

FESTIGKEITSUNTERSUCHUNG BEI NIEDRIGER TEMPERATUR EINGESETZTER HYDROGLOBUSSE

Von

A. SZEKERES

Lehrstuhl Technische Mechanik, Technische Universität,
Budapest

Eingegangen am 15. Januar 1979.
Vorgelegt von Prof. Dr. Gy. BÉDA

Einleitung

Einleitung

1. Berechnung
 - 1.1 Grundlegende Voraussetzungen
 - 1.2 Berechnung des zylindrischen Teiles
 - 1.3 Berechnung der Kugel
 2. Messungen
 3. Vergleich der Berechnungen und Messungen
- Folgerungen
Zusammenfassung
Literatur

Da die Festigkeitsverhältnisse der bei sehr niedrigen Temperaturen ($-30, -40^{\circ}\text{C}$) eingesetzten Hydroglobusse äußerst kompliziert sind und die anwendbaren Prüfungsmethoden — wegen der Umstände — viel weniger genau als im allgemeinen im Maschinenbauwesen sind, wurden die Prüfungen nach einer kombinierten Methode durchführt.

Der Vorgang, der sich im Behälter während der Eisbildung abspielt, wurde mit Hilfe eines prinzipiellen Modells beschrieben, und die Berechnungen wurden auf dieses aufgebaut. Demnach wurden Festigkeitsprüfungen an einem verkleinerten Modell vorgenommen. Schließlich wurden — unter Anwendung der Ergebnisse der Ultraschall-Eisdickenmessung — ein dreifacher Vergleich bzw. eine Ergänzung durchführt. Einerseits haben wir die Berechnung mit den Festigkeitsmessungen, andererseits mit den Ergebnissen der Ultraschallmessung und drittens die Ultraschall- und Festigkeits-Messungen untereinander verglichen.

Die Übereinstimmung genügte um — auf Grund der Ergebnisse — Feststellungen über den Hydroglobus zu machen.

Es wurde angenommen, daß der Anfüllungsgrad des Behälters die Volumenvergrößerung um ungefähr 3% bei der Wasser-Eis-Umwandlung in

einer Weise ermöglicht, daß dadurch keine Festigkeitsbeanspruchung entsteht. Eine weitere Annahme war, daß der Spannungszustand infolge der ungleichmäßigen Temperaturverteilung sowie der Ausdehnungskoeffizienten mit verschiedenen Vorzeichen des Eises und des Stahls im Eis viel früher den kritischen Wert erreicht, als in der Behälterwand, so daß nach Erreichen einer gewissen Dicke die Eisschicht zerknackt und dadurch der Behälter entweder entlastet wird oder sich die Belastung vermindert.

Für die Berechnung wurde angenommen, daß der Hydroglobus aus einer dünnwandigen Kugel und einem Zylinder zusammengesetzt sei. Mit dieser Approximation wichen wir in Richtung der Sicherheit ab.

1. Berechnung

1.1 Grundlegende Voraussetzungen

Nach unserer Vorstellung vollzieht sich die Bildung der Eisschicht wie folgt: Nehmen wir an, daß die Untersuchung dann begonnen wird, wenn der Behälter völlig mit Wasser mit der Temperatur 0°C gefüllt, und die Außentemperatur T_k ist. In diesem Falle bildet sich eine Eisschicht von v_j Dicke mit der Temperatur, 0°C , welche keine Beanspruchung verursacht, da das größere Volumen genügend Platz im Behälter hat. Im nächsten Schritt kühlt sich diese Eisschicht ab und dem stationären Zustand gemäß bilden sich Temperaturverteilung und Spannungszustand heraus. Die Berechnung des Spannungszustandes kann in zwei Schritten durchgeführt werden. Lassen wir jetzt den Stahlbehälter vorübergehen beiseite und nehmen wir an, daß sich das Eis frei deformieren kann. Dem negativen Wärmesaudehnungskoeffizienten und der Abkühlung gemäß wird der Durchmesser jetzt größer. Andererseits kommt wegen der ungleichen Temperaturverteilung ein Spannungszustand zustande. Nun wird der Stahlbehälter auf diese Eisschicht mit vergrößertem Durchmesser aufgesetzt. Das verursacht zwischen den zwei Schichten einen Druck und demgemäß Verformung, und es kommt wieder ein Spannungszustand zustande. Der resultierende Spannungszustand ergibt sich als Überlagerung auf den vorigen.

Die Kontraktion der Behälterwand wird vernachlässigt. Das ist einerseits möglich da das wegen des Verhältnisses der Wärmedehnungskoeffizienten des Eises zu jenem des Stahls-bloß einen 2 bis 3%-igen Fehler verursachen würde und andererseits auch weil es aus dem Verhältnis der Wärmeleitzahl des Eises zu jener des Stahls folgt, daß die Behälterwand auch schon bei ganz kleiner Eisdicke die Außentemperatur annimmt und dies sich während der Prozesses auch nicht ändert.

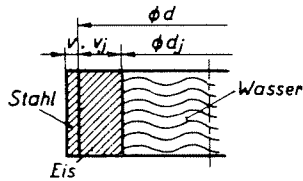


Abb. 1

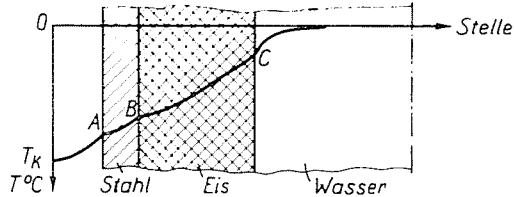


Abb. 2

1.2 Berechnung des zylindrischen Teiles

Die Berechnung wird auf Grund der beschriebenen Annahmen mit den Bezeichnungen in *Abb. 1* unternommen.

Zuerst wird die Temperatur des Eises bestimmt. Dem stationären Wärmeleitungszustand gemäß wird die Temperatur des Eises und des Stahls von der Temperatur 0°C im Behälter einer logarithmischen Kurve gemäß auf die Umgebungstemperatur T_k herabfallen (*Abb. 2*). Da die Wärmeleitfähigkeit des Stahles nur um etwa eine Größenordnung höher als die des Eises ist, ferner die Eisdicke während des ganzen gefrierprozesses praktisch um ein mehrfaches größer als die des Stahls ist, kann angenommen werden, daß

$$T_A \cong T_B.$$

Da weiterhin der durch die ungleiche Temperaturverteilung verursachte Deformations und Spannungszustand von der Temperaturdifferenz $T_c - T_B$ abhängig ist, nehmen wir an, daß

$$t = T_c - T_B = \tau_1(0 - T_k). \quad (1)$$

Damit ist das Temperaturverteilungsproblem, auf die Kenntnis von τ_1 zurückgeführt, da T_k ein Meßergebnis ist. τ_1 hängt von den Wärmeübergangszahlen, dem Verhältnis der Stahl — zu der Eisdicke und den Wärmeleitzahlen ab.

Auf Grund des Gesagten läßt sich, wenn in der Eisschicht von v_j Dicke eine Temperaturdifferenz $t^{\circ}\text{C}$ entsteht, die radiale Verschiebung der Punkte am

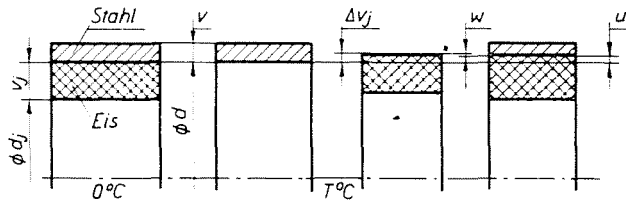
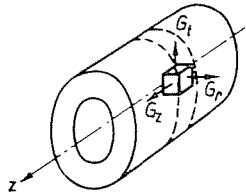


Abb. 3



äußeren Umfang nach der Fachliteratur [1], mit Gleichung (2) berechnen. (Siehe Tabelle 1.) Hier ist α_j der Wärmeausdehnungskoeffizient des Eises, die weiteren Größen können nach den *Abb. 1, 2* oder *3* interpretiert werden. Von dieser Überdeckung Δv_j übernehmen das Stahlrohr, u und das Eisrohr w , welche Größen nach der Fachliteratur [2] mit Hilfe der Gleichungen (3) und (4) gewonnen werden (Tabelle 1). In diesen sind E und E_j die Elastizitätsmodulen des Stahles bzw. des Eises, und μ_j ist die Poisson-Zahl des Eises.

Der Druck wird mit Gl. (5) berechnet (siehe Tabelle 1), und in Kenntnis des Druckes können die Spannungen im Stahlrohr, da es als dünnwandiger Zylinder angenommen wurde, nach Gl. (6) bestimmt werden (Tabelle 1).

Im Eis, das als dickwandiges Rohr betrachtet wird, werden die Spannungen wegen der ungleichmäßigen Temperaturverteilung [1] bzw. der verteilten Last p in zwei Schritten berechnet [2]. Die angewandten Beziehungen sind in Tabelle 2 zu sehen: (7)–(11). Die Richtungen mit Indexen r , t und z werden gemäß *Abb. 4* interpretiert.

Es ist zu bemerken, daß mit einer axialen Spannung (σ_z) in Folge der verteilten Belastung darum nicht gerechnet wird, da wir annehmen, daß sich das Eis in dieser Richtung ungehindert verformen kann. Obwohl dies etwas Ungenauigkeit verursacht, ist diese nicht höher als zulässig und in anderen Teilen der Berechnung erwartet wird.

Auf Grund der angeführten Beziehungen sollen die Eisdicke bei der das Eis infolge der auftretenden Spannungen birst bzw. die dann im Stahlbehälter auftretenden Spannungen bestimmt werden. Die Ausgangsdaten sowie den Abmessungen der Modells sind wie folgt.

Tabelle 1

Verschiebungen, Drücke, Spannungen

Einheit	Verschiebungen		Drücke	Spannungen	
	Auf Grund ungleichmäßiger Temperaturverteilung	Auf Grund geteilter Belastung			
Zylinder	Eis	$\Delta v_j = \frac{d}{2} \left\{ \frac{\alpha_j t}{2 \ln \left(\frac{d_j}{d} \right)} \left[\frac{2 \left(\frac{d_j}{d} \right)^2}{1 - \left(\frac{d_j}{d} \right)^2} \ln \left(\frac{d_j}{d} \right) + \alpha_j T_B \right] \right\} \quad (2)$	$w = p w_1 = p \frac{d}{2 E_j} \left[\frac{1 + \left(\frac{d_j}{d} \right)^2}{\left(\frac{d_j}{d} \right)^2 - 1} + \mu_j \right] \quad (4)$	Siche Tabelle 2	
	Stahl	-----	$u = p u_1 = p \frac{d^2}{4 \nu E} \quad (3)$		$\sigma = \frac{dp}{2 \nu} \quad (6)$
Kugel	Eis	$\Delta v_j = \frac{c}{4} \frac{1 - \mu_j}{E_j} (3R_1 - 1) + \frac{d}{2} \alpha_j T_B \quad (12)$	$w = p w_1 = -p \frac{d}{2 E_j} \left\{ \frac{\left(\frac{d_j}{d} \right)^2 + 2}{2 - \left(\frac{d_j}{d} \right)^3} (1 - \mu_j) - \mu_i \right\} \quad (14)$	$p = \frac{\Delta v_j}{u_1 - w_1} \quad (5)$	Siche Tabelle 2
	Stahl	-----	$u = p u_1 = p \frac{d^2}{8 \nu E} (1 - \mu) \quad (13)$		

Tabelle 2

Spannungskomponenten in dickwandigen Einheiten

Einheit		Auf Grund unregelmäßiger Temperaturverteilung			Auf Grund geteilter Belastung		
		$\sigma_r =$	$\sigma_{t,z} =$	$\sigma_z =$	$\sigma_r =$	$\sigma_t =$	$\sigma_z =$
Zylinder	An der inneren Rohrwand	0	$\frac{E_j \alpha_j t}{2(1-\mu_j)} \frac{1}{\ln\left(\frac{d_j}{d}\right)} \left[1 + \frac{2}{1 - \left(\frac{d_j}{d}\right)^2} \ln\left(\frac{d_j}{d}\right) \right]$ (7)	σ_t (7)	0	$p \frac{2}{\left(\frac{d_j}{d}\right)^2 - 1}$ (9)	0
	An der äußeren Rohrwand	0	$-\frac{E_j \alpha_j t}{2(1-\mu_j)} \frac{1}{\ln\left(\frac{d_j}{d}\right)} \left[1 + \frac{2\left(\frac{d_j}{d}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_j}{d}\right)^2} \ln\left(\frac{d_j}{d}\right) \right]$ (8)	σ_t (8)	$-p$ (10)	$p \frac{1 + \left(\frac{d_j}{d}\right)^2}{\left(\frac{d_j}{d}\right) - 1}$ (11)	0
Kugel	An der inneren Rohrwand	0	$\frac{c}{d}(R_1 - 1) + \frac{c}{2} R_1 \frac{d^2}{d_j^3} + \frac{c}{d_j}$ (16)	-	0	$p \frac{3}{2 \left[\left(\frac{d_j}{d}\right)^3 - 1 \right]}$ (18)	-
	An der äußeren Rohrwand	0	$\frac{c}{d}(1.5R_1 - 0.5)$ (17)	-	$-p$ (19)	$p \frac{\left(\frac{d_j}{d}\right)^3 + 2}{2 \left[\left(\frac{d_j}{d}\right)^3 - 1 \right]}$ (20)	-

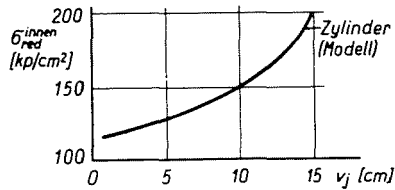


Abb. 5

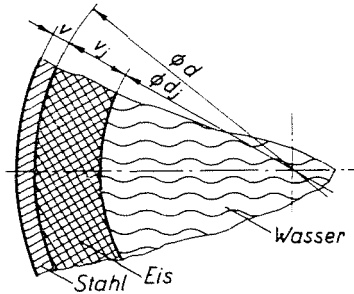


Abb. 6

$$\begin{aligned}
 E &= 2 \cdot 10^6 \text{ kp/cm}^2 & t &= 30^\circ \text{ C}, & \text{\textcircled{O}}d &= 30 \text{ cm}, \\
 E_j &= 10^5 \text{ kp/cm}^2 & T_B &= -32^\circ \text{ C}, & v &= 0,4 \text{ cm}. \\
 \alpha_j &= -5 \cdot 10^{-5} / ^\circ \text{C} \\
 \mu_j &= 0,33.
 \end{aligned}$$

Die Berechnung wurde mit verschiedenen Eisdicken (v_j) mehrmals wiederholt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefaßt. Die reduzierten Spannungen wurden nach der Mohrschen Theorie der spröden Stoffe bestimmt. Abb. 5 zeigt die im inneren Radius (als Bruchstelle) auftretenden reduzierten Spannungen ($\sigma_{\text{RED}}^{\text{BELÜL}}$) in Abhängigkeit von der Eisdicke (v_j). Vom Diagramm ist abzulesen, daß eine der in der Fachliteratur [3] angegebenen Bruchfestigkeit von 130 kp/cm^2 nahe Spannung im Eis bei einer Dicke von 5,5 bis 6 cm entsteht. (Der Wert 130 kp/cm^2 ist bei einer auf die natürliche Fläche senkrechten Spannung gültig). Demgemäß wird die Eiskriste ungefähr bei dieser Dicke Brechen. Das wurde sowohl durch Ultraschall als auch durch Dehnungsmeßstreifen-Messungen bewiesen.

1.3 Berechnung der Kugel

Wie bei der Berechnung des Zylinders, werden die Beziehungen der Kugel auf Grund von [5] und [6] mit den Bezeichnungen in Abb. 6, angeschrieben.

Tabelle 3
Spannungen in kp/cm^2

Eisdicke t_r (cm)	Geteilte Belastung p (kp/cm^2)	Spannung im Behälter σ p (kp/cm^2)	Stelle	Spannungen im Eis (Zylinder)												
				Auf Grund ungleich- mässiger Temp. vert.			Auf Grund geteil- ter Belastungen			Resultierende			Hauptspannungen			Gleichwertige
				σ_r	σ_t	σ_z	σ_r	σ_t	σ_z	σ_r	σ_t	σ_z	σ_1	σ_2	σ_3	σ_{red}
5	23	860	Außenradius	0	-96,9	-96,9	-23	-60	0	-23	-156,9	-96,9	-23	-96,9	-156,9	44
			Innenradius	0	127,8	127,8	0	-82,6	0	0	45,2	127,8	127,8	45,2	0	127,8
10	39,6	1485	Außenradius	0	73,8	-73,8	39,6	49,4	0	-39,6	-123,2	-73,8	-39,6	-73,8	-123,2	13,4
			Innenradius	0	150,3	150,3	0	89,1	0	0	61,2	150,3	150,3	61,2	0	150,3
14	52,1	1955	Außenradius	0	-40,3	-40,3	-52,1	-52,5	0	-52,1	-92,8	-40,3	-40,3	-52,1	-92,8	0,3
			Innenradius	0	184	184	0	-105	0	0	79,5	184	184	79,5	0	184

Tabelle 4
Spannungen in kp/cm^2

Eisdicke t_r (cm)	Geteilte Belastung p (kp/cm^2)	Spannung im Behälter σ	Stelle	Spannungen im Eis (Kugel)									
				Unregelmäßige Temperaturverteilung		Auf Grund geteil- ter Belastung		Resultierende		Hauptspannungen			Gleichwertige
				σ_r	σ_t	σ_r	σ_t	σ_r	σ_t	σ_1	σ_2	σ_3	σ_{red}
5	13,7	1628	Außenradius	0	-95,1	13,7	-66,5	-13,7	-161,6	-13,7	161,6	-161,6	55,8
			Innenradius	0	130	0	-73,5	0	56,5	56,5	56,6	0	56,5
10	17,7	2103	Außenradius	0	-94,6	17,7	-43,5	-17,7	-138,1	-17,7	138,1	-138,1	41,7
			Innenradius	0	129	0	-52,5	0	76,6	76,6	76,6	0	76,6

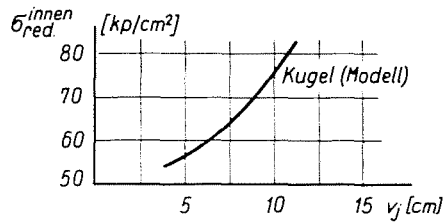


Abb. 7

Zusammenfassend siehe in Tabellen 1 und 2. In den Gleichungen (12) bis (26) sind:

$$C = \frac{\alpha_j \cdot E_j}{1 - \mu_j} \cdot \frac{d \cdot d_j}{d - d_j}, \quad (21)$$

$$R_1 = \frac{d_j^2(d - d_j)}{d^3 - d_j^3}. \quad (22)$$

Bestimmen wir mit diesen Beziehungen die sphärische Eisdicke, bei der das Eis infolge der entstehenden Spannungen knackt. Es wurden mit

$$\textcircled{d} = 95 \text{ cm}$$

$$v = 0,2 \text{ cm},$$

bzw. mit den bei dem zylindrischen Teil angewandten Daten Berechnungen bei verschiedenen Eisdicken angestellt, deren Ergebnisse in Tabelle 4 zusammengefaßt sind. Wird die reduzierte Spannung $\sigma_{RED}^{BELÜL} = f(v_j)$ dargestellt (Abb. 7), ist abzulesen, daß die kritische Spannung im Eis bei einer Dicke von ungefähr 9 bis 10 cm die Bruchfestigkeit annähert. Demgemäß muß das Eis bei dieser Eisdicke knacken.

Da in dem kugelförmigen Behälter relativ hohe Spannungen auftreten, ist zu bemerken, daß die Näherung durch eine Kugel viele Ungenauigkeiten enthält. Die Kugelsymmetrie wird einerseits dadurch beeinträchtigt daß der Behälter nicht ganz angefüllt ist, andererseits durch das darin befindliche zylindrische Rohr bzw. den Rohransatz. Durch beide Wirkungen verschieben sich die Verhältnisse in Richtung des Zylinders, d. h. in günstiger Richtung.

2. Messungen

Zur Ergänzung der Berechnungen wurden die Dehnungen in der Behälterwand während der Abkühlung des Modells mit Dehnungmeßstreifen registriert.

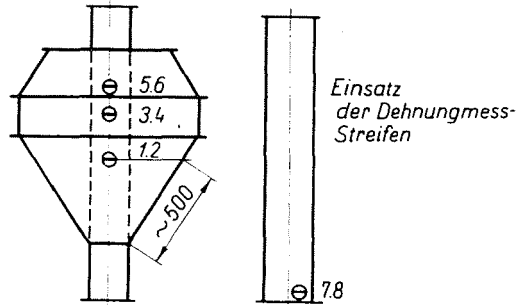


Abb. 8

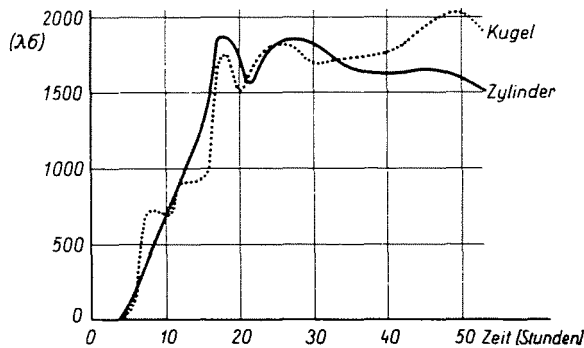


Abb. 9

Wegen der äußerst ungünstigen Meßbedingungen, — Feuchtigkeit, niedrige Temperatur, große Entfernung zwischen Instrument und Modell, ungünstige Ableseverhältnisse, mehrtägige Meßserien — können aus den Ergebnissen nur qualitative Folgerungen gezogen werden. Die Absolutewerte der auftretenden Spannungen entsprechen — hauptsächlich wegen der unzuverlässigen Kalibration infolge von Feuchtigkeit — nicht der Wirklichkeit. Der Charakter der Beziehung $\sigma = f(\text{Zeit})$ ist hingegen wirklichkeitstreu, da sie nicht von der Kalibration abhängig ist. Daher können — die gemessenen Spannungswerte durch $\lambda\sigma$ bezeichnet — die in Wirklichkeit auftretenden Spannungen in Kenntnis von λ bestimmt werden. Stimmt der Charakter der zeitlichen Änderungen der aus Messungen und Berechnungen ermittelten Spannungen überein ist λ auf Grund der Berechnungen anzusetzen, das heißt, die Berechnung darf als zuverlässig betrachtet werden.

Die Dehnungsmessstreifen wurden nach Abb. 8 angeordnet. Der Temperatureausgleich wurde mit Hilfe von in den Versuchplatz gesetzten Dehnungsmessstreifen ausgeführt. Zur Ablesung diente eine auf Dehnung kalibrierte Messbrücke. Nach Mittelbildung sind die $\lambda\sigma = f(\text{Zeit})$ -Kurven in Abb. 9 dargestellt.

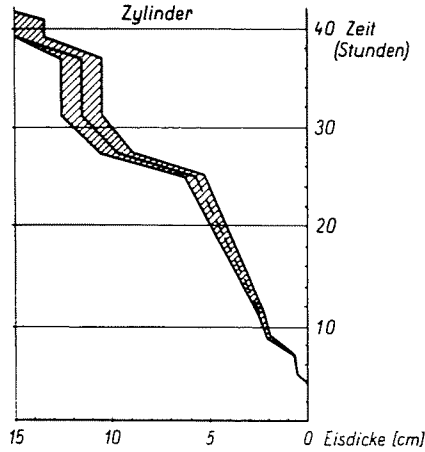


Abb. 10

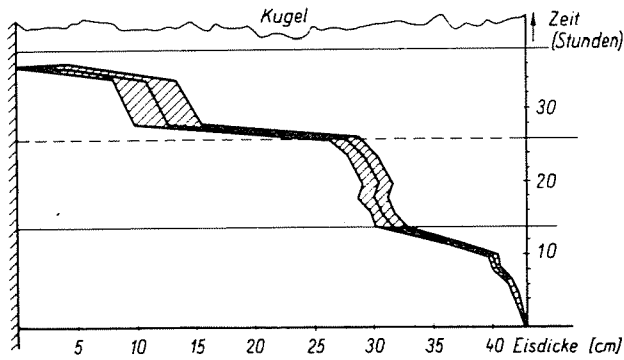


Abb. 11

3. Vergleich der Berechnungen und der Messungen

Es ergab sich aus den Berechnungen daß das Eis im Zylinder bei etwa 5 bis 6 cm Dicke brechen muß. *Abbildung 10* zeigt, daß im Diagramm der zeitlichen Änderung der Eisdicke bei diesem Wert ein Knickpunkt zu beobachten ist, der unbedingt auf Bruch deutet. Vergleicht man andererseits in den *Abbildungen 9* und *10* die zeitlichen Änderungen der Eisdicke und der Spannung, ist zu sehen, daß der Knickpunkt im Dickediagramm und die erste Spitze der Spannungskurve ungefähr zusammenfallen was mit der Beobachtung übereinstimmt, daß beim Bruch der Eisschicht die Behälterwand entlastet wird.

Wird nun die Kugel in ähnlicher Weise untersucht kann aus *Abb. 11* festgestellt werden, daß der Bruch bei etwa 10 cm Eisdicke eintritt, was mit dem

Tabelle 5
Spannungen in kp/cm^2

Eisdicke t_f (cm)	Geteilte Belastung P , (kp/cm^2)	Spannung un- Behälter σ	Stelle	Spannungen im Eis (Kugel)									
				Unregelmäßige Temperaturverteilung		Auf Grund geteil- ter Belastung		Resultierende		Hauptspannungen			Gleichwertige σ_{red}
				σ_r	σ_t	σ_r	σ_t	σ_r	σ_t	σ_1	σ_2	σ_3	
15	5,94	1670	Außenradius	0	-109,6	-5,94	-45,2	-5,94	-154,8	-5,94	-154,8	-154,8	60,66
			Innenradius	0	112	0	-48,2	0	63,8	63,8	63,8	0	63,8
25	8,3	2330	Außenradius	0	-82,3	-8,3	-38,8	-8,3	-121,1	-8,3	-121,1	-121,1	43,8
			Innenradius	0	147	0	-43	0	104	104	104	0	104

Berechneten Wert von 9—10 cm gut übereinstimmt. Im Diagramm der zeitlichen Änderung der Eisdicke ist noch ein Knickpunkt bei etwa 3 cm zu finden. In Abbildung 9 ist zu sehen, daß in den diesen beiden Dicken entsprechenden Zeitpunkten die Behälterwand vorübergehend entlastet wurde, was eine Folge des Bruches im Eis war.

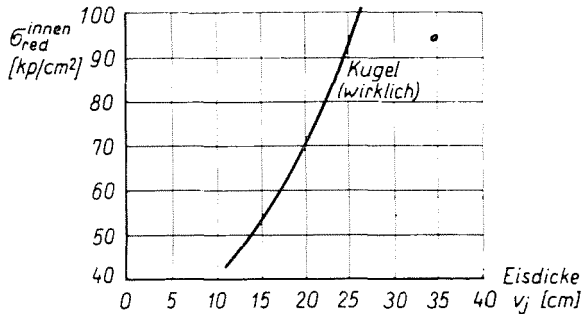


Abb. 12

Folgerungen

Aus der Untersuchung des Modells ergibt sich daß bei den gegebenen Abmessungsverhältnissen die Kugel gefährlicher ist; in der Kugelwand ist der Spannungszustand beim Knacken des Eises ungünstiger. Deshalb wurden für den Kugelteil eines ausgeführten Objekts mit den schon früher angewandten Daten und mit entsprechenden geometrischen Maßen spezielle Berechnungen unternommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 und Abb. 12 gezeigt. Aus der Abbildung ist es sichtbar, daß das Knacken des Eises bei einer Dicke von ungefähr 17 bis 18 cm zu erwarten ist und es treten dann nach den Berechnungen in Behälter, Spannungen von 1700 kp/cm^2 auf.

Auf Grund der Festigkeitsuntersuchungen kann zusammenfassend folgendes ausgesagt werden:

a) Obwohl der Vorgang recht kompliziert ist und auch durch Berechnungen und Messungen nur approximativ verfolgt werden kann, darf auf Grund der nach kombinierten Methoden unternommenen Untersuchungen doch erklärt werden, daß die Bruchwahrscheinlichkeit in normalen Betrieb klein ist, bis -40°C unterliegt der Behälter keiner Bleibenden verformung durch Einfrieren. Als Ergänzung soll noch folgendes beachtet werden:

b) Es soll unbedingt vermieden werden, daß sich der bei einer gewissen Temperatur gänzlich eingefrorene Behälter wesentlich abkühlt, denn das wird unbedingt zur Zerstörung führen.

c) Der Füllungsgrad soll ermöglichen, die Volumenvergrößerung bei der Wasser-Eisumwandlung genügend Platz im Behälter habe. Demgemäß sind wenigstens 5% des Behältervolumens unaufgefüllt zu lassen.

d) Die Experimente wie auch die Berechnungen beziehen sich auf eine gegebene Wassersorte. Da die Kennwerte des Eises von der Zusammensetzung des Wassers abhängig sind, sollen die Untersuchungen in konkretem Falle, mit der örtlichen Wassersorte wiederholt werden.

e) Die Untersuchungsergebnisse sind bis -40°C gültig. Über diesen Temperaturwert hinaus können die Ergebnisse nach besonderer Überlegung extrapoliert werden.

f) Im Falle eines bei niedriger Temperatur eingesetzten Hydroglobus sind die sorgfältige Materialprüfung sowie die Fertigungstechnologie besonders wichtig.

Zusammenfassung

Die Festigkeitsuntersuchung bei niedriger Temperatur eingesetzter Hydroglobusse wurde nach einer kombinierte Methode durchgeführt: Berechnungen mit Hilfe eines prinzipiellen Modells, Dehnungs- und Ultraschallmessungen an einem verkleinerten Modell. Auf Grund des obigen darf erklärt werden, daß die Bruchwahrscheinlichkeit im normalen Betrieb klein, bis -40°C praktisch gleich Null ist.

Literatur

1. PONOMARIOW, S. D.: Festigkeitsberechnungen im Maschinenbau (Szilárdsági számítások a gépészetben) 3. Band. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.
2. ROARK, R. J.: Formulas for Stress and Strain McGraw-Hill Book Company, Inc., New York und London, 1943.
3. PATTANTYUS: Handbuch der Maschinen- und Elektroingenieure (Gépész- és Villamosmérnökök Kézikönyve). 2. Band. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1961.
4. PLANK, R.: Handbuch der Kältetechnik. 12. Band. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1967.
5. PRESCOTT, J.: Applied Elasticity. Dover Publications, New York, 1946.
6. SZEKERES, A.: Strength Analysis of Thick-Walled Spheres in Spheroid Symmetrical Thermal State. Periodica Polytechnica, Vol. 17. No. 1., 1973.

Dr. András SZEKERES, H-1521 Budapest

Printed in Hungary

A kiadásért felel az Akadémiai Kiadó igazgatója. Műszaki szerkesztő: Botyánszky Pál
A kézirat nyomdába érkezett: 1979. II. 21. Terjedelem: 9 (A 5) iv. 55 ábra

80.6862. Akadémiai Nyomda, Budapest — Felelős vezető: Bernát György