Tiefenwirkung konnte nicht ermittelt werden.

Als zweites Verfahren wurde eine Verdichtung des Schnees durch Umlagerung untersucht. Hierfür wurde mit einer Motorfräse ein 1 m breiter und 10 m langer sowie 80 cm tiefer Graben ausgefräst (27. 1.), der anschließend mit dem ausgeworfenen Material wieder verfüllt* und dann etwa 3 Tage sich selbst überlassen wurde. Im weiteren Verlauf wurden in dem durch Sinterung verfestigten Material eine Flügelmessung sowie wiederholt Dichtemessungen und Rammsondierungen durchgeführt. Bei der Flügelmessung wurde schon in einer Tiefe von 0,3 m mit einer Scherfestigkeit von $\tau = 1,4 \text{ kp/cm}^2$ die Grenze des Meßbereichs der Flügelsonde erreicht. Eine nochmalige Verdichtung des umgelagerten Schnees durch Überfahren mit dem Kettenfahrzeug führte wiederum nur zu einer oberflächennahen Verbesserung der Tragfähigkeit, wie die anschließende Messung mit der Flügelsonde zeigt (Abb. 3).

In dem ausgefrästen Graben waren 4 Querprofile mit Farbpulver markiert worden, so daß bei Wiederholungsmessungen die seitliche und untere Begrenzung des ungestörten Bereichs erkennbar waren. Die Änderung der Dichte als Folge der Umlagerung des Schnees und der Vergleich mit den Dichtewerten des ungestörten Bereichs, unmittelbar neben den markierten Profilen zeigt in einer Auswahl der Messungen Abb. 4. Für den ungestörten Bereich sind hier nur die Dichtemessungen vom 30. 1. enthalten, die im Mittel bei $0,37 \text{ g/cm}^3$ liegen, da in diesem Bereich keine Änderungen eintraten. Die etwas höheren Werte in der oberflächennahen Schicht sind auf das Befahren des Randstreifens mit der Schneefräse und die zeitweilige Auflast durch den ausgeworfenen Schnee zurückzuführen.

Bei der ersten Nachmessung am 30. 1. variieren die Dichtewerte zwischen $0,43 - 0,56 \text{ g/cm}^3$, das Mittel beträgt $0,52 \text{ g/cm}^3$, was einer Dichtezunahme von 33% gegenüber den Ausgangswerten entspricht. Der Effekt des zusätzlichen Walzens durch Befahren des Teststreifens mit dem Kettenfahrzeug zeigt keine merklichen Auswirkungen bei den Dichtewerten. Wesentlich stärker ist die Zunahme der Dichte als Folge der weiteren Andauer des Sinterungsprozesses.

* Für die Ausführung dieser Arbeiten wird Herrn G. Fuchs gedankt.

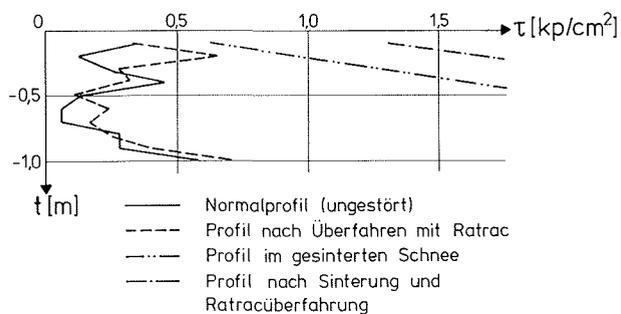


Abb. 4: Ergebnisse der Dichtemessungen im Verlauf des Verdichtungsversuchs durch Schneeuablagerung.

Fig. 4: Results of density measurements during the process of sintering.

Bei der letzten Messung am 5. 2. liegt das Mittel der Dichtewerte bei $0,60 \text{ g/cm}^3$. Gleichzeitig hat das Material eine Festigkeit erreicht, die keine Dichtemessung mit den normalen 500-cm^3 -Dichtesonden der CRREL-Ausrüstung mehr zuließ, die Proben der Messung 5 in Abb. 4 wurden vielmehr mit einem gezahnten Schneeaussteichrohr von 50 cm^2 Querschnitt, wie es in der Gletscherforschung Verwendung findet, gewonnen.

Der Versuch einer Bestimmung der Rammhärte mußte in 50 cm Tiefe abgebrochen werden, da die mechanische Festigkeit des umgelagerten Materials schon im ersten halben Meter Werte erreicht hat, die mit der Rammsonde des verwendeten Modells „Schnee- und Lawinenforschungs-Davos“ nicht mehr erfaßt werden konnten. Die Auswertung zeigt Abb. 5.

Für die als Ergebnis des Versuchs erzielte deutliche Verdichtung und Verfestigung des Materials waren dabei im wesentlichen folgende Vorgänge maßgeblich:

- Abbau der grobkörnigen Lockerschichten im stratigraphischen Profil des Stationsbereichs;
- mechanische Zerkleinerung des grobkörnigen Materials durch den zweimaligen Fräsvorgang;
- erheblich dichtere Packung des Materials beim Verfüllen des Grabens als bei der natürlichen Sedimentation;
- Beschleunigung des Sinterungsprozesses durch Entstehen frischer Bruchkanten der Firnkörner beim Fräsvorgang;
- Störung des Temperaturfeldes mit Anheben der Schneetemperatur auf die höheren Oberflächenwerte des Temperaturprofils und dadurch bedingt eine zusätzliche Beschleunigung des Sinterungsprozesses.

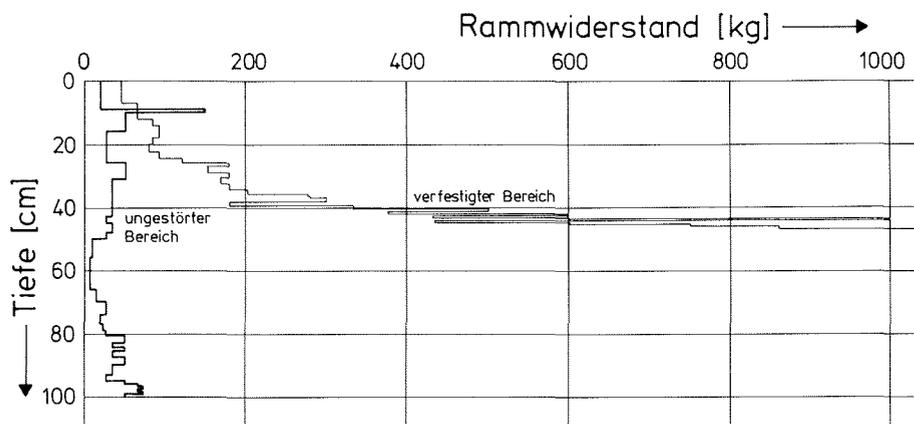


Abb. 5: Bestimmung des Rammwiderstandes in den durch Schneeuablagerung verfestigten und ungestörten Bereichen.

Fig. 5: Cone resistance in transposed and undisturbed snow.

CONE-PENETROMETER-TESTS

Als weiteres in situ-Gerät zur Bestimmung der Scherfestigkeit des Schnees wurde neben der Flügelsonde ein Cone-Penetrometer eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein in der Bodenmechanik übliches Meßgerät, mit dem der Widerstand des zu prüfenden Materials gegenüber der Eindringung eines Kegels mit definierten Abmessungen ermittelt wird (vergleichbar der in der Schneemechanik gebräuchlichen Rammsonde). Die hier verwendete leichte Ausführung eines Cone-Penetrometers wird in der Bodenmechanik vorwiegend bei der Untersuchung von weichen, bindigen Böden eingesetzt. Mit dem Penetrometer konnten sowohl CBR-Werte (California-Bearing-Ratio) als auch ein sogenannter Cone-Index (CI) aufgenommen werden.

Zur Bestimmung des Cone-Index wurde eine Kegelspitze mit einer Fläche $F = 323 \text{ mm}^2$ mit einer möglichst gleichförmigen Geschwindigkeit in den Boden eingedrückt. Alle 10 cm wird der Cone-Index auf einer rotierenden Meßskala abgelesen. Insgesamt wurde an 10 Meßpunkten bis ca. 1,30 m Tiefe sondiert. Die Ergebnisse dieser Penetrometer-Messung zeigen, daß der Cone-Index ebenso wie die Scherfestigkeiten mit der Tiefe zunimmt (Abb. 6).

Der Cone-Index gibt ein Maß für den Rammwiderstand einer in den Schnee eindringenden Kegelspitze an. Bei bodenmechanischen Untersuchungen läßt sich aus diesem Rammwiderstand die ungefähre Größe der undrännierten Scherfestigkeit des Bodens sowie der Verformungsmodul des Materials mit Hilfe einer empirischen Beziehung ermitteln. Es wird hier der Versuch unternommen, die für weiche Tone geltenden empirischen Beziehungen auf den Schnee zu übertragen. Inwieweit dieses zulässig ist, müssen genauere Feld- und Laboruntersuchungen bei späteren Expeditionen sowie Literaturstudien noch zeigen.

Um aber eine erste Abschätzung für die interessierenden Werte der undrännierten Scherfestigkeit und des

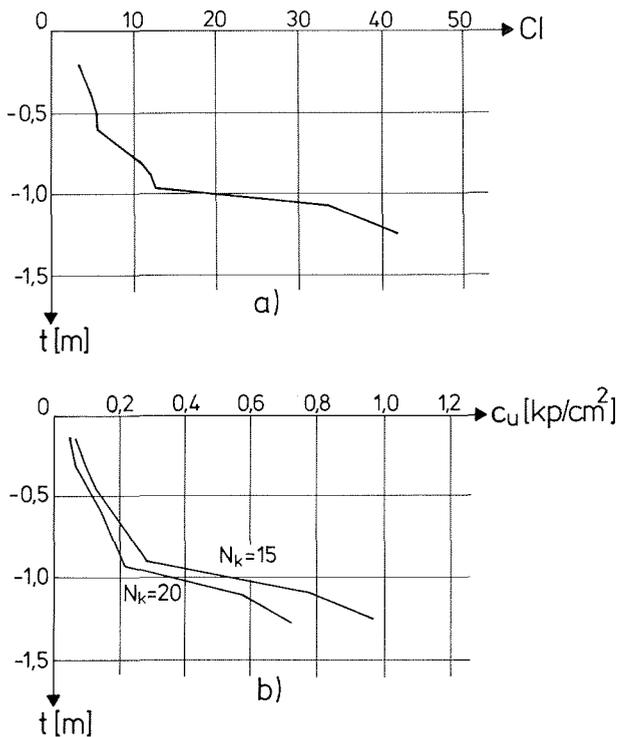


Abb. 6: Ergebnisse des Cone-Penetrometer-Tests: a) Cone-Index, b) undrännierte Scherfestigkeit.

Fig. 6: Results of cone penetrometer tests: a) cone index, b) undrained shear strength.

Elastizitätsmoduls des Schnees zu erhalten, werden diese aus der Bodenmechanik stammenden Ansätze auf den Schnee übertragen.

Aus dem Cone-Index läßt sich die undräßierte Scherfestigkeit C_u mit einer von KJEKSTAD, LUNNE & CLAUSEN (1978) angegebenen Beziehung ermitteln. Diese beruht auf Vergleichsuntersuchungen an weichen Tonen sowohl in situ als auch im Labor. Danach ergibt sich die Scherfestigkeit für undräßierte Böden zu

$$C_u = \frac{Q_c - \gamma \cdot z}{N_k} \quad (1)$$

Hierin bedeutet Q_c den Eindringungswiderstand des Kegels und N_k einen Cone-Faktor, der bei weichen Böden zwischen 15 und 20 variieren kann. Die Dichte γ des Schnees wurde mit $\gamma = 0,36 \text{ g/cm}^3$ gewählt. Mit diesen Werten ergibt sich in ca. 1,30 m Tiefe eine undräßierte Scherfestigkeit $C_u = 0,73 \text{ kp/cm}^2$. In der Abb. 6 sind die so errechneten undräßierten Scherfestigkeiten dargestellt. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Flügelsondierungen 1, 2 und 3 zeigt sich eine qualitativ gute Übereinstimmung.

Zur Abschätzung des Verformungsmoduls des Schnees wird ebenfalls eine aus der Bodenmechanik bekannte empirische Beziehung

$$E \sim 150 \cdot C_u \text{ (kp/cm}^2\text{)} \quad (2)$$

verwendet. Hiermit ergibt sich in einer Tiefe von 1,30 m ein Verformungsmodul für $N_k = 15$ von ca. 150 kp/cm^2 und für $N_k = 20$ von ca. 110 kp/cm^2 (Abb. 7).

Aus einaxialen Druckversuchen mit unterschiedlichen Verformungsgeschwindigkeiten ergibt sich nach MELLOR (1975) für den Verformungsmodul ein Streubereich von $200 < E < 450 \text{ (kp/cm}^2\text{)}$. Allerdings ist hierbei noch zu berücksichtigen, daß die Untersuchungstemperatur zwischen -12°C und -25°C variiert, hingegen bei den Cone-Penetrometertests nur eine Temperatur von ca. -11°C in 1,30 m Tiefe herrschte. Die mit Gleichung (2) ermittelten Werte liegen etwa um den Faktor 2 bis 4 niedriger als die von MELLOR angegebenen Moduli.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, daß diese Werte nicht unbedingt repräsentativ für den Schnee bis in eine Tiefe von ca. 1,50 m sein können, da ihrer Ermittlung empirische, für andere Materialien gewonnene

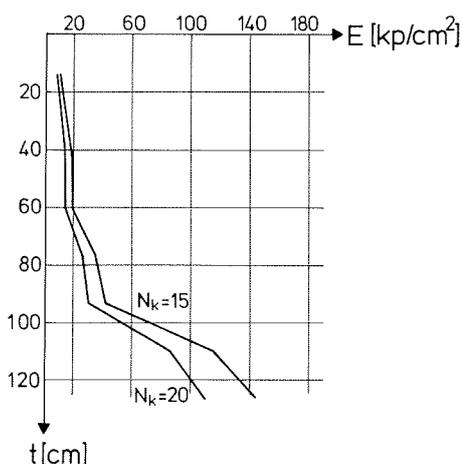


Abb. 7: Verformungsmodul des Schnees über Tiefe.

Fig. 7: Deformation modulus of snow versus depth.

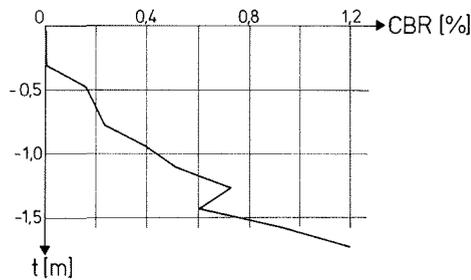


Abb. 8: CBR-Werte für Schnee über Tiefe.

Fig. 8: CBR values for snow versus depth.

Beziehungen der Bodenmechanik zugrunde liegen.

Mit dem Cone-Penetrometer konnten auch sogenannte CBR-Werte aufgenommen werden. Die an einigen zusätzlichen Meßpunkten durchgeführten Penetrometertests ergaben CBR-Werte zwischen 0 und 1,2%, wodurch im bodenmechanischen Sinne ein weiches, wenig tragfähiges Material gekennzeichnet ist. Übertragen wir auch hier analog dem zuvor Gesagten Beziehungen aus der Bodenmechanik auf den Schnee, so läßt sich nach Angabe von FLOSS (1973) wiederum als Näherung mit großer Streubreite der sogenannte Tragwert angeben, der in 1,75 m Tiefe für 1,2% CBR im Mittel bei $E_{V2} = 60 \text{ kp/cm}^2$ beträgt, max. jedoch etwa $E_{V2} = 120 \text{ kp/m}^2$ erreichen kann. Die CBR-Werte sind in der Abb. 8 über die Meßtiefe aufgetragen.

Literatur

- FLOSS, R. (1973): Bodenmechanische Gesichtspunkte bei der Auswahl und Dimensionierung von Straßenbefestigungen. — Straße und Autobahn 1.
- KJEKSTAD, O., LUNNE, T. & C. J. F. CLAUSEN (1978): Comparison between in situ cone resistance and laboratory strength for overconsolidated North Sea clay. — Norwegian Geotech. Inst. Publ. 124, Oslo.
- MELLOR, M. (1975): A review of basic snow mechanics. — Int. Symp. on Snow Mechanics, Int. Ass. Sci. Hydrol. Publ. 114.
- REINWARTH, O. (1981): Glazialmeteorologische Arbeiten auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis während der Standorterkundungsexpedition 1979/80. — Polarforschung 51 (1): 61—75.