

Nikulín, V.I.

WIRKUNG DER WINDBELASTUNG AUF LUFTGESTÜTZTE KUGELFÖRMIGE  
MEMBRANSCHALEN

Deutsche Übersetzung aus:

Soobščeniya, Laboratorija mjagkich oboloček.  
Vladivostok, 12 (1970), S. 112 - 127.

Russ.: ДЕЙСТВИЕ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА ВОЗДУХО-  
ОПОРНЫЕ СФЕРИЧЕСКИЕ ОБОЛОЧКИ  
Dejstvie vetrovoj nagruzki na vozduchoopornye  
sferičeskie oboločki.

Die Windbelastung ist eine der Hauptbelastungen und gefährlichsten Einwirkungen auf luftgestützte Bauwerke. Bei starkem Wind stellt man an einigen Gebäuden eine Zerstörung der Gesamtstabilität fest; an der Oberfläche der Membranschale bilden sich Falten, die ganze Konstruktion schwankt; teilweise werden auch die Verankerungen herausgerissen, was zu einer Zerstörung der Membranschale führt. Gegenwärtig wird die Windbelastung auf luftgestützte Membranschalen meist nach den "Provisorischen Richtlinien zur Planung von Bauwerken unter Verwendung von Kunststoffen" (Zentrales wissenschaftliches Forschungsinstitut für Baukonstruktionen, Moskau, 1966)<sup>1)</sup> berechnet. Dabei bleiben folgende Fragen ungeklärt: ist beim Betrieb eine Windgeschwindigkeit mit einem Druck  $q_w$ , der größer ist als der innere Überdruck  $p_0$ , zulässig; wie verhält sich das Bauwerk dabei; welche Kräfte werden bei Wind auf die

1) "Временным указаниям по проектированию строительных конструкций с применением пластмасс" (ЦНИИСК, Москва, 1966 г.).

"Vremennye ukazaniya po proektirovaniju stroitel'nych konstrukcij s primeneniem plastmass."  
Moskva: S[entral'nyj] N[aučno-]I[ssledovatel'skij] I[nstitut] S[troitel'nych] K[onstrukcij], 1966. - (Anm. d. Übers.)

Verankerung übertragen, und ist die Faltenbildung keine Gefährdung für die Werkstofffestigkeit? Von Interesse ist die Bestimmung der Grenzwerte der Relationen  $\psi_{\text{grenz}} = q_w/p_o$ , bei denen eine kugelförmige Membranschale an Stabilität verliert, wobei sich ein Bereich mit Falten bildet; genauso interessant sind die Werte  $\psi_{\text{schw}}$ , bei denen das Bauwerk zu schwingen beginnt.

Um die besagten Fragen beantworten zu können, wurden die unten beschriebenen Untersuchungen durchgeführt.

1. Bestimmung der Winddruckfigur. Diese wurde ursprünglich in einem Windkanal an starren, mit Entwässerungsrinnen versehenen Modellen bei den Reynolds-Zahlen von  $Re = 5,2 \cdot 10^5$  bis  $9,2 \cdot 10^5$  durchgeführt. Dabei blieb die Umströmung modellspezifisch, wodurch sich die Re-Werte nicht berücksichtigen lassen, wenn man das Modell auf die natürlichen Verhältnisse übertragen will. In Abb. 1 ist die Figur des Winddrucks auf die Oberfläche eines

TABELLE 1

	h/l = 1/6					h/l = 1/8				
	Winkel $\theta^\circ$					Winkel $\theta^\circ$				
	0	11	22	33	37	0	9	18	27	28
0°	-0,75	-0,54	-0,18	-0,02	-0,02	-0,7	-0,48	-0,18	-0,02	-0,01
15°	-0,75	-0,58	-0,22	-0,02	-0,02	-0,7	-0,5	-0,22	-0,02	-0,01
30°	-0,75	-0,62	-0,31	-0,05	-0,02	-0,7	-0,51	-0,28	-0,04	-0,01
45°	-0,75	-0,64	-0,44	-0,15	-0,06	-0,7	-0,54	-0,38	-0,13	-0,07
60°	-0,75	-0,67	-0,54	-0,36	-0,3	-0,7	-0,58	-0,46	-0,3	-0,27
75°	-0,75	-0,68	-0,62	-0,48	-0,42	-0,7	-0,6	-0,5	-0,41	-0,38
90°	-0,75	-0,7	-0,63	-0,5	-0,45	-0,7	-0,62	-0,54	-0,43	-0,41
105°	-0,75	-0,69	-0,61	-0,46	-0,4	-0,7	-0,61	-0,52	-0,42	-0,39
120°	-0,75	-0,68	-0,55	-0,35	-0,31	-0,7	-0,6	-0,48	-0,37	-0,31
135°	-0,75	-0,65	-0,45	-0,16	-0,1	-0,7	-0,57	-0,41	-0,17	-0,09
150°	-0,75	-0,63	-0,36	-0,01	+0,1	-0,7	-0,53	-0,37	-0,08	+0,09
165°	-0,75	-0,59	-0,27	+0,14	+0,27	-0,7	-0,52	-0,33	+0,13	+0,21
180°	-0,75	-0,55	-0,2	+0,25	+0,4	-0,7	-0,51	-0,31	+0,2	+0,3

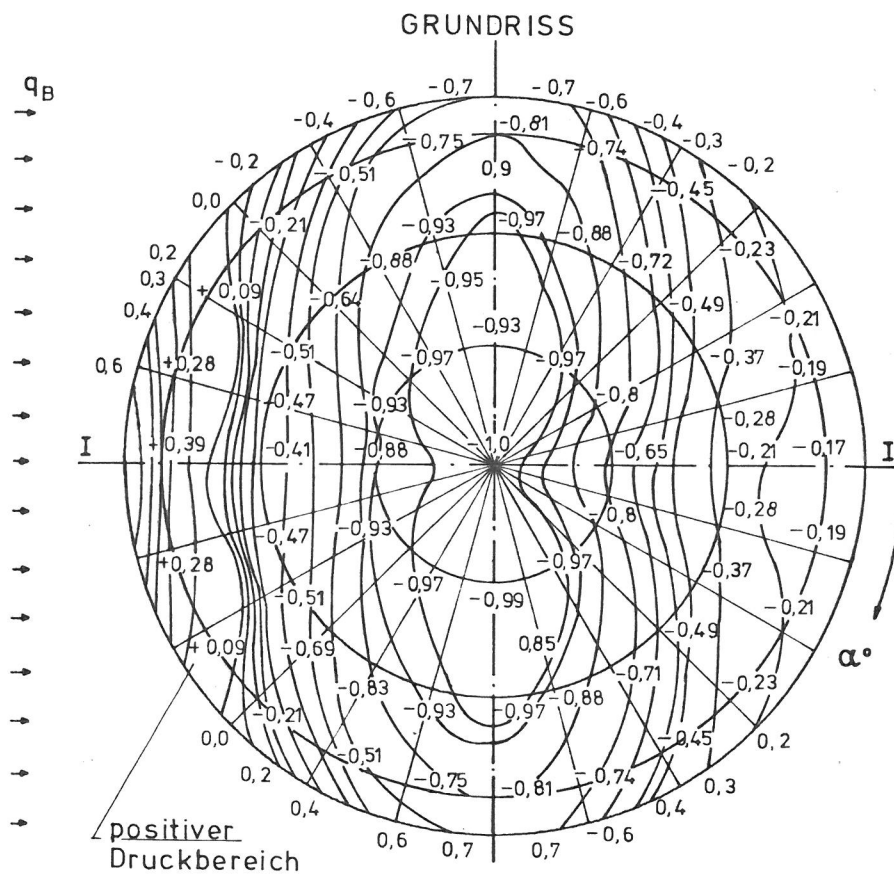
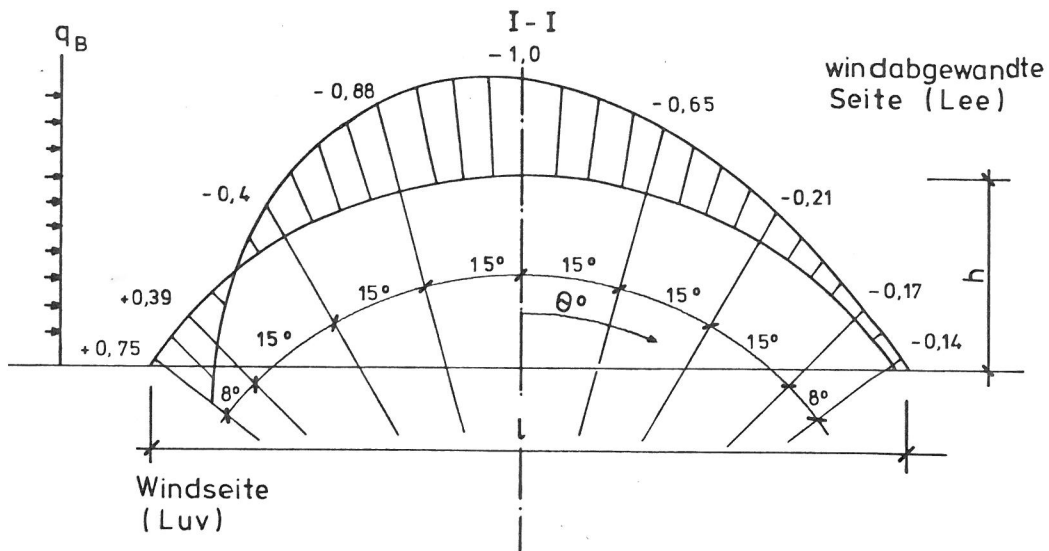


Abb. 1

starrten kugelförmigen Abschnittes mit dem Verhältnis von Höhe zu Sehne  $h/l = 1/4$  dargestellt. Für Abschnitte mit  $h/l = 1/6$  und  $1/8$  sind die Werte der aerodynamischen Koeffizienten  $C = \frac{2p}{\rho v^2}$  in Tab. 1 angegeben.

Die Versuche zeigten, daß Kugelschalen bei Windbelastung im größten Teil ihrer Oberfläche einem negativen Druck (Sog) ausgesetzt sind; positiver Druck wird nur in einem geringen Abschnitt an der Windseite der Membran erzeugt. Den größten Windsog beobachtet man an der Spitze; mit zunehmender Neigung nimmt er ab. Wenn man nachgiebige Modelle, die aus einem Polyäthylenphthalat-(Lawson-)Film von  $12 \cdot 10^{-6}$  m Dicke gefertigt waren, Wind aussetzte, stellte man fest, daß die ermittelten Winddruckfiguren bei Halbkugeln mit  $0 \leq \psi \leq 1,1$  und bei Segmenten mit  $h/l = 1/4 - 1/8$  mit  $0 \leq \psi \leq 1,6$  auf weiche Membranen anwendbar sind.

Der aerodynamische Koeffizient wurde durch die Reihe

$$C = \frac{P_w}{q_w} = a_0 + a_1 \cos \alpha + a_2 \cos 2\alpha + \dots + a_6 \cos 6\alpha$$

approximiert. Die Faktoren  $a_0, a_1, \dots$  stellen eine Fourier-Reihe vom Winkel  $\theta$  dar. Für eine Halbkugel z.B. haben sie die Gestalt

$$a_0 = -0,67 - 0,5 \cos 2\theta - 0,01 \cos 4\theta + 0,003 \cos 6\theta$$

$$a_1 = -0,08 + 0,14 \cos 2\theta - 0,03 \cos 4\theta - 0,03 \cos 6\theta$$

$$a_2 = 0,51 - 0,49 \cos 2\theta - 0,03 \cos 4\theta + 0,008 \cos 6\theta$$

$$a_3 = -0,05 + 0,06 \cos 2\theta - 0,01 \cos 4\theta + 0,001 \cos 6\theta$$

$$a_4 = -0,02 + 0,03 \cos 2\theta - 0,02 \cos 4\theta + 0,005 \cos 6\theta$$

$$a_5 = 0,02 - 0,01 \cos 2\theta + 0,01 \cos 4\theta - 0,02 \cos 6\theta$$

$$a_6 = -0,003 + 0,01 \cos 2\theta - 0,006 \cos 4\theta - 0,001 \cos 6\theta$$

Entsprechende Ausdrücke wurden auch für Abschnitte größerer Höhe ermittelt.

2. Der Spannungszustand der Membranschale unter Einwirkung einer Windbelastung wurde unter den folgenden Annahmen untersucht: der Werkstoff ist inelastisch;  $p_0 > q_w$ ; der Winddruck ist zeitlich und in der Höhe konstant. Dann behält die Membran bis zur Faltenbildung ihre kugelförmige Gestalt und kann nach den bekannten Gleichungen der momentenfreien Theorie berechnet werden.

Wenn man in sie die Zerlegungen für  $p_w$  einsetzt, dann läßt sich für die Meridian- und Ringspannungen in einer windbelasteten kugelförmigen Membranschale ermitteln:

$$\sigma_{pw} = p_0 \psi (A_0 + A_1 \cos \alpha + A_2 \cos 2\alpha + A_3 \cos 3\alpha);$$

$$\sigma_{qw} = p_0 \psi (B_0 + B_1 \cos \alpha + B_2 \cos 2\alpha + B_3 \cos 3\alpha).$$

Die Werte der Koeffizienten für Kugelabschnitte mit  $h/l = 1,4$ ;  $1,6$  und  $1,8$  sind in Tab. 2 wiedergegeben. Für eine Halbkugel ist

$$A_0 = -0,59 - 0, \quad \sin^2 \theta; \quad A_1 = 0,12 \sin^2 \theta - 0,28 \sin^4 \theta + 0,12 \sin^6 \theta;$$

$$A_2 = 0,27 \sin \theta; \quad A_3 = 0; \quad B_1 - \text{in Tabelle 3.}$$

TABELLE 2

$\theta^\circ$	$h/l = 1/4$						$h/l = 1/6$					
	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$B_0$	$B_1$	$B_2$	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$B_0$	$B_1$	$B_2$
0	-0,48	0	0	-0,48	0	0	-0,37	0	0	-0,37	0	0
5	-0,48	0	0	-0,46	0,01	0,02	-0,36	0	0	-0,35	0	0,01
10	-0,47	0,01	0,01	-0,43	0,02	0,04	-0,35	0	0,01	-0,32	0	0,04
15	-0,46	0,02	0,03	-0,40	0,06	0,09	-0,33	0	0,03	-0,26	0	0,08
20	-0,44	0,03	0,05	-0,35	0,07	0,14	-0,3	0	0,05	-0,19	-0,01	0,13
25	-0,41	0,03	0,07	-0,29	0,06	0,19	-0,27	-0,01	0,07	-0,10	-0,02	0,18
30	-0,39	0,04	0,09	-0,23	0,04	0,22	-0,24	-0,01	0,08	-0,01	-0,03	0,2
35	-0,37	0,04	0,11	-0,16	0,2	0,28	-0,20	-0,01	0,10	0,03	-0,05	0,22
37	-0,36	0,035	0,12	-0,12	-0,01	0,29	-0,19	-0,02	0,11	0,08	-0,06	0,25
40	-0,35	0,03	0,13	-0,08	-0,04	0,3						
50	-0,30	0,02	0,16	0,07	-0,20	0,34						
53	-0,27	0	0,17	0,13	-0,26	0,34	$A_3 = B_3 = 0$					

$h/l = 1/8$								
$\theta$	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$B_0$	$B_1$	$B_2$	$B_3$
$0^\circ$	-0,34	-0,01	0	-0,01	-0,35	-0,01	0	0,01
$5^\circ$	-0,33	-0,01	0	-0,01	-0,3	-0,01	0,02	-0,01
$10^\circ$	-0,32	-0,01	0,01	-0,01	-0,25	-0,02	0,04	-0,02
$15^\circ$	-0,29	-0,01	0,03	-0,02	-0,17	-0,03	0,08	-0,03
$20^\circ$	-0,26	-0,02	0,05	-0,02	-0,07	-0,04	0,13	-0,03
$25^\circ$	-0,22	-0,02	0,07	-0,03	-0,01	-0,05	0,17	-0,04
$28^\circ$	-0,19	-0,02	0,08	-0,03	+0,08	-0,05	0,21	-0,02

TABELLE 3

Koeffi - zienten	Winkel $\Theta$						
	0	15	30	45	60	75	90
$B_0$	-0,58	-0,53	-0,40	-0,2	-0,01	0,11	0,15
$B_1$	0	0,02	0,02	-0,06	-0,16	-0,18	-0,19
$B_2$	0	0,06	0,19	0,40	0,58	0,67	0,70

Die Werte  $\sigma_{p_{\text{Wind}}}$  und  $\sigma_{\theta_{\text{Wind}}}$ , die aus diesen Gleichungen ermittelt wurden, müssen mit den Spannungen  $\sigma_p$  und  $\sigma_{\theta}$ , die sich in der Membranschale bei Wirkung des Überdrucks  $p_0$  bilden, summiert werden. Wenn der Wert  $\sigma_{p_{\text{Wind}}}$  negativ ausfällt, dann wird er zur Spannung  $\sigma_p = 0,5 \tau_p$  addiert, und wenn  $\sigma_{p_{\text{Wind}}}$  positiv ist, wird er von  $\sigma_p$  subtrahiert.

Die Berechnungen ergaben, daß die Meridianspannungen bei Windbelastung in allen Querschnitten der von uns untersuchten Kugelschalen Zugspannungen sind und mit den Spannungen summiert werden, die aufgrund des inneren Überdrucks im Werkstoff entstehen.

Die Ringspannungen  $\sigma_{\theta}$  in der Membranschale können auch Druckspannungen sein. Infolgedessen kann sich ergeben, daß die vorhergehende Dehnung in einigen Querschnitten der Membranschale nachläßt, und daß sich an diesen Stellen Falten in Form von "Winddellen" bilden. Der Faltenbereich zeichnet sich durch einen homogenen Spannungszustand aus; in ihm ist  $\sigma_p > 0$ ,  $\sigma_{\theta} = 0$ ; außerdem liegen die Falten in Meridianrichtung der Membranschale.

Die erste Falte tritt am Fundament der Membran an der Windseite auf und zwar in dem Bereich, wo der größte positive Winddruck vorherrscht. Je nach Zunahme von  $\psi = \frac{q_w}{p_0}$  wird der Faltenbereich größer und dehnt sich immer mehr nach oben aus. Die Größe  $\psi_{\text{grenz}}$ , bei der die Faltenbildung beginnt, ermittelt man mit Hilfe der Gleichung

$$0,5 \tau p_0 - \sigma_{\theta_{\text{wind}}} = 0 .$$

Daraus erhalten wir für die Halbkugel  $\psi_{\text{grenz}} \approx 0,48$ ; für Abschnitte mit  $h/l = 1/4$  0,68;  $h/l = 1/6$  1,28;  $h/l = 1/8$  1,39.

Hinsichtlich der Aerodynamik sind flache nachgiebige Kuppeln stabiler als hohe; sie können auch einem größerem Windgeschwindigkeitsgefälle standhalten, wenn in ihnen der gleiche Überdruck herrscht wie in einer Halbkugel.

Die für die Werkstofffestigkeit gefährlichsten Meridian- und Ringspannungen treten an der Membranspitze in den Querschnitten mit einer zur Luftströmung senkrechten Fläche auf, d.h. dort, wo der größte Windsog vorkommt. Hier gilt

$$\sigma_p = \sigma_\theta = \sigma_m = (0,5 + d\psi) \cdot \tau p_0.$$

Für den Faktor  $d$  gilt: bei einer Halbkugel 0,60; bei Abschnitten mit  $h/l = 1/4$  0,50;  $h/l = 1/6$  0,37;  $h/l = 1/8$  0,35.

Am Membranenfundament treten im gleichen Querschnitt etwas geringere Spannungen auf:

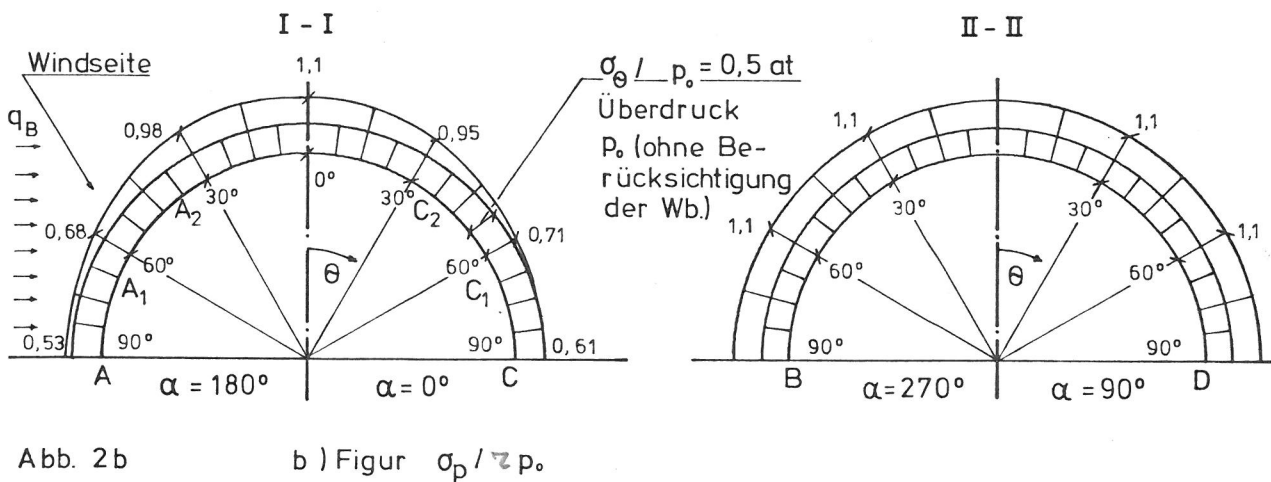
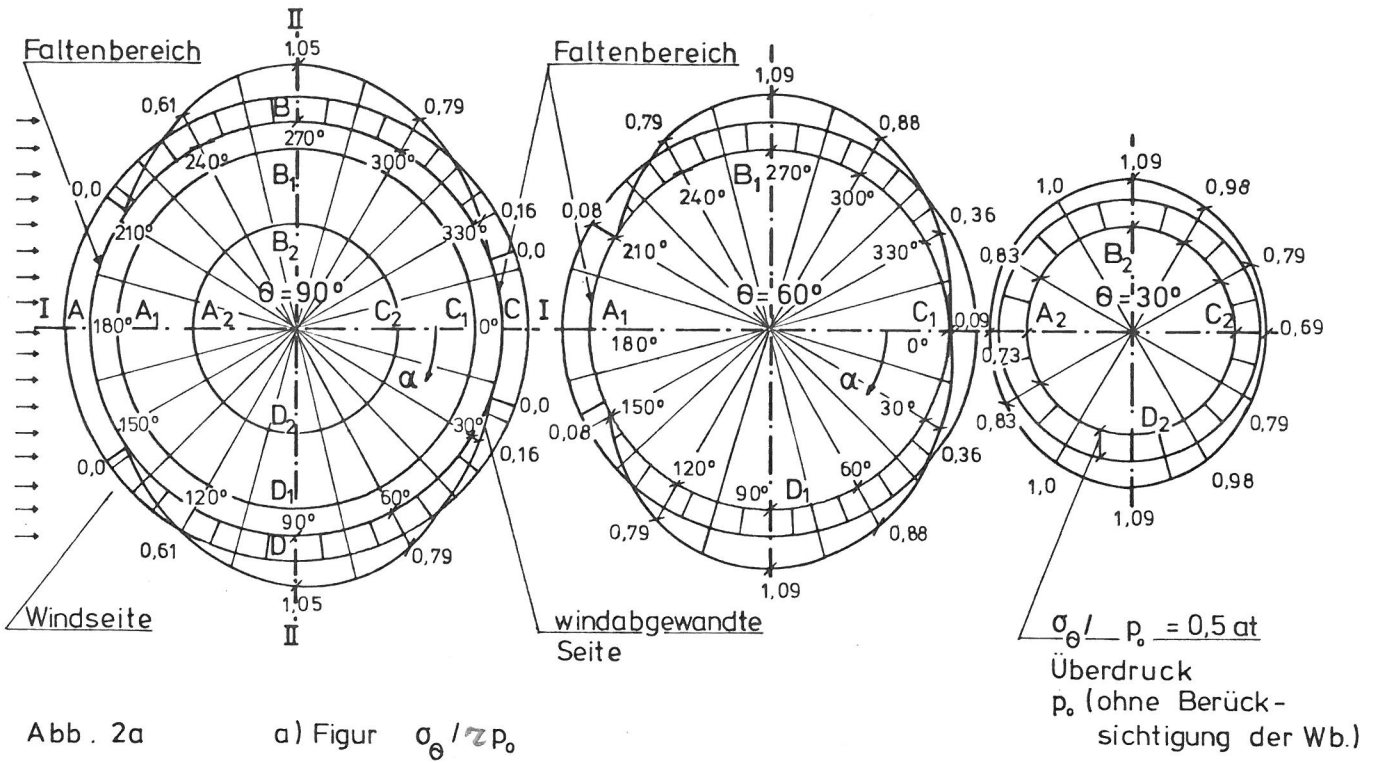
$$\sigma_p = (0,5 + e\psi) \cdot \tau p_0,$$

$$\sigma_\theta = (0,5 + f\psi) \cdot \tau p_0.$$

Für die Halbkugel ist  $e = 0,60$ ,  $f = 0,55$ ; für Abschnitte jeweils bei  $h/l = 1/4$  0,44 und 0,21; bei  $h/l = 1/6$  0,30 und 0,16; bei  $h/l = 1/8$  0,27 und 0,13.

Die charakteristischen Figuren der Meridian- und Ringspannungen in einer Halbkugelschale bei  $\psi = 1,0$  sind in den Abb. 2a und 2b dargestellt.

3. Die Experimente an nachgiebigen Modellen im Windkanal zeigten, daß die Membranschale bei geringen Werten  $\psi \leq 0,1 - 0,3$  ihre geplante Form sicher beibehält und keine Falten bekommt. Bei abneh-



mendem Innendruck und konstanter Windgeschwindigkeit ( $\psi > 0,3$ ) bildet sich auf der Windseite der Membrane zuerst eine kleine Falte, die dann zu einem Faltenbereich, der "Winddelle" wird. Bei weiter abnehmendem  $p_0$  wird der Faltenbereich größer, und die Membranschale wird in diesem Bereich nach innen durchgebogen. Außerhalb des Faltenbereichs behält die Membranschale ihre Kugelform;



insgesamt ist die ganze Konstruktion stabil, und man stellt keine Schwingungen der Membranschale fest.

Wenn der Faltenbereich groß wird, beginnt die ganze Membranschale zu schwingen. Es tritt die Gefahr eines Bruchs des Werkstoffs und der Verankerung ein. Die Schwingungen der Schale verlaufen in Richtung der Luftströmung und werden je nach Zunahme des Faltenbereiches stärker. Die Schwingungsdauer und -amplitude hängt von der Schalenform, der Geschwindigkeit der Luftströmung und den Abmessungen des Faltenbereichs ab. Die Schwingungen hören erst dann auf, wenn ein Teil der Membranschale während einer Volumenabnahme auf das Fundament sinkt und sich an die heranströmende Luft anpreßt. Bei höherer Windgeschwindigkeit fängt das Bauwerk etwas früher zu schwingen an als bei geringen Windgeschwindigkeiten. Flache Modelle begannen später zu schwingen als hohe.

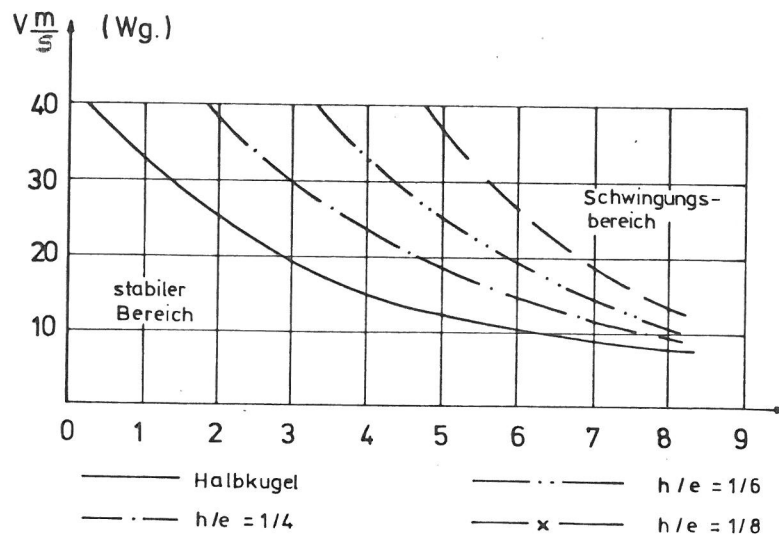


Abb. 3. Experimentelle Graphik der Abhängigkeit  $\psi_{schw} = f(V, h/e)$  für lg. e Kugelschalen.

In Abb. 3 sind die experimentell ermittelten Werte der Abhängigkeit  $\psi_{schw} = f(v, h/l)$  graphisch dargestellt. Sie bestimmen den stabilen Bereich und den Schwingungsbereich der Membranschale in der Luftströmung.

Wenn man die in der Schale eingeschlossene Luftmenge auf 15 - 30 % von der geplanten verringert, stellt man kurze Knalllaute fest,

die von wellenförmigen Bewegungen des Werkstoffs und einer dynamischen Belastung des Bauwerks begleitet werden.

Bei hoher Windgeschwindigkeit wird das Knallen stärker; auch verstärkt sich die Gefahr eines Bruchs der Schale. Nachdem die Schale mit etwas mehr Luft gefüllt worden war, hörte das Knallen auf, und das gesamte Bauwerk nahm trotz des stark verformten Faltenbereichs auf der Windseite wieder eine stabile Form an. Bei weiterem Füllen der Schale mit Luft begann sie wieder zu schwingen; diese Schwingungen klangen kontinuierlich ab infolge Abnahme des Faltenbereichs.

Im Windkanal bekamen alle untersuchten Modelle etwas früher Windfalten als rechnerisch festgestellt. Dies läßt sich durch Ungenauigkeiten bei der Herstellung der Modelle erklären.

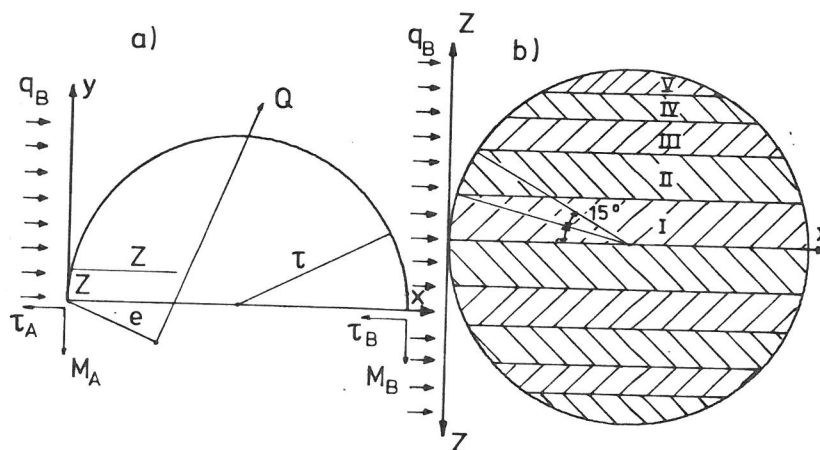


Abb. 4. Zur Berechnung der Kräfte in den Kugelschalen bei Wind.

Die Bildung eines kleinen Faltenbereichs auf der biegeweichen Kugelschale hat man als zweiten Grenzzustand des luftgestützten Bauwerks anzusehen. Die Faltenbildung hat keine zerstörenden Spannungen für das Gewebe der Membranschale oder ihre Verankerung zur Folge. Immerhin aber verändern die Falten die geplante Schalenform, und ihre Windseite erfährt dabei eine geringe Verlagerung nach innen, was bei Benutzung nicht zulässig sein darf.

Die Schwingungen der Membranschale hat man als ersten Grenzzustand des luftgestützten Bauwerks anzusehen. Bei Schwingungen

verliert die Schale letzten Endes jede Möglichkeit einer sicheren und stabilen Lastabtragung.

Bei Windbelastung auf eine luftgestützte Membranschale wirken ein: der Auftrieb  $Y$ , der Stirnwiderstand  $X$  und das Kippmoment  $M_z$  (Abb. 4a). Wenn man deren Größe kennt, kann man die Belastung auf die Verankerung bei Wind abschätzen.

Wir benutzen das Winddruckbild für eine Halbkugel aus SNIP-II-A. 11-62<sup>2)</sup> und die Versuchsangaben und ermittelten die Werte der aerodynamischen Kräfte  $Y$ ,  $X$  und  $M_z$  für Kugelschalen bei Windbelastung in der Form

$$Y = C_y \frac{1}{2} \rho v^2 z^2; \quad X = C_x \frac{1}{2} \rho v^2 z^2; \quad M = C_m \frac{1}{2} \rho v^2 z^2.$$

Die Werte der dimensionslosen Koeffizienten sind in Tab. 4 enthalten.

TABELLE 4

Koeffi- zienten	h / l			
	1/2	1/4	1/6	1/8
$C_y$	2,1	1,03	0,43	0,24
$C_x$	0,18	0,04	0,01	0,002
$C_m$	1,76	0,74	0,23	0,1

Wenn man die auf die Membranschale einwirkenden aerodynamischen Kräfte kennt, kann man die Belastungen bestimmen, die auf die Verankerungen übertragen werden. Für diesen Zweck haben wir die Schale parallel zur X-Achse in einige Bereiche eingeteilt (Abb. 4b) und für jeden Bereich nach der Druckfigur die aerodynamischen Kräfte  $X$ ,  $Y$  und  $M_z$  bestimmt; danach ermittelten wir nach den Gleichungen

$$e = \frac{M_x}{Q} \quad \text{und} \quad Z_1 = \frac{e}{\sin \varphi}$$

<sup>2)</sup> SNIP-II-A.11-62 - Stroitel'nye normy i pravila "Nagruzki i vozdejstvija. Normy proektirovanija" (Bau normen und Bauvorschriften "Belastungen und Einwirkungen. Planungsnormen") (Anm.d.Übers.).

die Größe  $e$  und  $Z_1$ . Die Berechnungen wurden für eine Hälfte der Schalenoberfläche durchgeführt, die in 5 Bereiche eingeteilt wurde. In der Annahme, daß die in jedem Bereich auftretenden aerodynamischen Kräfte nur von den Verankerungen des jeweiligen Bereichs aufgenommen werden, reduzieren wir die Aufgabe der Bestimmung der Verankerungsbelastungen in jedem Bereich auf die Bestimmung der Auflagerkräfte  $H_A$ ,  $\tau_A$ ,  $H_B$ ,  $\tau_B$  des in Abb. 4a dargestellten Systems. Die vertikalen Kräfte  $H_A$  und  $H_B$  bestimmen sich aus den Bedingungen  $\sum M_A = 0$  und  $\sum Y = 0$ .

Da die Horizontalkräfte  $\tau_A$  und  $\tau_B$  den Stirnwiderstand  $X$  ausgleichen und das Verhältnis ihrer Beträge unbekannt ist, wurde angenommen: die Einwirkung der Kräfte  $\tau_A$  und  $\tau_B$  wird ersetzt durch die Einwirkung einer Kraft  $\tau$ , die von der Windseite der Membranschale an der Stelle angreift, wo die größten Vertikalkräfte  $H$  wirken.

Zur Bestimmung der Ankerkräfte pro laufenden Meter des Fundamentumfangs der Membranschale wurde angenommen, daß die Kräfte  $H_A$ ,  $H_B$  und  $\tau_A$ ,  $\tau_B$  des abgetrennten Bereiches innerhalb des untersuchten Bereiches gleichmäßig über den Umfang verteilt sind.

TABELLE 5

Belastung der Veran- kerungen	$h/l = 1/2$ $0 \leq \psi \leq 1,1$	$h/l = 1/4$ $0 \leq \psi \leq 1,6$	$h/l = 1/6$ $0 \leq \psi \leq 1,6$	$h/l = 1/8$ $0 \leq \psi \leq 1,6$
$H/\tau p_0$	$0,5 + 0,58\psi$	$0,4 + 0,4\psi$	$0,3 + 0,23\psi$	$0,24 + 0,15\psi$
$\tau/\tau p_0$	$0,3\psi$	$0,3 + 0,13\psi$	$0,4 + 0,02\psi$	$0,44\psi$

In Tab. 5 sind die maximalen Werte der laufenden Kräfte auf die Verankerung der Kugelschale bei Windbelastung und innerem Überdruck, die sich von der Windseite her entfalten, enthalten.

#### 4. Vorschlag einer Methode zur Berechnung der Grenzzustände von luftgestützten Kugelschalen bei Windbelastung.

Erster Grenzzustand (nach Festigkeit und ohne Schalenschwingungen). Die größten Zugspannungen  $\sigma_p$  und  $\sigma_\theta$ , die durch Formeln bestimmt werden, müssen kleiner sein als die rechnerische Festigkeit des Schalenwerkstoffs für Kette und Schuß:  $\sigma_p$  oder  $\sigma_\theta \leq R_{\text{Kette}}$ ,  $R_{\text{Schuß}}$ .

Der innere Überdruck in der Membranschale muß der Bedingung  $p_{o \text{ min}} > q_w / \psi_{\text{schw}}$  entsprechen, wobei die Werte  $\psi_{\text{schw}}$  nach Abb. 3 bestimmt werden.

Wenn  $p_o < p_{\text{min}} = \frac{q_w}{\psi_{\text{schw}}}$  ist, dann kommt es im gesamten Bauwerk zu Schwingungen, die für die Festigkeit des Werkstoffs und der Verankerung gefährlich sind. Bei derartigen Schwingungen kann das Bauwerk seine lastabtragende Funktion nicht erfüllen.

Die Spannungen  $\sigma_p$  und  $\sigma_\theta$  nach den Formeln müssen für die beim Betrieb größtmöglichen Werte  $\psi$  überprüft werden, die jedoch nicht größer sein dürfen als die in Abb. 3 angegebenen Werte  $\psi_{\text{schw}}$ .

Zweiter Grenzzustand (nach den Bedingungen der Faltenbildung). Der innere Überdruck  $p_o$  darf nicht unter  $p_{o \text{ grenz}}$  liegen, bei dem sich auf der Windseite der Membranschale ein Faltenbereich bildet. Für die Halbkugel gilt:  $p_o / q_w \geq p_{o \text{ grenz}} / q_w = 2,1$ ; für Kugelabschnitte: 1,5 bei  $h/l = 1/4$ ; 0,8 bei  $h/l = 1,6$ ; 0,7 bei  $h/l = 1/8$ .

Eine kurze Druckverminderung  $p_o < p_{o \text{ grenz}}$  ist nur dann zulässig, wenn dies nach den Betriebsbedingungen des Bauwerks möglich ist. Dabei muß jedoch immer die Bedingung  $p_o > p_{o \text{ min}}$  erfüllt sein, um zu vermeiden, daß es zu allgemeinen Schwingungen der Schale kommt.

Wenn  $\psi_{\text{grenz}} \leq \psi < \psi_{\text{schw.}}$ , dann hat die Faltenbildung keine zerstörenden Spannungen für das Schalengewebe oder ihre Verankerung zur Folge, doch ist sie in ständigen Bauwerken unzulässig, da durch Falten die Schalenform verändert wird, und die Falten eine unausweichliche Voraussetzung dafür sind, daß das Bauwerk zu schwingen beginnt.

Damit es nicht dazu kommt, daß die Schale beim Füllen mit Luft unter Windlast knallt, sollte die Montage nach Möglichkeit bei Windstille durchgeführt werden. Wenn die Montage unbedingt bei Wind durchgeführt werden muß, dann muß das Bauwerk schnell gefüllt werden, wobei zusätzliche Gebläse zu verwenden sind.

---

Stuttgart, den 30. Juli 1979

übersetzt von

*Ottmar Pertschi*  
(Ottmar Pertschi)  
Dipl.-Übersetzer

Anmerkung des Übersetzers

Da der Originaltext sehr schlecht ist, kann nicht ausgeschlossen werden, daß die von Herrn Dipl.-Ing. S. Greiner, Institut für Massivbau der Universität Stuttgart nachgerechneten Gleichungen und Tabellen nicht mit dem Original übereinstimmen. Für die im Original sehr schlecht wiedergegebenen Abbildungen wurden vom Institut für Massivbau neue Zeichnungen hergestellt.

O.P.