

Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht

Band: 9 (1972)

Rubrik: Theme IIIc: Thin-walled metal shells

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

III c

Coques métalliques

Stahl- und Leichtmetallschalen

Thin-Walled Metal Shells

Leere Seite
Blank page
Page vide

DISCUSSION LIBRE • FREIE DISKUSSION • FREE DISCUSSION

Rechnergestützte Querschnittsoptimierung von Sandwichfaltwerken

Research by Computer of the Optimum Section of Prismatic Sandwich Shells

Recherche de la section optimale des coques prismatiques en "sandwich" au moyen de l'ordinateur

BERT HOFMANN

Wiss. Assistent
am Institut für Konstruktiven
Ingenieurbau der Ruhr-Universität
Bochum, BRD

Anknüpfend an den Beitrag von Prof. Jungbluth, der am Fall der Sandwichkuppel in Hannover die Brauchbarkeit und Vorteile der Stahl-Polyurethan-Sandwichbauweise für den Bau von Flächentragwerken des konstruktiven Ingenieurbaus zeigte, soll in diesem Beitrag über eine rechnergestützte Querschnittsoptimierung von seriengefertigten Sandwichfaltwerken berichtet werden.

Industrialisierte Tragwerke müssen durch ihre Geometrie und konstruktive Ausbildung nicht nur allen statischen Belangen genügen, sie müssen auch einer kontinuierlichen Fertigung in der Fabrik zugänglich sein. Deswegen wurden zunächst doppelt gekrümmte Flächentragwerke nicht untersucht, weil sich deren Elemente nicht kontinuierlich, sondern allenfalls im Taktverfahren fertigen lassen. Auch Platten mit ebenen Deckblechen mußten aus den Betrachtungen ausscheiden, da bei ihnen die Kernschicht aus Polyurethanhartschaum auf Schub beansprucht wird. Dies führt wegen des starken Lastkriechens des Schaumes zu unzulässigen Schubverformungen.

Einfach gekrümmte oder gefaltete Tragwerke jedoch sind kontinuierlich herstellbar, außerdem wird bei ihnen der Kern weitgehend von seiner Beanspruchung auf Schub entlastet. Aufgabe der Kernschicht ist es vielmehr, die tragenden Deckschichten vor Instabilitätsversagen zu schützen.

Folgerichtig wurde beim Entwurf weitgespannter Flächentragwerke in Sandwichbauweise daher folgender Weg eingeschlagen:

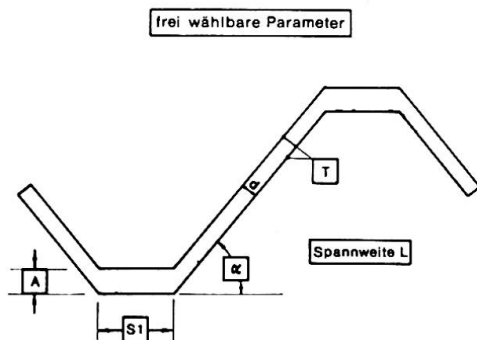
1. prismatische oder tonnenförmige Profilierung von zwei verzinkten, kunststoffbeschichteten Stahlfeinblechen zur Erzeugung einer hinreichend großen Eigenbiege- und Eigenschubsteifigkeit.
2. Ausschäumen des Zwischenraumes zwischen den beiden Blechen zur Erzielung einer hinreichend großen aufnehmbaren Druckspannung in den Blechen durch Verhinderung besonders der örtlichen Instabilitäten der Bleche. (s. Plantema [1])

Aus der Vielfalt der Variablenbereiche - Form, Werkstoffe, konstruktive Ausbildung - galt es, eine optimale Geometrie für faltwerkartige Dachtragwerke zu ermitteln. Als optimale Geometrie wurde diejenige angesehen, die die geringsten Materialkosten pro m^2 überdeckter Grundrißfläche verursachte. Ferner mußte auch der Einfluß der einzelnen Parameter auf die Änderung der m^2 -Kosten - zumindest in der Nähe des Kostenminimums - untersucht werden, um die Entscheidung über die endgültige und günstigste Formgebung im Einklang mit den Forderungen der Fertigungstechnik treffen zu können.

Einige Parameter waren durch äußere Gegebenheiten nicht variabel, und zwar:

1. Die größte zur Zeit lieferbare Breite von kunststoffbeschichtetem Blech liegt bei 1500 mm. Deshalb müssen Faltwerke größerer Spannweite aus Halbwellen zusammengesetzt werden, wobei die Verbindungsfugen dieser Halbwellenträge vorteilhaft in den Stegen und nicht in den Hoch- bzw. Tiefpunkten der Faltwerke liegen.
2. Auf Ausrundungen der Kanten des Faltwerkes wird aus profiltechnischen Gründen zunächst verzichtet.
3. Das Raumgewicht des Schaumes wird aus schäumtechnischen Gründen zunächst einheitlich mit $\gamma_K = 80 \text{ kp/m}^3$ festgelegt.
4. Die Kerndicken der Stege und die der Gurte sind nicht unabhängig voneinander wählbar, damit die Tragwerkselemente beim Transport stapelbar sind. Nur dann nämlich wird es möglich sein, mit einem einzigen Lkw-Transport bis 500 m^2 Dachfläche zu transportieren. Die Kerndicke sollte außerdem aus Wärmeschutzgründen eine Minimaldicke von 40 mm nicht unterschreiten.

Mit Hilfe eines elektronischen Optimierungsprogrammes wurden daraufhin die übrigen geometrischen Parameter variiert, und zwar:

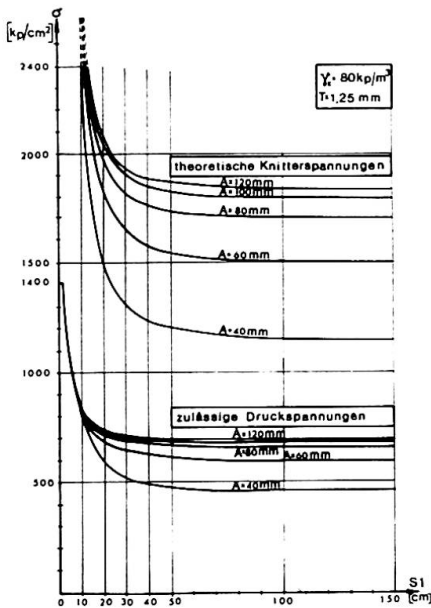


Spannweite L
 Gurtbreite S_1
 Winkel α
 Blechdicke T
 Kerndicke A

gebundene Parameter

Parameter	Größe	Grund
abgewinkelte Breite der Stahlbleche	1500 mm	Kunststoffbeschichtung
Ausrundung der Faltwerksecken	0	Profilieretechnik
Raumgewicht des PUR-Hartschaumes	80 kg/m^3	Schäumtechnik
Kerndicke der Stege	$\geq 40 \text{ mm}$	Wärmeschutz
	$d \cdot A \cos \alpha$	Stapelbarkeit

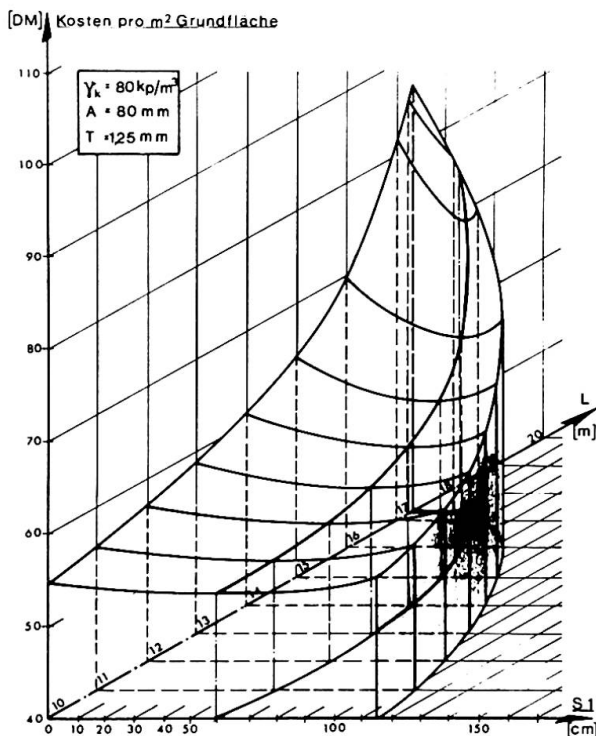
variable und nicht variable Parameter
 zur Formfindung
 von Faltwerken in FE-PUR Sandwichtechnik



Dabei wurde bei allen errechneten Geometrien stets die Bedingung erfüllt, daß die errechneten maximalen Blechspannungen ausreichend weit unter den theoretisch ermittelten Knitterspannungen lagen. Die Sicherheit gegen Knittern bewegte sich hierbei zwischen 1,71 und 2,5.

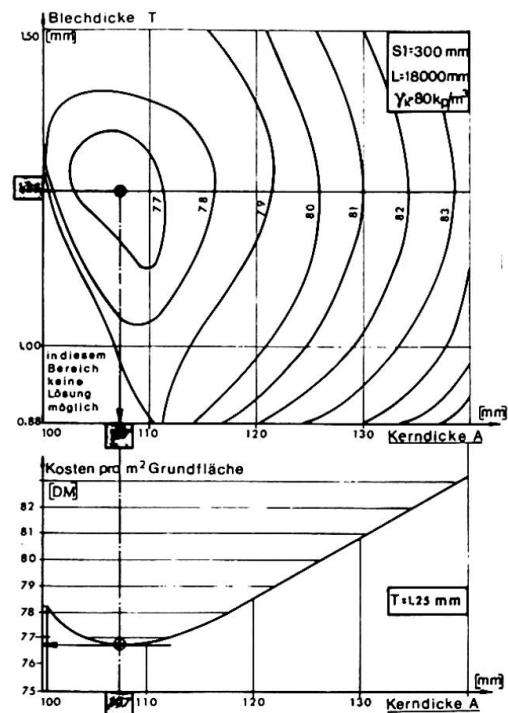
Die Ermittlung der rechnerischen Knitterspannungen erfolgte in Anlehnung an Stamm [27], da die Einflüsse sowohl von S_1 und T als auch von A bzw. D auf die Knitterspannungen bei dem vorliegenden Problem berücksichtigt werden mußten.

Die Ergebnisse derartiger Untersuchungen ließen sich etwa in Form von Kostenlandschaften auftragen. Sie stellen die Abhängigkeit der Kosten von der Gurtbreite S_1 und der Spannweite L dar, wenn man die Blechdicke T und die Kerndicke A konstant hält. In diese Kostenlandschaft eingegraben – gleich einem Wasserlauf im Gebirge – findet sich eine Minimalkostenkurve. Viele solcher Minimalkostenkurven ergeben ein Diagramm, aus dem sich für eine gewählte Spannweite die jeweils kostengünstigste Geometrie ermitteln ließ.



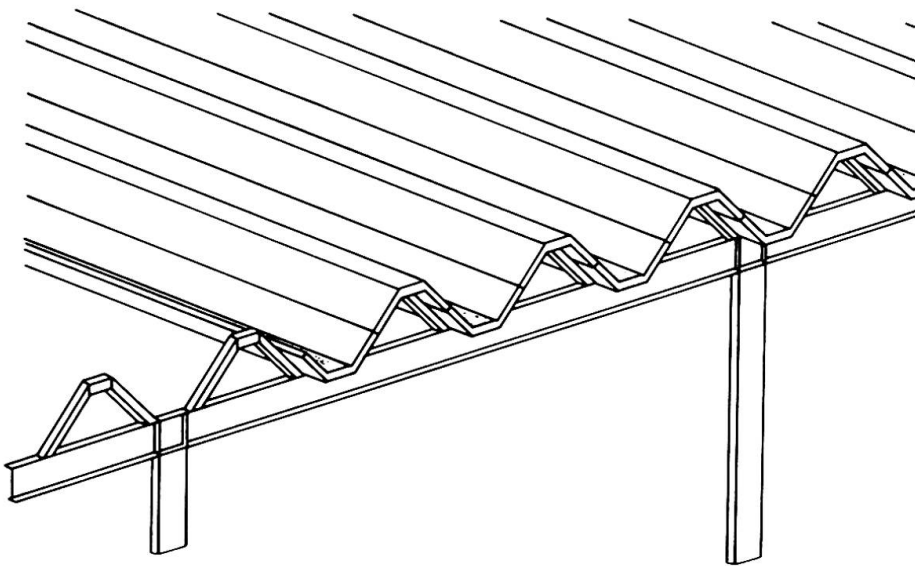
„Kostenlandschaft“

Kosten = $f(S_1, L)$ für γ_k, A und $T = \text{const.}$



optimierte Falterwerksgeometrie
für 18m Spannweite

Da es fertigungstechnisch unsinnig ist, für jede Spannweite ein Falwerk mit der jeweils kostengünstigsten Geometrie herzustellen, zielte die weitere Entwicklung auf ein abgestuftes Programm ab, das aus zwei oder mehr Profiltypen besteht, die dann zu Falwerken für drei oder entsprechend mehr verschiedene Spannweitenbereiche bzw. Belastungen zusammengesetzt werden können. Hinsichtlich der statischen Wirksamkeit und der fertigungstechnischen Gegebenheiten sind Abstufungsmöglichkeiten über die abgewinkelte Breite der Stahlbleche, über die Blechdicke und das Raumgewicht des PUR-Hartschaumes denkbar. Dieses Falwerksprogramm sollte zudem - wenn der durch die Ergebnisse des Optimierungsprogrammes ermittelte Entscheidungsspielraum es erlaubte - in die international vereinbarte Modulordnung eingepaßt werden, um einen standardisierten Ausbau zu ermöglichen.



Die Gesamtheit dieser Forderungen aus Statik und Stand-sicherheit, Fertigung, Transport und Montage führte schließlich zu einer optimierten Geometrie von Profiltypen, mit denen sich vorerst Spannweiten zwischen 10 und 20 m überspannen lassen. Hierbei waren die m^2 -Kosten das entscheidende Kriterium. Die geschilderte Querschnittsoptimierung ist daher Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz dieser neuartigen Dachtragwerke in Stahl-Polyurethan-Sandwichtechnik.

Schrifttum:

- [1] Plantema, F.J.: "Sandwich Constructions", John Wiley & Sons, New York, London, Sydney (1966).
- [2] Stamm, K.: "Berechnung von Knitterspannungen bei ebenen und trapezprofilierten Sandwichplatten", HOESCH-Berichte aus Forschung und Entwicklung unserer Werke, Heft 4/70.

IIIc

Ausgesteifte Hypar-Profilblechschalen

Shells of Stiffened Profiled Sheets of Hyperbolic-Paraboloïd Form

Coques en tôles profilées raidies en forme de paraboloïde hyperbolique

HARALD EGGER

Dr.techn.

Wien, Oesterreich

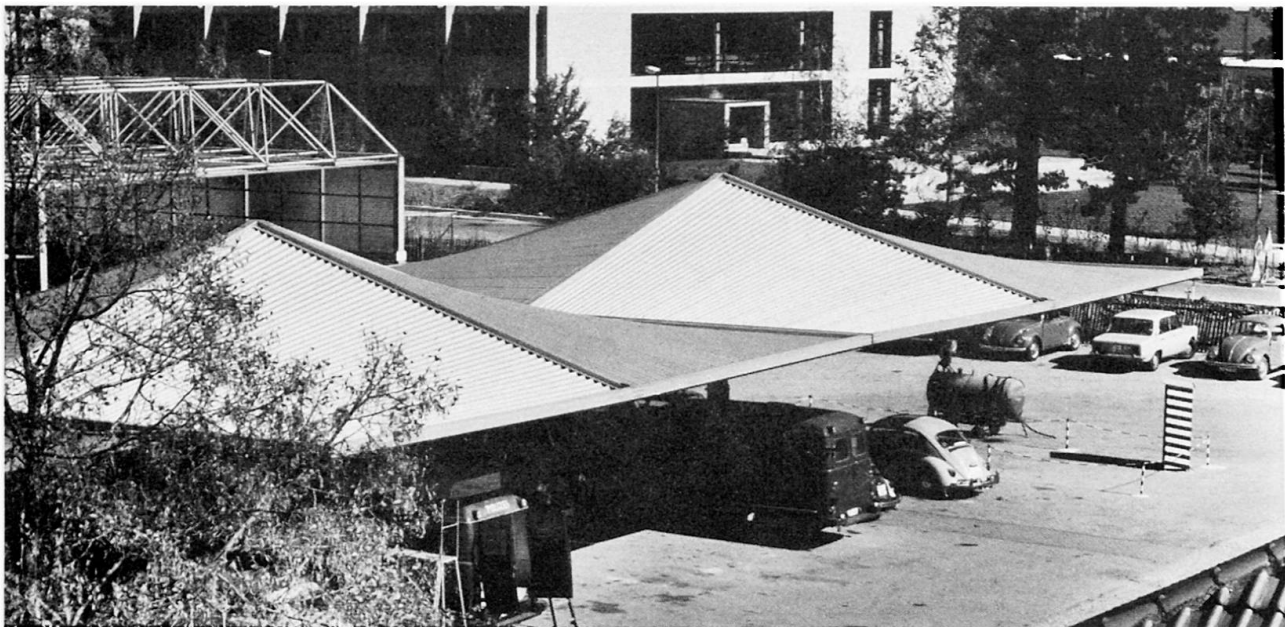


Bild 1 und 2: Schirme zur Ueberdachung von Kraftwagen-abstellplätzen in Stuttgart-Vaihingen, gebildet aus je vier ausgesteiften Hypar-Profilblechschalen (Hypar... hyperbolisches Paraboloid)

Die Untersuchungen für das in Bild 1 und 2 gezeigte Objekt und Entwurfsberechnungen für einen Ausstellungspavillon (1) zeigten, dass die Beulfestigkeit einer einlagigen Hypar-Profilblechschale durch Steifen wesentlich angehoben werden kann und dass darüber hinaus für grössere Schalen eine einlagige, ausgesteifte Ausführung allein was den Materialaufwand betrifft wirtschaftlicher ist als eine zweilagige. Da darüber hinaus für die Berechnung die Drillsteifigkeit der doppelagig verbundenen Profilbleche nur schwer richtig abgeschätzt werden kann und es ausserdem auch bei der Herstellung, Verbindung und der Unterhaltung einer solchen Ausführung Probleme gibt, sollte diese nicht erwogen werden.

Für die Bemessung einer Schalenfläche aus Profilblech wird immer der Stabilitätsnachweis massgebend und dieser kann, wie in (1) ausgeführt wurde und wie Versuche (2) anschliessend bestätigt haben, sich auf eine Schubbeuluntersuchung des ebenen Profilbleches beschränken. Auf dieser Grundlage wurden von F. Resinger und dem Verfasser für ein 13,5 m x 13,5 m grosses Schalelement beide möglichen Ausführungen, nämlich die ausgesteifte, einlagige und die doppelagige, vergleichend untersucht, wobei die Drillsteifigkeit des Profilbleches bei der einlagigen Ausführung vernachlässigt und für die doppelagige Ausführung in Abhängigkeit von der Verbindungsintensität der beiden Lagen abgeschätzt worden ist.

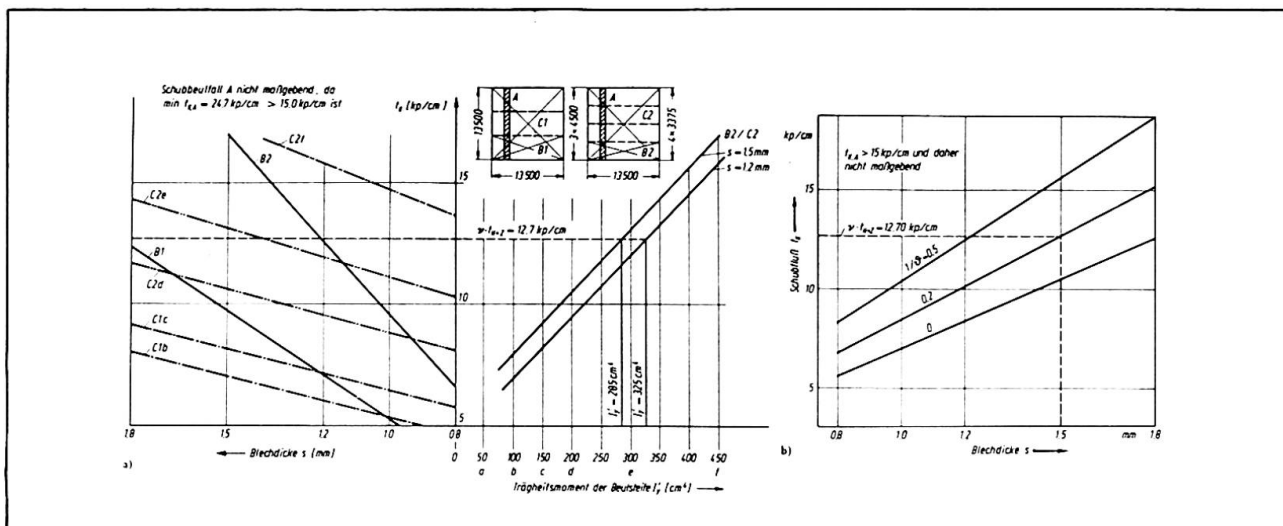


Bild 3: Ergebnis einer vergleichenden Schubbeuluntersuchung für eine Hyparschale 13,5 m x 13,5 m bei a) ausgesteifter, einlagiger und b) doppelagiger Ausführung.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im Bild 3 dargestellt, aus dem je nach Art der Ausführung die erforderliche Blechdicke für die mit der geforderten Sicherheit festgelegte, kritische Schubbelastung abgelesen werden kann. Ihr Vergleich zeigt den Vorteil der ausgesteiften, einlagigen Ausführung.

Literaturnachweis

- (1) H. Egger, M. Fischer und F. Resinger: Hyparschalen ... 'Der Stahlbau' 1971, Heft 12, Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin
- (2) M. Fischer: Versuche zur Ermittlung ... 'Der Stahlbau' 1972, Heft 4 und 5, Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin

ZUSAMMENFASSUNG

Steifen steigern die Beulfestigkeit der einlagigen Hypar-Profilblechschale, und die ausgesteifte, einlagige Hypar-Profilblechschale ist in jeder Hinsicht einer aus Stabilitätsgründen erwogenen doppelagigen Ausführung überlegen.

SUMMARY

Stiffeners increase the buckling resistance of single layer parabolic hyperbolic shells. The single stiffened shell is in every respect superior to a construction in double layer shells.

RESUME

Les raidisseurs augmentent la résistance au voilement des coques P.H. en tôles profilées simples. Ces dernières, raidies, sont en tous points supérieures à une construction en doubles coques P.H.

Leere Seite
Blank page
Page vide

IIIc

Remarques de l'auteur du rapport introductif

Bemerkungen des Verfassers des Einführungsberichtes

Comments by the Author of the Introductory Report

P.A. LORIN

Paris, France

Le rapport introductif avait attiré l'attention sur l'intérêt de la recherche des couvertures de grande surface par coques métalliques auto-portantes. Cet intérêt résulte principalement de :

- la plus grande souplesse de forme particulièrement attrayante sur le plan architectural,
- la meilleure utilisation de la matière, puisque la coque auto-portante remplit simultanément les fonctions de couverture d'étanchéité et les fonctions mécaniques sans faire appel à d'autres éléments de structure pour sa stabilité sur les points d'appui.

Le problème spécifique était la réalisation en éléments minces de grandes surfaces gauches soumises à des actions extérieures relativement faibles, ces coques se différencient alors des enveloppes de gaz ou liquides à pression.

Le fait d'avoir de grandes surfaces avec des charges relativement faibles fait naître avec l'emploi du métal, donc sous forme de tôles minces, quelques problèmes d'instabilité de forme qui se posent plus rarement dans les réalisations en béton, de même que dans les ouvrages d'art les caissons métalliques posent des problèmes auxquels échappent les caissons en béton.

Cette relative difficulté des couvertures en coques métalliques explique que très souvent la solution a été recherchée dans une autre voie : soit les systèmes à voiles tendus en câbles (thème III a) soit les systèmes tridimensionnels (thème IIIb).

Il n'est pas étonnant que les réalisations comme aussi les communications présentées au Congrès, aient été beaucoup plus nombreuses pour ces 2 autres types de solution.

Cependant la coque conserve sur les 2 autres types des avantages qui lui sont propres : elle est autoportante - avantage sur les voiles tendus à câbles, elle assure elle-même la couverture et l'étanchéité - avantage sur le tridimensionnel. Ces avantages incitent à persévérer, ce n'est pas parce qu'un problème est difficile qu'il faut l'abandonner.

Le rapport introductif avait signalé l'intérêt :

- de l'étude de l'instabilité
- de la mise en précontrainte de traction
- de recherches théoriques appuyées par l'expérimentation
- de solutions pratiques pour la réalisation de surfaces non développables.

Précisément les rapports présentés :

- Stabilité de toitures minces en acier en forme de P H
par Peter GERGELY
 - Coupole de grande portée en construction sandwich tôle d'acier - mousse de polyuréthane
par Otto JUNGBLUTH
 - Coques cylindriques en tôles nervurées
par G. ABDEL-SAYED et M. N. EL-ATROUZY
 - Coupole à 2 nappes et à treillis
par A DI TOMMASO et A. LA TEGOLA
- donnent des apports précieux sur ces pôles d'intérêt

Deux mémoires : celui de Peter GERGELY et celui de ABDEL-SAYED et EL ATROUZY attirent l'attention sur des problèmes d'instabilité et plus généralement sur les possibilités d'approches théoriques par le développement de méthodes aux éléments finis débouchant sur des calculs numériques exécutés par ordinateurs. Ces mémoires ont en outre l'intérêt de baser et contrôler ces approches théoriques par l'expérimentation.

A l'occasion de ces mémoires nous allons nous arrêter un instant sur les problèmes d'instabilité, sur les approches théoriques des coques débouchant sur des calculs, sur l'expérimentation.

PROBLEMES D'INSTABILITE :

Par le fait que l'on cherche à couvrir de grandes surfaces par des éléments relativement minces, on a nécessairement des valeurs faibles du rapport e/r de l'épaisseur à un rayon de courbure.

Il s'ensuit que l'on doit se préoccuper d'un problème d'instabilité d'une surface non plane (développable ou gauche). Je prendrai le terme "cloquage" pour la déformation d'une telle surface, réservant le mot voilement au cas des surfaces planes.

La communication de Peter GERGELY a plus spécialement traité l'instabilité due à la contrainte membranaire de cisaillement d'où résulte des lignes de compression dans la structure. Le problème est abordé par la méthode de l'énergie avec éléments finis.

Le mémoire de ABDEL-SAYED et EL-ATROUZY montre l'intérêt d'utiliser pour des surfaces cylindriques des tôles ondulées, la raideur étant beaucoup plus grande.

Sur les problèmes d'instabilité en général on peut dire que les moyens de calcul permettent d'aborder les problèmes les plus complexes.

Il n'en reste pas moins que dans la conception on doit trouver une solution réalisable économiquement, celle-ci peut-être trouvée :

- soit par un raidissage de la tôle mince lorsque c'est possible comme dans le cas des cylindres en tôle ondulée.
- soit par de fortes courbures améliorant les rapports e/r .
- soit en augmentant l'épaisseur, en conservant de relativement faibles courbures, tout en utilisant des tôles minces, type de solution présentée dans la communication de Otto JUNGBLUTH, avec élément sandwich, nous y reviendrons,
- soit par des précontraintes de traction, procédé sur lequel nous reviendrons plus loin.

Si nous évoquons à cet instant le problème des couvertures en hyperboloïde réalisées par GUYON, dont il a été question dans le mémoire introductif, nous voyons précisément que pour parer aux instabilités locales on avait envisagé 2 solutions: soit la pose de raidisseurs (ce qui a été en fait le système réalisé) soit la mise en précontrainte de traction.

THEORIES et CALCULS :

Les calculs des coques présentaient des difficultés presque insurmontables par l'approche classique des équations aux dérivées partielles.

Les programmes de calcul par méthode aux éléments finis et ordinateurs ont apporté des ressources inestimables.

La grosse difficulté reste tout de même l'étude des frontières, ce qui a été de tous temps l'obstacle majeur.

Il est certain que l'expérimentation apporte des bases solides pour des séries de types de structures. La combinaison calculs, expérimentations, est, comme l'ont montré dans 2 cas particuliers les communications citées plus haut, une approche très sûre.

Signalons aussi la théorie des équivalences présentée à ce Congrès par E. ABSI, et l'étude de systèmes physiques par analogie avec un réseau électrique purement réactif présentée également à ce Congrès par P. ALAIS et G. LAMBOLEY.

EXPERIMENTATIONS :

L'expérimentation est évidemment la base la plus solide de tout développement théorique.

Elle se révèle indispensable dans des études complexes comme celle des lois de déformation des rives de la coque, ou des instabilités - disons mieux des problèmes élastiques ou plastiques du deuxième ordre.

L'expérimentation exige évidemment une étude préalable pour fixer les données précises que l'on veut contrôler; il n'est pas rare alors que l'expérimentation révèle tout autre chose ce qui est toujours un résultat très positif.

L'obstacle majeur est que, vu les faibles épaisseurs de la structure réelle, la maquette à échelle très réduite est souvent impossible, l'expérimentation se révèle donc en général assez couteuse.

Elle est indispensable pour un problème choisi : vérification d'une conception, vérification d'un comportement, elle donne alors

- les bases de calcul du dimensionnement apportant par exemple la fiabilité d'un calcul aux éléments finis,
- la valeur de certaines constantes à introduire, des hypothèses simplificatrices valables.

MISE EN PRECONTRAINTE DE TRACTION

Un procédé très commode pour éviter les phénomènes d'instabilité avec des surfaces minces, dont nous avons déjà parlé, est la mise en précontrainte de traction.

La coque s'apparente alors au voile tendu.

En réalisant la surface à l'aide de réseaux de câbles tendus on s'affranchit à la fois des questions de déformation sous charge et des grosses difficultés de formage de coques non développables.

Ceci explique actuellement le succès des systèmes à câble ainsi qu'on a pu en juger au cours du Congrès.

A la limite, si l'on resserre le réseau de câbles on peut, pour ainsi dire, tresser un mince voile métallique qui peut être mis en précontrainte de traction, c'est précisément l'idée développée par HANNSKARL BANDEL dans sa communication présentée dans le thème III a.

Ce système s'apparente alors à la coque pure parce que l'élément porteur est en même temps l'élément de couverture.

La difficulté avec tous les systèmes tendus est de trouver les rives capables d'absorber économiquement des précontraintes. Une bonne solution est de trouver des rives funiculaires en compression ou traction, des forces de traction exercées dans la coque, car la flexion sur de grandes portées est toujours coûteuse.

Une conception de rive funiculaire en compression est donnée dans l'exemple, cité dans le rapport introductif, des usines à plan circulaire avec toiture en coque mince conique, la rive circulaire étant funiculaire des tractions uniformes radiales.

Nous devons aborder maintenant le dernier point que nous avons signalé au début de ce court exposé :

REALISATIONS DE SURFACES NON DEVELOPPABLES

Nous avons déjà signalé la difficulté spécifique aux coques métalliques, de la réalisation pratique des surfaces non développables sans recourir à l'emboutissage. Ce dernier procédé apporte la solution idéale et explique le succès des coques de petites dimensions comme c'est le cas pour la carrosserie des automobiles, mais malheureusement est difficilement concevable pour les grandes surfaces. La couverture coque en béton résout aisément le problème avec des surfaces réglées, et ceci explique dans l'état actuel le bien plus grand développement de ce procédé en génie civil.

Nous touchons là vraiment le gros problème de la coque métallique. Cependant deux des communications présentées au Congrès montrent des voies d'accès possibles de la solution.

Otto JUNGBLUTH nous a présenté une coupole de grande portée, puisqu'il s'agit d'un dôme sphérique de 35 m. de diamètre avec des toles de 1 mm. d'épaisseur. L'idée est d'associer le métal à un autre matériau, ici du polyuréthane sur 15 cm. d'épaisseur pris en sandwich entre 2 tôles de 1 mm. d'épaisseur. L'ensemble a alors un rapport e/r favorable, bien que r soit grand. On a donc bien une coque autoportante à l'abri des phénomènes d'instabilité.

Le formage devient alors très facile parce que les rayons de courbure sont grands et les épaisseurs très minces.

Cette réalisation fait bien ressortir le double avantage de cette solution sandwich qui résout avec élégance le problème d'instabilité avec des épaisseurs très faibles de métal, et le problème de formage.

DI TOMMASO et LA TEGOLA nous ouvrent une voie sur d'autres solutions en réalisant les surfaces gauches à l'aide de petits tétraèdres en barres d'acier, qu'ils appellent "farfalla". On obtient ainsi des configurations donnant en quelque sorte une structure tridimensionnelle dont la surface moyenne est gauche. On résout bien les problèmes d'instabilité et le formage, mais en fait on a tourné le problème de la coque en faisant du tridimensionnel. En sorte que nous nous trouvons en présence de la 2ème voie pour échapper aux problèmes spécifiques de la coque : celle des systèmes spatiaux objet du thème III b, la 1ère voie étant celle des voiles tendus, thème III a.

Mais cette réalisation trouve bien ici sa place car elle illustre parfaitement la difficulté du problème.

Nous avons signalé une autre solution très élégante de la surface gauche en tôle très mince mise en oeuvre dans les domes sphériques Fuller en alliage léger. On utilise alors de petits éléments formés à froid dont les rives rectilignes constituent un quadrilatère gauche. La surface globale est alors obtenue par des assemblages classiques d'éléments rectilignes comme on assemble 2 cornières.

M. RORET lors de la discussion orale nous a donné l'exemple d'une réalisation récente de la Cie Française d'Entreprise Metallique avec un dôme sphérique de 70 m. de diamètre à St-ETIENNE. M. RORET nous a d'ailleurs aussi montré une autre réalisation fort intéressante, celle de l'enveloppe sphérique du réacteur nucléaire de la Centrale Atomique de l'Electricité de France à CHINON. Il nous a montré que l'on pouvait réaliser les éléments sphériques en tôle relativement épaisse à l'aide de la classique machine à rouler de chaudronnerie. Ces éléments ont pu être obtenus grâce à un réglage des cylindres de la machine à rouler.

CONCLUSIONS

Les coques métalliques de couverture se heurtent à des problèmes spécifiques assez complexes : instabilité de parois minces, difficulté de réalisation de rives rigides et économiques, difficultés de formage.

Dans l'état actuel des techniques elles sont relativement peu répandues, contrairement aux coques en béton qui échappent beaucoup mieux à ces problèmes.

On comprend alors que l'on ait beaucoup plus souvent utilisé avec le métal des solutions permettant d'éviter ces problèmes de stabilité et de formage. Ainsi le succès des systèmes à câbles et des structures spatiales. Cependant alors, on renonce en partie aux avantages de la coque qui est une structure autoportante où l'élément de couverture remplit à lui seul toutes les fonctions. Mais les discussions précédentes ont montré qu'il y avait des solutions possibles pour résoudre ces différents problèmes, aussi mettrons-nous en conclusion ce que nous avons dit au début :

Ce n'est pas parce qu'un problème est difficile qu'il faut renoncer à lui trouver des solutions.

BIBLIOGRAPHIE

Communications présentées au 9ème Congrès :

- | | |
|---------------------------|---|
| Peter GERGELY | : Stabilité de toitures minces en acier en forme de P.H. |
| Otto JUNGBLUTH | : Coupole de grande portée en construction sandwich tôle d'acier - mousse de polyuréthane |
| ABDEL-SAYED et EL-ATROUZY | : Coques cylindriques en tôles nervurées |
| DI TOMMASO et LA TEGOLA | : Coupole à 2 nappes et à treillis |
| P.A. LORIN | : Rapport introductif sur le thème III.c |
| E. ABSI | : Théorie des équivalences |
| P. ALAIS et G. LAMBOLEY | : Etude de systèmes physiques par analogie avec un réseau purement réactif. |

RESUME

Les problèmes théoriques de calcul des coques trouvent des solutions pratiques notamment par les calculs aux éléments finis avec base expérimentale. La difficulté spécifique reste le problème du formage et des instabilités de forme. Ceci explique le succès des systèmes à câbles ou des structures spatiales. Mais la coque autoportante possède des avantages qui lui sont propres. Des solutions possibles on cite les éléments sandwich, ou les petits éléments gauches à bords rectilignes.

ZUSAMMENFASSUNG

Die theoretischen Probleme in der Schalenberechnung finden eine praktische Lösung in der Methode der endlichen Elemente auf experimenteller Basis. Die spezielle Schwierigkeit liegt in der Formgebung und in der Forminstabilität. Dies erklärt den Erfolg der Netzwerke und der Raumfachwerke. Jedoch besitzt die selbsttragende Schale Vorteile, die ihr eigen sind. Lösungen sind möglich mit Sandwich- oder kleinen schiefen Elementen bei geraden Rändern.

SUMMARY

The theoretical calculating methods for shells prove practical solutions, especially by the finite element analysis with experimental base. The specific difficulty is due to the forming problem and to the instabilities of the shape. This explains the success of cable systems or spatial structures. Still the self supporting shell offers particular advantages. Among the possible solutions are mentioned the sandwich elements or the small skew elements with rectilinear borders.