

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

Band: 7 (1964)

Artikel: General report

Autor: Thomas, F.G.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-7931>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 19.11.2024

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

General Report

F. G. THOMAS

Dr., Building Research Station, U.K.

Since the last Congress there has been a considerable increase in the interest of engineers throughout the world in the development of new methods of design. Several international symposia have been held to deal in detail with the various topics considered in the Congress discussions. New national and international committees have been set up to study the problems of a rational design basis and to formulate explicit design rules on this basis.

It is significant that over 30 papers were accepted for inclusion in the Preliminary Publication for Theme I of the present Congress. Unfortunately, most of these papers dealt with specific design problems, or particular applications of computer or model-testing techniques. However, the discussions at the Congress helped to provide a more general picture of the new trends.

a) The Mathematical Formulation of Structural Problems for the Use of Electronic Computers

Computers can be used to deal not only with complex problems which cannot be tackled by hand, but also with routine calculations which occur in such large quantities as to take considerable periods of time when dealt with manually. For the complex problem, the intelligent programmer will naturally consider the solution of the problem in relation to the computer to be used and will make full use of the facilities which it provides. For the simple routine calculations, however, he may be tempted merely to translate the calculations currently carried out by hand into a computer program. This would often be a mistake.

The first step towards making use of a computer to solve a problem should be to consider the problem in its widest setting and to decide whether the original formulation should be amended to take full advantage of the capabilities of the computer. By treating the problem in a more general way there will often be a considerable reduction in the amount of information which has to be fed into the computer. This will reduce the chance of errors occurring at this stage and will also appreciably reduce the overall time taken for the problem, since the rate at which information can be read into a computer is slow compared with the rate at which it carries out calculations.

However, the more general program may make large demands on computer storage capacity and hence limit the range of problems which can be tackled. It may also require more computer time than a more specific pro-

gram and this would be important if the program were to be used frequently. A final decision should be made only after the various possible methods of programming the problem have been carefully considered.

The mathematical solution can often be reduced to a sequence of operations on matrices, for which standard sub-routines are readily available for most computers. F. VENANCIO FILHO, in his contribution, mentions other advantages of matrix formulation. It permits the use of one type of formula for all linear processes of structural analysis. It can provide a rapid and compact presentation of the complete theory of hyperstatic structures; and the effect of modification of structural elements assumed in a tentative design can be readily determined by an operation performed with matrices previously obtained, together with matrices that define the modification. Matrix formulation can also be used for any structure (including continuous systems such as plates and shells) that can be idealised as an assemblage (actually or notionally) of a finite number of structural elements.

Although matrix formulation can be used in these ways, Mr. VENANCIO FILHO states that, when particular structural systems are being considered, the use of other formulations can be more efficient in relation to preparation of input data, use of the core memory and the time of computation.

An example of the use of matrix formulation is given by E. ABSI who deals with the analysis and programming of grid structures, a problem of particular relevance to bridges and floors. He obtains a general solution for the deformation of any plane system of straight crossed girders and, by considering the equations for each element (i. e. the bending moment, torsional moment and shearing force at each node), arrives at a matrix $S = GD$, where the stiffness matrix G is symmetrical. The program developed for solving this matrix, and for calculating the forces and displacements throughout the system, can be used for structures with up to 300 nodes, and the order of the matrix G can attain 900.

Dr. ABSI shows how a program of this type can be extended to structural systems other than that for which it was primarily prepared, such as bridges with crossed *curved* beams, ribbed floors supported on columns, and orthotropic slabs of any shape.

G. FONDER has studied the subject of prismatic shells with the aim of finding and developing a method, sufficiently accurate and general, that can be programmed for application with success to different forms of roof. After examining the literature he chose the method of rotations developed and published by YITZHAKI.

The bulk of Mr. FONDER's contribution is a description of YITZHAKI's method and its possible applications. The *programming* is dealt with only very briefly at the end of his paper, but a typical flow diagram indicates the method.

Computers are often used to speed up calculations which could otherwise

be done by formal methods. Some calculations, however, are only practicable with the help of computers. W. MERCHANT points out that the computer calculations described in the paper by W. MERCHANT and D. M. BROTTON "A generalised method of analysis of elastic plane frames" are of this latter type and that a solution of the problem discussed has not previously been obtained in such detail by any more formal type of mathematical analysis.

Professor MERCHANT states that expensive computer calculations of this type must be *justified* by studying whether or not the better physical picture obtained is worth the effort. He presents further information on the non-linear behaviour of the hyperstatic cantilever truss which was described in the main paper. The effect of bowing is shown to cause a beneficial transfer of load from the compression web members to the tension web members, and thus to postpone buckling. Professor MERCHANT concludes that the physical insight obtained by being able to follow the load transfer justifies the use of computers in this instance.

b) Function and Use of Model Tests

Structural models may be regarded essentially as special forms of calculating machines and can often be used by the designer in the same way that he might get help from an electronic computer.

The basic design assumptions must be chosen, and built into the model test, just as they are chosen and included in normal calculations. If elastic behaviour only is being considered, the model is made of an elastic material such as an acrylic resin (e. g. Perspex). Poisson's ratio for this material is, however, much higher than that for concrete; hence in simulating the behaviour of concrete structures in cases where the effects of Poisson's ratio are of some importance, a model made of micro-concrete is preferable.

When ultimate strength or other non-elastic conditions are to be studied, the model must be as realistic a representation of the full-scale structure as possible. For a particular design, it is sometimes convenient to test small-scale models of elastic materials to give a general picture of the behaviour of the structure, together with larger-scale more-realistic models for studying the stress conditions up to failure of critical parts of the structure. When a model tests provides the *main* information on the behaviour of a structure it is particularly necessary to exercise great care in the interpretation of the test results in relation to the probable behaviour of the full-scale structure.

G. OBERTI comments that model tests are of value, first, to enable comparison between conventional calculations (which include many simplifying assumptions) and the behaviour of a model in which such simplifications are unnecessary; and second, as a calculating machine for producing solutions to three-dimensional problems which are too complex for normal calculations

even with modern computing aids. Extension of the tests beyond the elastic range may show up local weaknesses and also give an indication of the order of magnitude of the safety factor.

Professor OBERTI suggests that models should be classified in relation to the type of loading (static or dynamic) and in relation to the extent of loading to be investigated (elastic, or up to failure). He states that the trend in model testing, particularly at I.S.M.E.S., Bergamo, is towards loading models up to failure, elastic models being used increasingly for giving approximate information where the problem is such that the elastic behaviour is indicative of the likely performance beyond the elastic range. He reports also increasing interest for investigating the equilibrium of vast valley systems that may be affected by the presence of hydroelectric schemes and in tests dealing with thermal stresses in structures, particularly with regard to dams but also in relation to concrete containers for nuclear reactors.

J. FERRY BORGES discusses the problems met in dynamic tests on models. Machine vibrations may usually be represented by sinusoidal-varying forces, but those due to wind or earthquake are of a random character over a large range of frequencies. For linear behaviour it is theoretically possible to determine the effect of random vibrations from studies of the effects of sinusoidal vibrations and suitably integrating these effects. However, this method is difficult to apply and the results are usually insufficiently accurate; hence a different technique has been developed at the National Civil Engineering Laboratory at Lisbon.

In this method sinusoidal or random vibrations can be induced in the model by an electromagnetic vibrator. For random vibrations the acceleration spectral density can be suitably adjusted at the various frequencies. The spectral level of acceleration can be increased to follow the behaviour of the model in the non-linear range till failure occurs; this is particularly necessary when studying the effects of earthquakes, which usually cause displacements beyond the elastic range.

One problem arises because dynamic similitude requires a different frequency for the model from that of the full-scale structure, and this change of frequency may affect the mechanical properties of the materials. A further problem concerns the effect of vibration on a structure that has cracked or otherwise deteriorated; model tests may well be the only method of getting information on the behaviour of such a structure.

J. F. LOBO FIALHO describes the techniques of model tests of bridges developed at the Lisbon Laboratory. Overall models are tested to a scale ranging from 1/50 to 1/500, being usually about 1/100 for bridges with a total span of about 100 m. For studying local stresses in certain zones, larger models from 1/2 to 1/30 scale are used.

For overall model studies the Lisbon Laboratory has finally adopted acrylic resins for the models, other plastics being abandoned because of

difficulties with their mechanical properties or with the stability of measuring devices. For detail studies of concrete bridges micro-concrete is used for the models in order to reproduce the same properties as the prototype materials.

Mr. LOBO FIALHO gives examples of types of model tests with which he has been associated, and concludes that such tests are of value to designers where the mathematical treatment is insufficiently developed or likely to be less accurate; they may indicate anomalies in design assumptions, leading to improvement in these assumptions; and they may help the designer to develop new structural shapes, since they provide an easy basis for checking new ideas.

F. STÜSSI refers to the paper by R. DZIEWOLSKI who, in his analysis of the torsional behaviour of an asymmetric box girder, adopted the concepts and methods of the higher theory of elasticity. Professor STÜSSI produces a solution of this problem by using concepts and terminology more familiar to engineers from their study of the common engineering theory of structures. The method is based on a resolution of the torsional moment into two components, leading to suitable differential equations.

J. N. DISTÉFANO describes model tests on shell roofs made at the Institute of Applied Mechanics and Structures in Argentina. Four hyperbolic paraboloidal shells were tested and one prismatic shell. The first model was of a hypar shell of large curvature, rhomboidal in plan, and supported on two opposite corners. The model was to 1/10 scale, made with reinforced mortar, and gave useful information on the degree of accuracy of the linear membrane theory.

The second model was a hypar shallow shell, made of reinforced plastic material, tested as part of a basic research program to investigate the influence of edge conditions on stresses and deformations.

The third shell was a 1/20 scale model tested to check the structural design of a large umbrella shell. Failure occurred abruptly and unexpectedly, and a model of one of the four elements constituting the umbrella was tested, to help explain the method of failure.

The model of the prismatic shell was made with Perspex since only information within the elastic range was required; tests on this model indicated the validity of various theories of prismatic shell behaviour.

R. KRAPPENBAUER describes aerodynamic model tests made to help the design of the 252 m. high Danube Tower in Vienna. The Tower consists of a reinforced concrete tubular shaft on top of a conical shell structure, a viewing terrace for 400 people, a three-storey superstructure (two storeys of which can rotate), and finally a 71 m. high steel mast (originally designed as a framed structure).

A 1/20 scale model of the Tower was tested, the concrete part being represented by timber and the steel structure above by a steel-wire construction, to obtain the shape factor in the calculations of the wind force on the Tower.

Further tests were made on models of various components of the Tower to determine the changes in the shape factor with varying REYNOLDS' numbers.

Subsequently, the mast design was changed in favour of tubular construction, and this introduced problems of turbulence. Special tests to study these would have taken too long, and after studying research on the subject it was decided to improve the aerodynamic stability by fixing spiral deflectors on the tubular mast.

The Tower was completed in April 1964 and its aerodynamic stability has been found to be satisfactory.

c) The Notion of Safety and its Role in the Calculation and Design of Structures

The essential requirement for satisfactory structural behaviour is that the resistance of a structure to the effects of a number of eventualities should be assessed and related to the likelihood of the eventualities occurring, in such a manner that the risks of collapse, or excessive distortion, or local damage, are not unduly high.

There are difficulties in deciding upon reasonable values for the various risks. A structural engineer may agree that it is *economically* reasonable for one building in a million to fall down but he will wish to be certain that the one that falls down is not one that he himself designed. Furthermore, methods of design based directly on probability considerations require much more statistical data on loadings and strengths than are at present available.

The *traditional* method, based on permissible stresses at working loads, leads to wide variations in the actual margins of safety. The *probability* approach needs to be pursued, but its practical application is unlikely for some years to come. For the time being, it is necessary to develop a *new, rational* framework for the design assumptions, within which any one part can be improved from time to time without affecting the validity of the others.

There is a growing tendency to adopt, as this new basis, the method formulated by the C.I.B. Committee under the Chairmanship of the late Professor TORROJA and introduced for reinforced concrete construction in the recently-published design recommendations of the European Concrete Committee.

In these recommendations, consideration is given to a number of "limit states", to each of which there corresponds a particular cause of unserviceability of a structure, such as collapse or excessive deformation. To each limit state a suitable margin of safety is assigned, which *in principle only* is meant to ensure that the probability of the limit state being reached is not unduly high.

Most consideration has been given so far to design in relation to the *ultimate* limit state for which appropriate safety factors have been suggested for the

ratio of the calculated ultimate strength to the assumed working loads. "Characteristic" values of the ultimate strength and of the working loads are used for this purpose; these values make some allowance on a statistical basis for random variability of strengths and loadings.

An important feature of this approach is that the global safety factor is separated into two partial safety factors, one relating to the strength of the materials and the other to loadings. That for strength takes into account reductions in strength which arise during the execution of the work and which are *additional* to those indicated by tests on samples of the material. The partial safety factor for loads allows for possible increases of load beyond the characteristic value and also for possible inaccuracy of design calculations or errors in construction.

It is hoped that this basic framework will be considered for possible adoption in national and international design codes. In the United Kingdom the Institution of Structural Engineers is currently examining how far this is possible in the revision of all the British Codes of Practice for which it is responsible.

D. SFINTESCO refers to the work of the Convention Européenne de la Construction Métallique (C.E.C.M.), which has set out to establish recommendations for the design of metal construction according to the modern conception of structural safety. The C.E.C.M. proposals reflect the ideas contained in the paper by J. DUTHEIL in the Preliminary Publication, with however the important difference that the safety factors will be applied to the loads and load effects instead of to the stresses.

The stability of compression members is being studied in detail, both theoretically and experimentally. Tests are being made in several countries in accordance with a common program, and take account of the actual conditions in which steel members are used in practice, with the many possibilities of imperfections and variabilities of dimensions and quality. All of these effects are considered together by statistical methods, so that the results can be expressed in such a way that the designer can be assured of a constant margin of safety for all slenderness ratios.

CH. MASSONNET and M. SAVE also consider the design of metallic structures. They state that, for satisfactory behaviour in service conditions it is usually necessary to check the deformations with the help of the elastic theory together with empirical corrections to allow for effects which are not included in the theory.

For ensuring adequate safety against failure statistical methods should be adopted, similar to those that have been adopted by C.E.B. and are now being examined by C.E.C.M., as well as figuring in the codes for Eastern European countries.

In considering ultimate failure, it is necessary, according to the circumstances, to use the elastic theory, with complementary empirical data; the plastic

theory, or more often limit analysis; or visco-elasticity. The authors consider various methods of failure, and the corresponding design treatment.

The designer must decide whether the *dimensioning* should be principally based on service conditions or on failure conditions. Whichever method is adopted checks are in principle necessary for the other condition, but some design methods include corrections in order to avoid the need for the supplementary checks.

G. WINTER, commenting on the paper by LIND, TURKSTRA and WRIGHT, agrees with the authors that it will never be possible to base safety provisions entirely on a desired probability of failure, or unserviceability, but contends that full use must be made of any statistical evidence on variability of strengths and loadings.

With regard to the authors' suggestion that the design load should be reduced systematically and periodically, he feels that more rational design would be obtained by proper consideration and investigation of the various types of loadings. Some loadings are known with great precision and cannot be reduced periodically in the way suggested. On the other hand, some loadings are highly uncertain and more data should be sought. More information is required also on the actual strength of existing structures.

Professor WINTER points out that there are many non-technical factors which must be considered in the drafting of design codes, and mentions that drafts of recent proposals for the ACI Code met with many objections, based on habit, tradition, competitive position, or even legal aspects.

In reply to these comments, N. C. LIND, C. J. TURKSTRA and D. T. WRIGHT, agree that rational improvement of design codes is difficult but feel that it must be attempted despite both the technical and non-technical problems involved. They agree also that what is chiefly required is more data on loadings and on actual strengths of structures as built. They suggest that, even without a completely rational code framework, improvements are possible as more and better data on loadings are obtained, and can sometimes be based on relatively few data.

Professors LIND, TURKSTRA and WRIGHT contend that, with the present discrepancies between design loads and actual loads, and also between calculated and actual stresses, the behaviour of structures designed according to existing codes is the most important source for improving codes. They conclude that safety margins are on the whole too high and return to their suggestion that the safety margins should be lowered gradually.

A. HRENNIKOFF criticises M. R. HORNE's paper *) in several respects. He says that the Rankine formula is empirical and Professor HORNE has merely shown its plausibility, not proved it. The procedure suggested is arbitrary and ambiguous, the assumed deformation bears no physical resemblance to

*) Professor HORNE's paper is included in "Publications", Vol. 23.

the actual deformation of the structure itself, and the 50 per cent increase of the computed values of the pure plastic strain appears to be merely a device to get the load factor in agreement with some predetermined results. The comparison of the results obtained by Professor HORNE's procedure with the so-called "accurate" solutions leads to a variable and unsatisfactory degree of agreement. Finally, the procedure does not apparently provide for failure by lateral-torsional buckling and local crippling.

Replying to these criticisms, M. R. HORNE does not agree that the Rankine load is purely empirical and mentions an earlier paper which indicates theoretical reasons for considering the Rankine load as approximate lower bound for the failure of an elastic-pure plastic structure.

With regard to the accuracy of predicting failure loads, Professor HORNE contends that the errors are not likely to be serious. He did not choose his examples merely because they suited the method.

The calculation of elastic-plastic collapse loads is now a routine procedure with the aid of digital computers, and full allowance is made for frame instability and change of geometry.

Professor HORNE remains convinced that the method he put forward is of value, particularly having regard to its simplicity. He would be interested to know of other semi-empirical methods which are as simple and as good.

A. A. BELES comments on the three steps which enter into the success of any construction (i) the conception, (ii) the design calculations and dimensioning, and (iii) the construction. In only the second step is mathematics applied for assuring strength and stability of the structure.

According to Professor BELES, the use of a mathematical basis for design gives the illusion of increased safety; but, he states, mathematical methods and precision of calculations do not help to make all the *hypotheses* more accurate. He mentions some matters that are not, or cannot be, included in the calculations, such as the existence of initial or erection stresses; errors arising from simplifications in the calculations; and shrinkage, creep and temperature effects.

Professor BELES considers that all such effects help to reduce safety, and it is with regard to these that the conception and construction play the principal role; the design calculations cannot usually include satisfactory allowance for them. He concludes that the only way to get a true picture of the behaviour of structures is to study existing structures, and suggests that a Symposium organised by IABSE on this subject would be valuable.

d) Calculation of Space Structures

Modern developments in electronic computation and model testing help greatly in solving the complex problems associated with the design of space

structures, and special discussion of these problems, separate from the discussions on Themes I (a) and I (b), was found to be hardly necessary.

F. VENANCIO FILHO discusses the paper by J. MICHALOS and B. GROSSFIELD "Analysis of Interconnected Space Frames" and comments that the approach used is simply the displacement method applied to space rigid frames. He points out that, for many types of frame problems, the stiffness matrix is a tri-diagonal band matrix, the inversion of which can be carried out much more economically in terms of the computer core memory and hence computer time.

K. H. BEST deals with some practical considerations in the structural analysis of steerable aerials, the reflectors of which must retain their shape within fine limits. The analysis is almost entirely concerned with estimating deflections, taking account also of constructional accuracy.

Steerable aerials are often highly redundant. The redundancies help to limit deflections, but complicate the deflection calculations. No computer programs are available for dealing with the comprehensive solution of interconnected space frames stiffened by a solid membrane. However, standard frames programs are readily available and with these the relative stiffnesses of the various components can be rapidly assessed, and alternative arrangements compared by the designer.

Mr. Best's final comment is particularly apt. Data from computers do not replace the experience and judgment of the designer.

Rapport général

Depuis le dernier congrès, les ingénieurs du monde entier ont manifesté un intérêt considérablement accru pour le développement des nouvelles méthodes de calcul. Plusieurs symposiums internationaux se sont consacrés à l'examen détaillé des divers sujets abordés lors des discussions du Congrès. De nouveaux comités nationaux et internationaux se sont fondés pour étudier les problèmes posés par l'élaboration d'une base de calcul rationnelle et la formulation explicite de règles de calcul fondées sur cette base.

Il est tout à fait significatif que plus de 30 mémoires aient été inclus dans la Publication Préliminaire au titre du Thème I pour ce Congrès. Malheureusement, la plupart de ces contributions traitaient de problèmes de calcul spécifiques ou d'applications particulières des techniques ressortissant aux essais sur modèle ou aux calculateurs. Toutefois, les discussions du Congrès ont été utiles pour dégager de façon plus générale la nature des nouvelles tendances.

a) Moyens mathématiques de formuler les problèmes structuraux en vue de l'emploi des calculateurs électroniques

Ce n'est pas seulement à la résolution des problèmes complexes auxquels on ne peut s'attaquer manuellement que les calculateurs se prêtent, mais aussi à l'exécution de calculs de routine dont l'abondance est telle qu'il faudrait un temps considérable pour en venir à bout à la main. Dans le cas des problèmes complexes, le programmeur intelligent tient évidemment compte du type de calculateur dont il dispose en cherchant comment résoudre son problème, et il met à profit toutes les possibilités de la machine; mais lorsqu'il s'agit de simples calculs de routine, il peut éprouver la tentation de traduire purement et simplement en programme machine les calculs couramment effectués manuellement. Bien souvent, ceci serait une erreur.

La première chose à faire quand on veut résoudre un problème à l'aide d'un calculateur est de considérer ce problème dans son contexte le plus large et de se demander s'il faut modifier sa formulation originale pour être à même de tirer toute le parti possible des moyens offerts par le calculateur. En traitant le problème d'une façon plus générale, on arrive souvent à réduire considérablement la quantité d'information à introduire dans le calculateur. Les risques d'erreurs s'en trouvent diminués à ce niveau et il en résulte aussi une réduction appréciable du temps requis par la résolution du problème étant donné que la vitesse à laquelle on peut fournir l'information au calculateur est très lente par comparaison à celle à laquelle il exécute les calculs.

Cependant, cette généralité de la formulation du problème peut entraîner des exigences assez élevées en matière de capacité de mémoire et, partant, limiter la gamme de problèmes pouvant être traités. Ce programme général peut en outre requérir un temps de machine plus élevé que celui que nécessiterait un programme plus spécifique, et c'est là un point important si l'on envisage d'utiliser souvent le programme. La décision finale ne doit être prise qu'après un examen attentif des diverses méthodes de programmation.

Le traitement mathématique peut souvent se réduire à une suite d'opérations matricielles pour lesquelles on peut se procurer rapidement, pour la plupart des calculateurs, des sous-programmes standard. Dans sa contribution, F. VENANCIO FILHO indique d'autres avantages offerts par la formulation matricielle. Elle permet d'utiliser un seul et même type de formule pour tous les problèmes statiques du premier ordre. Elle fournit une exposition rapide et compacte de la théorie complète des ouvrages hyperstatiques; et l'on peut rapidement déterminer l'incidence d'une modification des éléments structuraux définis dans un projet en travaillant sur les matrices précédemment obtenues et les matrices qui définissent la modification. Les matrices peuvent également être employées pour toute structure (y compris les systèmes continus tels que plaques et voiles) pouvant être assimilée à un assemblage (réellement ou théoriquement) d'éléments structuraux en nombre fini.

Bien qu'on puisse avoir recours à la formulation matricielle dans ce domaine, M. VENANCIO FILHO fait ressortir que, lorsqu'on considère des systèmes structuraux particuliers, l'emploi d'autres modes de formulation peut se révéler plus efficace en ce qui concerne la préparation des données d'entrée, l'exploitation de la mémoire à noyaux magnétiques et le temps de calcul.

L'emploi de la formulation matricielle est illustré par E. ABSI, qui traite du calcul et de la programmation des structures formées de poutres croisées, et c'est là un problème d'un intérêt tout particulier pour les ponts et les planchers. Il arrive à une solution générale donnant la déformation de tout système plan constitué de poutres droites croisées et, en considérant les équations relativement à chaque élément (c'est-à-dire le moment fléchissant, le moment de torsion et l'effort tranchant à chaque nœud), arrive à une matrice $S = GD$ où la matrice de rigidité G est symétrique. Le programme établi pour calculer cette matrice ainsi que les sollicitations et déformations dans tout le système s'adapte à des structures comprenant jusqu'à 300 nœuds, et l'ordre de la matrice G peut atteindre 900.

Le Dr ABSI montre comment on peut étendre l'application d'un programme de ce type à des systèmes différents de celui pour lequel il était primitivement prévu, tels que ponts formés de poutres croisées en *courbe*, planchers à nervures reposant sur poteaux et dalles orthotropes de toutes formes.

G. FONDER a étudié la question des voiles prismatiques en cherchant à établir une méthode suffisamment précise et générale pour qu'elle puisse être programmée et appliquée avec succès à différentes formes de toitures. Après examen des publications existantes, c'est la méthode des rotations, élaborée et publiée par YITZHAKI, qu'il a retenue.

La plus grande partie de la contribution de M. FONDER consiste en une description de la méthode de YITZHAKI et de ses applications possibles. La *programmation* elle-même n'est traitée que très brièvement à la fin du mémoire, mais un organigramme caractéristique indique la méthode suivie.

Il est fréquent que l'on se serve de calculateurs pour effectuer plus rapidement des calculs qui pourraient être faits selon des méthodes conventionnelles. Toutefois, certains calculs ne peuvent être exécutés qu'à l'aide d'un calculateur. W. MERCHANT signale que les calculs effectués au calculateur et décrits dans le mémoire de W. MERCHANT et D. M. BROTTON «Une méthode généralisée d'étude des charpentes élastiques planes» appartiennent à ce dernier type et que le problème en question n'a jamais jusqu'à présent reçu de solution aussi détaillée par aucune méthode mathématique de type plus conventionnel.

Le Professeur MERCHANT déclare qu'en raison du prix de revient élevé des calculs effectués au calculateur il faut préalablement les *justifier* en examinant si la meilleure représentation physique qui peut être obtenue en vaut la peine. Il donne des indications complémentaires sur le comportement non linéaire de la ferme à porte à faux hyperstatique décrite dans le mémoire principal. Il est montré que le raccourcissement dû à la courbure provoque

un transfert de charge avantageux des diagonales comprimées aux diagonales tendues et, de ce fait, retarde le flambement. La conclusion du Professeur MERCHANT est que la connaissance des phénomènes physiques qu'assure la faculté de suivre le transfert de charge justifie dans cet exemple l'emploi des calculateurs.

b) Fonctions et emploi des essais sur modèles

Les modèles d'ouvrages représentent au premier chef des formes particulières de machines à calculer et l'ingénieur peut souvent s'en servir comme il le ferait d'un calculateur électronique.

C'est exactement de la même façon qu'on les détermine et qu'on les introduit dans les calculs normaux qu'il faut déterminer les hypothèses fondamentales de l'étude et les introduire dans l'essai exécuté sur modèle. Si l'on étudie exclusivement le comportement élastique, le modèle est réalisé et un matériaux élastique tel qu'une résine acrylique (Plexiglas p. ex.). Toutefois, le coefficient de Poisson relatif à ce matériau est beaucoup plus élevé que celui du béton; par conséquent, lorsqu'on se propose de simuler le comportement d'ouvrages en béton dans des cas où les effets du coefficient de Poisson ont une certaine importance, il est préférable de travailler sur un modèle en micro-béton.

Quand l'étude porte sur la résistance limite ou d'autres conditions non élastiques, il faut réaliser un modèle qui représente l'ouvrage grandeur naturelle de façon aussi réaliste que possible. Pour une étude particulière, il est parfois opportun de pratiquer des essais sur des modèles à petite échelle en matériaux élastiques pour avoir une idée générale du comportement de l'ouvrage et de leur associer des modèles à plus grande échelle, plus réalistes, pour étudier les états de contrainte dans les zones critiques de l'ouvrage jusqu'à la rupture. Lorsque c'est un essai sur modèle qui a fourni les éléments d'information *principaux* sur le comportement d'un ouvrage, il est absolument indispensable de manifester une grande prudence dans l'interprétation des résultats de l'essai eu égard au comportement probable de l'ouvrage à l'échelle grandeur.

G. OBERTI fait valoir que les essais sur modèles présentent de l'intérêt à un double égard: d'une part, ils permettent des comparaisons entre les calculs conventionnels (qui comportent nombre d'hypothèses simplificatrices) et le comportement des modèles dans lesquels ces simplifications n'ont pas à être faites; d'autre part, en tant que machines à calculer permettant de trouver la solution de problèmes tri-dimensionnels trop complexes pour être traités, même avec l'aide des machines modernes, selon les méthodes de calcul normales. La poursuite des essais au-delà du domaine élastique peut mettre en évidence des faiblesses locales et, de ce fait, fournir une indication de l'ordre de grandeur du coefficient de sécurité.

Le Professeur OBERTI propose de classer les modèles en fonction du système de chargement (statique ou dynamique) et par rapport à l'étendue du domaine de chargement à étudier (domaine élastique ou jusqu'à la rupture). Il constate qu'en matière d'essais sur modèles la tendance actuelle, notamment à l'ISMES de Bergame, est de conduire le chargement jusqu'à la rupture, les modèles élastiques étant de plus en plus utilisés pour obtenir des renseignements approximatifs dans le cas de problèmes tels que le comportement élastique constitue un indicateur du comportement probable au-delà de la limite élastique. Il signale encore l'intérêt croissant qui se manifeste pour l'étude de l'équilibre des grands systèmes de vallées qui peut être affecté par la présence d'installations hydroélectriques, ainsi que pour les essais relatifs aux contraintes thermiques dans les ouvrages, singulièrement à propos des barrages mais aussi en ce qui concerne les constructions en béton qui renferment les réacteurs nucléaires.

J. FERRY BORGES traite des problèmes que l'on rencontre dans l'exécution des essais dynamiques sur modèles. Les vibrations dues aux machines peuvent généralement être représentées par des forces variant selon une loi sinusoïdale, mais celles dues au vent ou aux séismes ont un caractère aléatoire dans une large gamme de fréquences. Pour les comportements linéaires, il est théoriquement possible de déterminer l'effet des vibrations aléatoires en étudiant les effets de vibrations sinusoïdales et en intégrant convenablement ces effets. Toutefois, cette méthode est d'une application difficile, et les résultats qu'elle permet d'obtenir sont généralement insuffisamment précis; c'est pour cette raison qu'une technique différente a été mise au point au Laboratoire National de Génie Civil de Lisbonne.

Selon ce procédé, c'est un vibreur électro-magnétique qui engendre dans le modèle les vibrations sinusoïdales ou aléatoires. Dans le cas des vibrations aléatoires, la densité spectrale en accélération peut être ajustée de manière appropriée aux diverses fréquences. Le niveau spectral d'accélération peut être augmenté de façon à s'adapter au comportement du modèle dans le domaine non-linéaire jusqu'à ce que la rupture intervienne; ceci est tout particulièrement nécessaire quand on étudie les effets des séismes, car ils provoquent généralement des déplacements au-delà du domaine élastique.

Un problème se pose du fait que la similitude des processus dynamiques exige, pour le modèle, une fréquence différente de celle relative à l'ouvrage à l'échelle grandeur, et ce changement de fréquence peut influencer sur les propriétés mécaniques des matériaux. C'est un autre problème qui se présente à propos de l'effet des vibrations sur un ouvrage qui s'est fissuré ou, d'une manière quelconque, détérioré; en un tel cas, les essais sur modèles constituent peut-être la seule méthode qui permette d'obtenir des renseignements.

J. F. LOBO FIALHO décrit les techniques appropriées à l'exécution d'essais sur des modèles de ponts telles qu'établies par le Laboratoire de Lisbonne. Les modèles d'ensemble sont réalisés à une échelle allant du 1/50e au 1/500e

et qui est généralement environ au 1/100e pour les ponts d'une portée totale d'environ 100 m. Ce sont des modèles plus grands, à une échelle 1/2 à 1/30, qu'on utilise pour étudier les contraintes locales dans certaines zones déterminées.

Pour les recherches sur modèles d'ensemble, ce sont les résines acryliques que le Laboratoire de Lisbonne a finalement adoptées dans la construction des modèles, les autres matières plastiques ayant été abandonnées en raison de diverses difficultés relatives à leurs propriétés mécaniques ou à la stabilité des dispositifs de mesures. Dans les études de détail portant sur des ponts en béton, c'est en micro-béton qu'on réalise les modèles afin de reproduire les caractéristiques mêmes des matériaux utilisés dans la réalité.

M. LOBO FIALHO donne des exemples de certains types d'essais sur modèles à la réalisation desquels il a contribué, et il conclut en faisant ressortir l'intérêt qu'ont ces essais pour les ingénieurs dans les cas où le traitement mathématique est insuffisamment élaboré ou de nature à se révéler vraisemblablement moins précis; les essais peuvent faire apparaître des anomalies dans les hypothèses de calcul et, partant, permettre d'améliorer ces hypothèses; et ils peuvent aussi aider le projeteur à développer de nouvelles formes constructives, étant donné le moyen facile qu'ils fournissent pour vérifier la valeur des conceptions nouvelles.

F. STÜSSI se réfère au mémoire de R. DZIEWOLSKI qui, dans son analyse du comportement d'une poutre-caisson asymétrique à la torsion, a adopté les concepts et méthodes de la théorie supérieure de l'élasticité. Le Professeur STÜSSI résout ce problème en usant d'une terminologie et de concepts plus familiers aux ingénieurs du fait de leur étude de la statique appliquée. Cette méthode est basée sur la décomposition du moment de torsion en deux composantes, qui mène à des équations différentielles conformes.

J. N. DISTÉFANO décrit les essais sur modèles de couverture en voile mince qui ont été exécutés à l'Institut de Mécanique appliquée et de Construction d'Argentine. Les essais ont porté sur quatre voiles en paraboloïde hyperbolique et un voile prismatique. Le premier modèle était celui d'un voile en paraboloïde hyperbolique de forte courbure, de section plane rhomboïdale et supporté sur deux coins opposés. Le modèle était au 1/10e, en mortier armé, et il a permis d'obtenir des renseignements utiles sur le degré de précision de la théorie linéaire du régime de membrane.

Le second modèle était un voile mince en paraboloïde hyperbolique, réalisé en plastique armé, entrant dans le cadre d'un programme de recherches fondamentales sur l'influence des conditions aux limites sur les contraintes et les déformations.

Le troisième modèle, au 1/20e, était destiné à contrôler le calcul d'un grand voile parasol. La rupture survint soudainement et de manière inattendue, et l'on soumit à des essais le modèle de l'un des quatre éléments constituant le parasol, afin de mettre en lumière le processus de rupture.

C'est en Plexiglas qu'avait été réalisé le modèle du voile prismatique puisque l'on ne s'intéressait qu'au domaine élastique; les essais exécutés sur ce modèle ont confirmé la validité de diverses théories relatives au comportement des voiles minces prismatiques.

R. KRAPPENBAUER décrit les essais sur modèles aérodynamiques qui ont été effectués dans le cadre de l'étude de la Tour du Danube, haute de 252 m, de Vienne. La Tour est constituée par un fût tubulaire en béton armé placé au sommet d'une structure conique en voile mince, une terrasse d'observation pour 400 personnes, une superstructure de trois étages (dont deux pouvant tourner) et enfin une flèche métallique haute de 71 m (initialement conçue comme un mât en treillis).

On a exécuté des essais sur un modèle au 1/20e de la Tour, la partie en béton étant représentée par du bois et la structure supérieure métallique par du fil d'acier, afin de déterminer le coefficient de forme dans les calculs des efforts dus au vent sur la Tour. D'autres essais ont de plus été exécutés sur des modèles représentant divers éléments de la Tour pour déterminer les variations du coefficient de forme en fonction de celle du nombre de Reynolds.

Il en est résulté une nouvelle conception de la flèche en faveur d'une construction tubulaire, ce qui eut pour effet d'introduire des problèmes de turbulence. Il eût été trop long de procéder à des essais spéciaux pour les étudier, et après une analyse de la question il fut décidé d'améliorer la stabilité aérodynamique en fixant des déflecteurs hélicoïdaux sur le pylône tubulaire.

La Tour a été achevée en avril 1964, et sa stabilité aérodynamique s'est révélée satisfaisante.

c) La notion de sécurité et son incidence sur le calcul et la conception des structures

Pour assurer un comportement satisfaisant des ouvrages, la condition essentielle est que leur résistance aux effets d'un certain nombre de phénomènes probables puisse être déterminée et rapportée à la probabilité d'occurrence de ces phénomènes, de façon que les risques de ruine, de déformations excessives ou de détériorations localisées ne soient pas déraisonnablement élevés.

Pour pondérer sainement les divers risques acceptables, on se trouve dans une situation non exempte de difficultés. L'ingénieur peut admettre comme *économiquement* raisonnable la ruine d'une construction sur un million, mais il tient à être sûr que celle-là précisément ne sera pas une de celles qu'il a étudiées lui-même. De plus, les méthodes de calcul basées sur des considérations de probabilités exigent un matériel statistique de charges et de résistances beaucoup plus abondant que celui dont on dispose actuellement.

La méthode *traditionnelle*, fondée sur les contraintes admissibles aux charges de service, fait apparaître d'importantes variations dans les marges effectives de sécurité. L'approche *probabiliste* ne doit pas être abandonnée,

mais son application pratique est peu probable pendant encore quelques années. Pour le moment, il est nécessaire d'établir un système *nouveau et rationnel* de bases des calculs tel qu'il soit possible d'apporter de temps en temps des améliorations partielles sans que pour cela la validité du reste se trouve affectée.

Pour établir cette nouvelle base, on constate un mouvement de plus en plus ample en faveur de la méthode définie par le Comité CIB sous la présidence du regretté Professeur TORROJA et que le Comité Européen du Béton a introduite, pour la construction en béton armé, dans les recommandations qu'il a récemment publiées à propos des méthodes de calcul.

Dans ces recommandations, on considère un certain nombre d'«états limites» qui correspondent chacun à une cause particulière de l'inaptitude d'un ouvrage à l'usage auquel il est destiné, ruine par exemple ou bien déformation excessive. A chaque état limite est associée une marge de sécurité convenable, dont le rôle, en principe seulement, vise à assurer que la probabilité de réalisation de l'état limite n'est pas déraisonnablement élevée.

Jusqu'à présent on s'est beaucoup intéressé pour le calcul à l'état limite qui correspond à la *rupture*, au sujet duquel on a proposé des coefficients de sécurité appropriés pour le rapport de la résistance ultime calculée aux charges de service estimées. A cet effet on utilise des valeurs «caractéristiques» de la résistance limite et des charges de service; ces valeurs tiennent compte, sur une base statistique, de la variabilité aléatoire de la résistance et des charges.

Un point important de cette méthode est le fait que le coefficient de sécurité global se décompose en deux coefficients de sécurité partiels, l'un se rapportant à la résistance des matériaux et l'autre aux charges. Le coefficient relatif à la résistance prend en compte les diminutions de résistance qui interviennent durant l'exécution du travail et qui *s'ajoutent* à celles mises en évidence par les essais exécutés sur des échantillons des matériaux. Le coefficient de sécurité partiel relatif aux charges inclut d'éventuelles augmentations de la charge au-delà de la valeur caractéristique et prend également en compte d'éventuelles imprécisions dans le calcul ou d'éventuelles erreurs dans la construction.

On espère que ce système fondamental recevra toute l'attention qu'il mérite en vue d'une éventuelle adoption dans les codes nationaux et internationaux de construction. Au Royaume-Uni, l'Institution of Structural Engineers est en train d'examiner comment on pourrait le faire en révisant l'ensemble des Codes britanniques de calcul qui sont sous sa responsabilité.

D. SFINTESCO traite de l'œuvre de la Convention Européenne de la Construction Métallique (CECM) qui a entrepris l'élaboration de recommandations relatives au calcul des structures métalliques à la lumière des conceptions modernes en matière de sécurité des constructions. Les propositions de la CECM reflètent les idées exprimées dans le mémoire de J. DUTHEIL de la Publication Préliminaire, à ceci près toutefois, qui est important, que les

coefficients de pondération s'appliquent aux charges et aux effets des charges et non pas aux contraintes.

C'est en détail, aussi bien selon une approche théorique qu'à l'aide d'essais, que l'on étudie la stabilité des éléments comprimés. Dans le cadre d'un programme commun, plusieurs pays exécutent actuellement des essais en prenant en compte les conditions réelles dans lesquelles les barres se présentent dans la pratique industrielle, avec toute la gamme des imperfections possibles et des variations en matière de dimensions des sections et de qualité. On fait intervenir globalement, par des méthodes statistiques, la totalité de ces effets, de sorte que les résultats peuvent s'exprimer d'une manière telle que l'ingénieur se trouve assuré d'une marge de sécurité constante pour toute la gamme des élancements usuels.

CH. MASSONNET et M. SAVE portent également leur attention sur le calcul des constructions métalliques. Ils constatent que, pour que le comportement dans les conditions de service soit satisfaisant, il est généralement nécessaire de vérifier les déformations en faisant appel à la Résistance des Matériaux en domaine élastique, avec utilisation de corrections empiriques permettant d'estimer des effets échappant au calcul direct.

Pour assurer une sécurité suffisante vis-à-vis de la ruine, il convient d'adopter des méthodes statistiques semblables à celles qui l'ont été par le CEB, sont en cours d'examen à la CECM, et qui figurent dans les règles des pays d'Europe orientale.

Pour l'analyse du processus de ruine, il est nécessaire, selon les circonstances, d'avoir recours à la Résistance des matériaux en régime élastique, complétée par des données expérimentales, à la théorie de la plasticité ou, plus souvent, à l'analyse limite, ou encore à la visco-élasticité. Les auteurs examinent divers modes de ruine, ainsi que la méthode de calcul correspondante.

Il appartient à l'ingénieur de décider si le *dimensionnement* sera pour l'essentiel basé sur les conditions de service ou sur les conditions régnant à la ruine. Quelle que soit la méthode adoptée, il est en principe nécessaire de procéder à des vérifications relativement à l'autre système de conditions, mais il existe cependant des méthodes de calcul qui incluent les corrections nécessaires afin d'éviter d'avoir à faire ces vérifications.

G. WINTER, en commentant le mémoire de LIND, TURKSTRA et WRIGHT, partage leur opinion pour estimer qu'il ne sera jamais possible de fonder les règles de sécurité exclusivement sur une probabilité délibérément choisie de rupture, ou d'inaptitude au service, mais il soutient qu'il faut tirer tout le parti possible des résultats statistiques relatifs à la variabilité des résistances et des charges.

En ce qui concerne l'idée émise par les auteurs, à savoir que les charges réglementaires devraient faire l'objet d'une réduction périodique systématique, il estime que l'on arriverait à une conception plus rationnelle en considérant

individuellement et en étudiant les divers systèmes de charges. Certaines charges sont connues avec une grande précision, et elles ne se prêtent pas à cette réduction périodique que l'on propose de faire. D'autre part, certaines charges sont hautement indéfinies et requièrent une information plus poussée. Il faut aussi davantage de renseignements sur la résistance effective des ouvrages en service.

Le Professeur WINTER souligne que de nombreux facteurs non techniques doivent également être considérés dans la préparation des règles de construction; il fait allusion aux récentes propositions dont le Code ACI a été l'objet et aux nombreuses objections qu'elles ont soulevées sur la foi d'arguments relevant de l'habitude, de la tradition, de la lutte avec la concurrence ou même d'aspects juridiques.

En réponse à ces commentaires, N. C. LIND, C. J. TURKSTRA et D. T. WRIGHT se déclarent tout à fait d'accord avec leur auteur en ce qui concerne les difficultés que présente une amélioration rationnelle des règles de construction mais estiment qu'il faut néanmoins tenter de la réaliser en dépit des problèmes techniques et non techniques impliqués. Eux aussi donnent la première urgence à la collecte d'autres renseignements sur les charges et sur la résistance effective des ouvrages en service. Ils estiment que, même en l'absence de règles pleinement rationnelles, il sera possible d'apporter des améliorations au fur et à mesure que l'on disposera d'une information plus abondante et plus précise sur les charges effectives et que parfois il suffira de renseignements relativement peu nombreux pour permettre ces améliorations.

Les Professeurs LIND, TURKSTRA et WRIGHT se déclarent convaincus du fait que, en raison des différences constatées entre les charges réglementaires et les charges réelles ainsi qu'entre les contraintes calculées et les contraintes réelles, c'est le comportement des ouvrages réalisés selon les règles en vigueur qui constitue la source d'information la plus importante pour améliorer ces règles. Ils concluent en faisant valoir que les marges de sécurité sont dans l'ensemble trop élevées et reviennent à leur proposition de prévoir une réduction progressive de ces marges.

A. HRENNIKOFF critique le mémoire*) de M. R. HORNE dans plusieurs de ses aspects. Il fait valoir que la formule de Rankine est empirique et que le Professeur HORNE a simplement montré qu'elle était plausible, sans la démontrer pour cela. La méthode proposée est arbitraire et ambiguë, la déformation supposée n'a aucun caractère de ressemblance, physiquement, avec la déformation réelle de l'ouvrage lui-même, et l'augmentation de 50% appliquée aux valeurs calculées de la déformation plastique pure semble n'être qu'un simple artifice destiné à amener le facteur charge à coïncider avec certains résultats prédéterminés. La comparaison des résultats obtenus en appliquant la méthode du Professeur HORNE avec les solutions qu'on qualifie de

*) La contribution du Professeur HORNE a été publiée dans les «Mémoires», Vol. 23.

«précises» fait apparaître un degré de concordance variable et non satisfaisant. Enfin, il ne semble pas que la méthode puisse s'appliquer à la ruine due à un flambement par torsion latérale et au voilement local.

Répondant à ces critiques, M. R. HORNE conteste que la charge de Rankine soit purement empirique et il renvoie à une précédente communication dans laquelle on trouve indiqués les arguments théoriques qui permettent de considérer la charge de Rankine comme une limite inférieure approchée pour la ruine d'un ouvrage obéissant à une loi élastique purement plastique.

En ce qui concerne la précision de la pré-détermination des charges de ruine, le Professeur HORNE soutient qu'il est improbable que les erreurs soient graves. Ce n'est pas simplement parce qu'ils s'adaptent bien à la méthode qu'il a choisi les exemples donnés comme illustration.

Grâce aux calculateurs digitaux, le calcul des charges élasto-plastiques de ruine est maintenant une affaire de routine, et l'on tient pleinement compte de l'instabilité de l'ossature et de la variation des caractéristiques géométriques.

Le Professeur HORNE reste convaincu de la valeur de la méthode qu'il préconise, eu égard tout particulièrement à sa simplicité. Il serait heureux qu'on lui fasse connaître d'autres méthodes semi-empiriques aussi simples et aussi satisfaisantes.

A. A. BELES considère les trois phases qui conditionnent le succès de toute construction: 1. la conception, 2. le projet comprenant le calcul et le dimensionnement, 3. l'exécution. Ce n'est que dans la seconde phase qu'on a recours aux mathématiques pour assurer la résistance et la stabilité de l'ouvrage.

Selon le Professeur BELES, l'utilisation d'un appareil mathématique dans l'étude du projet donne l'illusion d'une sécurité accrue; mais, ajoute-t-il, les méthodes mathématiques et la précision des calculs effectués ne contribuent en rien à rendre toutes les *hypothèses* plus conformes à la réalité. Il cite quelques questions dont on ne tient pas ou on ne peut même pas tenir compte dans les calculs, telles que l'existence de contraintes initiales ou au montage, les erreurs dues à des simplifications dans les calculs, et les effets du retrait, du fluage et de la température.

Le Professeur BELES considère que tous ces effets contribuent à diminuer la sécurité, et c'est eu égard à eux que la conception et la construction jouent le principal rôle; les calculs effectués lors de l'étude du projet ne peuvent généralement leur accorder une place satisfaisante. Sa conclusion est que la seule façon d'arriver à une représentation authentique du comportement des constructions est d'étudier les ouvrages en service, et il fait valoir l'intérêt que pourrait avoir l'organisation par l'AIPC d'un symposium sur ce thème.

d) Calcul tridimensionnel des structures

Les progrès récents réalisés en matière de calcul électronique et d'essais sur modèles facilitent grandement la résolution des problèmes complexes que

pose le calcul des structures spatiales, et l'on n'a pas jugé absolument nécessaire d'organiser une discussion spéciale sur ces problèmes en dehors des discussions relatives aux Thèmes I (a) et I (b).

F. VENANCIO FILHO analyse le mémoire de J. MICHALOS et B. GROSSFIELD «Calcul des systèmes hyperstatiques tridimensionnels» en remarquant que la méthode utilisée est tout simplement la méthode des déformations appliquée aux ossatures spatiales rigides. Il signale que, dans le cas de nombreux problèmes d'ossatures, la matrice de rigidité est une matrice à bande tri-diagonale, dont l'inversion peut s'effectuer beaucoup plus économiquement en sollicitant moins la mémoire à noyaux magnétiques du calculateur et, donc, avec un temps de machine moindre.

K. H. BEST traite de quelques considérations pratiques à propos du calcul des antennes orientables, dans lesquelles les réflecteurs sont assujettis à conserver leur forme dans des limites très étroites. L'analyse a presque exclusivement trait à l'estimation des déformations, avec prise en compte également de la précision de l'exécution.

Les antennes orientables présentent souvent un degré d'hyperstaticité élevé. Cette hyperstaticité aide à limiter les déformations mais, en revanche, en complique le calcul. Il n'existe pas de programmes de calculateur permettant de calculer dans leur ensemble les ossatures spatiales solidaires raidies par une membrane pleine. Cependant, il est assez facile de s'assurer des programmes standard pour le calcul des ossatures, et avec eux on peut rapidement déterminer les rigidités relatives des diverses parties composantes pour que l'ingénieur, ensuite, compare les avantages des différentes dispositions possibles.

La dernière remarque de M. BEST est particulièrement juste. L'information fournie par les calculateurs ne remplace pas l'expérience et le jugement du constructeur.

Generalbericht

Seit dem letzten Kongreß läßt sich in der Entwicklung von neuen Berechnungsmethoden eine ansehnliche Zunahme des Interesses der Ingenieure auf der ganzen Welt feststellen. Mehrere internationale Symposien fanden statt, um die am Kongreß behandelten Fragen gründlich zu betrachten. Neue nationale und internationale Ausschüsse wurden geschaffen, um das Problem rationaler Berechnungsmethoden zu studieren und darauf aufbauende Berechnungsregeln aufzustellen.

Bezeichnend für diese Tendenz ist die große Anzahl von über 30 Publika-

tionen über das Thema I, die im Vorbericht dieses Kongresses aufgenommen wurden. Leider befaßten sich die meisten Beiträge nur mit speziellen Problemen oder mit besonderen Anwendungen von elektronischen Rechengerten oder von Modell-Techniken. Dennoch halfen die Diskussionen am Kongreß eine generelle Übersicht über die neuen Tendenzen verschaffen.

a) Die mathematische Formulierung statischer Probleme für die Verwendung elektronischer Rechenmaschinen

Elektronische Rechengerte können nicht nur für die Lösung komplexer Probleme herangezogen werden, sondern auch für Routineberechnungen, die öfters vorkommen und längeren Zeitaufwand benötigen. Für komplexe Aufgaben wird der kluge Programmierer natürlich die Lösung der Aufgabe dem Rechengert anpassen und versuchen dessen Vorzüge auszunützen. Für einfachere Routineberechnungen wird er jedoch öfters versucht sein, die manuelle Methode Stufe für Stufe direkt in die Programmiersprache zu übersetzen. Dies wird aber öfters ein Fehler sein.

Der erste Schritt bei Benützung eines elektronischen Rechengertes zur Lösung eines Problems soll der Erforschung des Problems im weitesten Rahmen dienen, wobei zu entscheiden ist, ob die ursprüngliche Formulierung geändert werden soll, um von den Vorteilen des elektronischen Rechengertes vollen Nutzen zu ziehen. Bei allgemeiner Behandlung des Problems kann öfters eine erhebliche Reduktion der Eingabewerte, welche in das elektronische Rechengert eingeführt werden müssen, erzielt werden. Dies wird auch die Zahl möglicher Fehlerquellen herabsetzen und zudem eine nennenswerte Verkürzung der Totalzeit für die Lösung des Problems ermöglichen, da die Geschwindigkeit, mit welcher die Eingabewerte in das elektronische Rechengert eingegeben werden können, klein ist im Vergleich zu seiner Rechengeschwindigkeit.

Das allgemeinere Programm kann jedoch größere Speicherkapazität verlangen und somit die Anzahl Probleme, die mit dem elektronischen Rechengert gelöst werden können, beschränken. Zudem kann ein solches Programm auch mehr Rechenzeit erfordern als ein auf das Problem abgestimmtes Programm, wobei dies besonders ins Gewicht fällt, wenn dieses Programm öfters verwendet werden muß. Ein endgültiger Entscheid sollte erst nach sorgfältiger Abwägung der verschiedenen Programmierungsmöglichkeiten gefällt werden.

Die mathematische Lösung kann öfters durch eine Folge von Matrix-Operationen dargestellt werden, wobei für die gebräuchlichen Operationen Standard-Unterprogramme für die meisten elektronischen Rechengerte erhältlich sind. F. VENANCIO FILHO erwähnt in seinem Beitrag noch andere Vorteile der Matrix-Formulierung. So erlaubt sie die Verwendung eines einzigen Formeltyps für alle baustatischen Probleme erster Ordnung. Sie er-

möglichst auch eine rasche und gedrängte Darstellung der gesamten Theorie statisch unbestimmter Systeme. Zudem kann der Einfluß von nachträglichen Abänderungen an den Abmessungen des Vorprojektes sofort ermittelt werden durch eine Zusatzberechnung unter Verwendung der bereits benutzten Matrix und einer Matrix, die die Abänderungen festlegt. Die Matrix-Formulierung kann aber auch für alle Systeme (einschließlich Platten und Schalen), die durch einen idealisierten Netzaufbau einer endlichen Anzahl Elemente idealisiert dargestellt werden können, verwendet werden.

Für besondere statische Systeme können jedoch, wie VENANCIO FILHO feststellt, andere Verfahren günstiger sein in bezug auf Vorbereitungszeit für die Eingabewerte, Benützung der Speicherkapazität und Rechenzeit, als die allgemeinere Matrix-Formulierung.

Ein Beispiel für die Anwendung der Matrix-Formulierung gibt E. ABSI bei der Untersuchung und Programmierung von Trägerrosten, eines besonders wichtigen Systems bei Brücken und bei Deckenplatten. Er erhält eine allgemeine Lösung für die Verformungen, die Gültigkeit hat für ein beliebiges ebenes System, das durch sich kreuzende gerade Träger gebildet wird, und findet bei Berücksichtigung der Gleichungen jedes Elementes (das heißt des Biegemomentes, des Torsionsmomentes und der Querkraft an jedem Knoten) eine Matrix $S = GD$, wobei die Steifigkeitsmatrix G symmetrisch ist. Das für die Lösung dieser Matrix sowie für die Bestimmung der Kräfte und Verschiebungen im ganzen System entwickelte Programm kann benutzt werden für statische Systeme mit bis zu 300 Knoten, und die Ordnungszahl der Matrix G kann 900 erreichen.

E. ABSI zeigt auch wie ein solches Programm für andere statische Systeme erweitert werden kann, zum Beispiel für Brücken mit sich kreuzenden, *gekrümmten* Trägern, für auf Stützen aufgelagerte Rippendecken oder für orthotrope Platten beliebiger Form.

G. FONDER untersuchte prismatische Faltwerke mit dem Ziel, eine genügend genaue, allgemeine Methode zu entwickeln, welche mit Erfolg für die Anwendung auf verschiedene Dachformen programmiert werden kann. Nach eingehendem Studium der bestehenden Literatur wählte er die von YITZHAKI entwickelte und publizierte Berechnungsmethode.

Der größte Teil des Beitrages von G. FONDER besteht aus der Beschreibung der Methode von YITZHAKI und ihren Anwendungsmöglichkeiten. Die *Programmierung* wurde nur ganz kurz am Ende des Beitrages gestreift, wo noch ein typisches Flussdiagramm die Methode veranschaulicht.

Elektronische Rechengерäte werden öfters benutzt, um Berechnungen, die auch durch Handrechnen gelöst werden könnten, zu beschleunigen. Aber einige Berechnungen wurden erst möglich durch den Einsatz von elektronischen Rechengерäten. W. MERCHANT betont, daß die im Beitrag von W. MERCHANT und D. M. BROTTON «Verallgemeinerte Berechnung ebener, elastischer Stabwerke» beschriebenen Berechnungen von dieser zweiten Art sind und

daß bisher noch keine so detaillierte Lösung durch ein mathematisches Verfahren erzielt wurde.

W. MERCHANT betont auch, daß diese teure elektronische Berechnung *begründet* sein muß durch eine Untersuchung, ob die dadurch erzielte bessere Kenntnis des physikalischen Verhaltens diesen Aufwand rechtfertigt. Er veröffentlicht zudem ergänzende Angaben über das nichtlineare Verhalten von statisch unbestimmten Fachwerkträgern, über welches im Hauptbeitrag berichtet wurde. Der Einfluß der Bogenbildung erzeugt eine begünstigende Belastungsumordnung von den Druckdiagonalen auf die Zugdiagonalen und verzögert dadurch das Ausknicken. Professor MERCHANT kommt zum Schluß, daß die bessere Kenntnis der physikalischen Phänomene, durch die Möglichkeit die Belastungsumordnung zu verfolgen, den Gebrauch von elektronischen Rechengerten in diesem Fall rechtfertigt.

b) Bedeutung und Anwendung von Modellversuchen

Statische Modelle können in ihrer Hauptsache als spezielle Formen von Rechenmaschinen betrachtet und öfters durch den Statiker in der gleichen Weise benützt werden, wie er dies mit einer elektronischen Rechenmaschine tun würde.

Die Grundannahmen der Untersuchung müssen gewählt und in den Modellversuch eingebaut werden, genau so wie sie normalerweise bei statischen Berechnungen gewählt und eingeführt werden müssen. Wenn allein das elastische Verhalten untersucht werden soll, wird das Modell aus einem elastischen Material wie das Akriharz (z. B. Plexiglas) hergestellt. Allerdings ist für dieses Material die Poissonzahl bedeutend höher als für Beton, weshalb bei Untersuchung des Verhaltens von Betontragwerken, in welchen die Poissonzahl einen gewissen Einfluß hat, die Verwendung von Modellen aus Mikrobeton vorzuziehen ist.

Falls das Traglastvermögen oder andere unelastische Bedingungen zu untersuchen sind, muß das Modell so realistisch wie möglich das Objekt darstellen. Für besondere Probleme kann es manchmal vorteilhaft sein, Untersuchungen über das allgemeine Verhalten des Tragwerkes an kleinen Modellen aus elastischen Materialien durchzuführen, gleichzeitig mit größeren und realistischeren Modellen zum Studium des Spannungsverlaufes bis zum Bruch der kritischen Teile des Tragwerkes. Wenn Modellversuche die *Hauptinformationen* über das Verhalten des Tragwerkes geliefert haben, so ist große Vorsicht bei der Übertragung der Versuchsergebnisse auf das mögliche Verhalten des tatsächlichen Tragwerkes erforderlich.

G. OBERTI stellt fest, daß die Modellversuche wertvoll sind, erstens weil sie einen Vergleich zwischen den konventionellen Berechnungen (welche manche vereinfachende Annahmen einschließen) und dem Verhalten des

Modells, bei dem solche Vereinfachungen nicht erforderlich sind, erlauben; und zweitens erlauben sie, als Rechenmaschinen aufgefaßt, die Lösung von dreidimensionalen Problemen, welche für normale Berechnungen zu komplex sind, selbst mit den modernen Rechenhilfsmitteln. Eine Erweiterung der Versuche über den elastischen Bereich hinaus kann zudem lokale Schwachstellen aufdecken und auch Angaben über die Größe des Sicherheitsfaktors vermitteln.

Professor OBERTI schlägt eine Klassierung der Modelle vor in bezug auf Belastungsart (statische oder dynamische Belastung) und in bezug auf den zu untersuchenden Lastbereich (elastische Belastung oder bis zum Bruch). Er stellt fest, daß die Entwicklung bei Modellversuchen, insbesondere beim I. S. M. E. S. in Bergamo, in Richtung der Belastung bis zum Bruch geht, wobei die elastischen Modelle vermehrt benutzt werden, um angenäherte Angaben zu erhalten, bei denen das elastische Verhalten richtungsweisend ist für das mögliche Verhalten über den elastischen Bereich hinaus. Er weist auch auf das vermehrte Interesse hin, das Gleichgewicht ganzer Talsysteme zu untersuchen, welches durch den hydroelektrischen Ausbau beeinflußt werden kann, sowie auf die Versuche, die sich mit Temperaturspannungen in den Tragwerken befassen, mit besonderer Berücksichtigung von Dämmen, aber auch von Stahlbetonbehältern für Atomreaktoren.

J. FERRY BORGES behandelt die bei dynamischen Modellversuchen auftretenden Probleme. Mechanisch erzeugte Schwingungen können normalerweise durch sinusförmige variierende Kräfte dargestellt werden, aber durch Wind oder Erdbeben erzeugte Schwingungen sind zufälligen Charakters über einen größeren Frequenzbereich. Für lineares Verhalten ist es theoretisch möglich, den Einfluß von zufälligen Schwingungen durch Untersuchung des Einflusses sinusförmiger Schwingungen und nachheriger passender Integration dieser Einflüsse zu bestimmen. Jedoch ist diese Methode schwer durchführbar, und die Resultate sind im allgemeinen zu ungenau; deshalb wurde am Laboratório Nacional de Engenharia Civil in Lissabon eine andere Methode entwickelt.

Nach dieser Methode können sinusförmige oder andere Schwingungen im Modell durch einen elektromagnetischen Vibrator erzeugt werden. Für stochastische Schwingungen kann die Spektrumsdichte der Beschleunigung durch geeignete Maßnahmen an die verschiedenen Frequenzen angepaßt werden. Das spektrale Niveau der Beschleunigung kann dabei so erhöht werden, daß es dem Verhalten des Modells im nichtlinearen Bereich bis zum Bruch folgen kann; dies ist besonders wichtig bei der Untersuchung der Einflüsse von Erdbeben, welche im allgemeinen Verschiebungen über den elastischen Bereich hervorrufen.

Ein weiteres Problem entsteht dadurch, daß die dynamische Ähnlichkeit für das Modell eine andere Frequenz verlangt als für das Tragwerk in Naturgröße und daß diese Änderung der Frequenz die mechanischen Eigenschaften des Materials beeinflussen kann. Ein weiteres Problem betrifft den Einfluß

der Schwingungen auf ein gerissenes oder anderweitig beschädigtes Tragwerk; in einem solchen Fall dürfte der Modellversuch die einzige Methode sein, um Informationen über das Verhalten eines solchen Tragwerkes zu vermitteln.

J. F. LOBO FIALHO beschreibt die an der Materialprüfanstalt in Lissabon entwickelten Modelltechniken für Brücken. Das Verhalten ganzer Bauwerke wird untersucht an Modellen im Maßstab 1 : 50 bis 1 : 500, im allgemeinen im Maßstab 1 : 100 für Brücken mit einer Totspannweite bis zu 100 m. Zum Studium der Lokalspannungen werden größere Teilmodelle im Maßstab 1 : 2 bis 1 : 30 verwendet.

Für Modelluntersuchungen ganzer Bauwerke verwendet jetzt die Materialprüfanstalt in Lissabon nur noch Akrylharze; von der Verwendung anderer synthetischer Materialien wurde abgesehen wegen den Schwierigkeiten mit den mechanischen Eigenschaften oder mit der Stabilität der Meßeinrichtungen. Für Detailuntersuchungen an Betonbrücken wird für die Modelle Mikrobeton verwendet, um die Eigenschaften der Ausführung möglichst genau nachzubilden.

LOBO FIALHO beschreibt Beispiele einiger Typen von Modellversuchen, an denen er mitgearbeitet hat, und hebt den besonderen Wert hervor, den solche Versuche für den Ingenieur haben, wenn die methodische Behandlung ungenügend entwickelt oder wenn sie vermutlich zu ungenau ist; die Versuche können Unregelmäßigkeiten in den Berechnungsannahmen aufzeigen und erlauben somit eine Verbesserung dieser Annahmen; und sie können dem Ingenieur helfen, neue Tragwerkformen zu entwickeln, angesichts der einfachen Möglichkeit, neue Ideen zu prüfen.

F. STÜSSI nimmt Bezug auf den Beitrag von R. DZIEWOLSKI, der in seiner Untersuchung des Torsionsverhaltens eines asymmetrischen Kastenträgers die Konzeption und die Methoden der höheren Elastizitätstheorie anwendet. Professor STÜSSI entwickelt eine Lösung dieses Problems unter Anwendung einer Methodik und Terminologie, die dem Ingenieur vom Studium der klassischen Elastizitätstheorie näher liegt. Die Methode beruht in der Aufteilung des Torsionsmomentes in zwei Komponenten und führt zu passenden Differentialgleichungen.

J. N. DISTÉFANO beschreibt Modellversuche an Schalendächern, die am Institut für angewandte Mechanik und Baustatik in Argentinien ausgeführt wurden. Vier hyperbolisch-parabolische Schalen sowie eine prismatische Schale wurden untersucht. Das erste Modell war eine hyperbolische Schale großer Krümmung mit rhombischem Grundriß und an zwei gegenüberliegenden Ecken aufgelagert. Das Modell war aus armiertem Mörtel im Maßstab 1 : 10 hergestellt und vermittelte nützliche Angaben über den Genauigkeitsgrad der linearen Membrantheorie.

Das zweite Modell war eine aus armiertem Kunststoff hergestellte, schmale hyperbolische Schale, die im Rahmen eines Forschungsprogrammes zur Untersuchung des Einflusses der Randstörungen auf die Spannungen und Verformungen untersucht wurde.

Die dritte Schale, im Maßstab 1 : 20, wurde untersucht, um die statische Berechnung einer großen, regenschirmförmigen Schale zu kontrollieren. Der Bruch trat plötzlich und unerwartet ein, und ein Modell, bestehend aus einem der vier den Regenschirm bildenden Elemente wurde gesondert untersucht, um den Bruchvorgang besser zu erklären.

Das Modell der prismatischen Schale wurde aus Perspex hergestellt, da nur Angaben innerhalb des elastischen Bereiches erforderlich waren; die Versuche an diesem Modell bestätigten die Gültigkeit verschiedener Theorien über das Verhalten prismatischer Schalen.

R. KRAPPENBAUER beschreibt die aerodynamischen Modellversuche, die als Grundlage für die Bemessung des 252 m hohen Donauturmes in Wien dienten. Der Turm besteht aus einem Rohrschaft aus Stahlbeton, der auf eine konische Schalenunterkonstruktion aufgesetzt ist, aus einer Aussichtsterrasse für 400 Personen, aus einem dreistöckigen Aufbau (wovon zwei Stockwerke rotieren können) und schließlich noch aus einem 71 m hohen Stahlmast, der ursprünglich als Fachwerkkonstruktion entworfen war.

Um den Formfaktor für die Windkraft in der Berechnung des Turmes zu bestimmen, wurde ein Modell des Turmes im Maßstab 1 : 20 untersucht, wobei der Betonteil durch Holz und die daraufstehende Stahlkonstruktion durch eine Stahldrahtkonstruktion dargestellt wurde. Außerdem wurden Versuche an Teilmodellen des Turmes ausgeführt, um die Änderungen des Formfaktors mit wechselnden Reynoldsen Zahlen zu bestimmen.

Infolgedessen wurde der Mastentwurf zu Gunsten einer Rohrform abgeändert, wodurch das Problem der Turbulenz eingeführt wurde. Besondere Versuche, um dieses Problem zu untersuchen, hätten zu viel Zeit in Anspruch genommen, weshalb nach Studium der Forschungen auf diesem Gebiet beschlossen wurde, durch Anordnung von spiralförmigen Störelementen auf dem rohrförmigen Mast die aerodynamische Stabilität zu verbessern.

Der Turm wurde im April 1964 vollendet, und seine aerodynamische Stabilität wurde als befriedigend befunden.

c) Begriff der Sicherheit und seine Bedeutung für Entwurf und Berechnung unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der plastischen Verformungen auf die Verteilung der Schnittkräfte

Das Haupterfordernis für befriedigendes Tragwerkhalten ist, daß die Widerstandsfähigkeit des Tragwerks gegenüber einer bestimmten Anzahl von Einflüssen bestimmt und auf die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieser Einflüsse bezogen werden kann, solcherweise, daß die Wahrscheinlichkeit eines Bruches, einer zu großen Verformung oder eines Lokalschadens nicht unzulässig hoch wird.

Große Schwierigkeiten bereitet die Festlegung vernünftiger Werte für die verschiedenen Risiken. Ein Bauingenieur wird einräumen, daß es *wirtschaftlich* vernünftig ist anzunehmen, daß unter einer Million Häuser eines einstürzen darf, aber er möchte sicher sein, daß dieses Gebäude nicht gerade von ihm entworfen wurde. Außerdem benötigen direkt auf Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen beruhende Berechnungsmethoden weit mehr statistische Angaben über die Lasten und die Festigkeiten, als heute zur Verfügung stehen.

Die *herkömmliche* Methode, aufgebaut auf zulässige Spannungen für Betriebslasten, führt zu einer breiten Streuung in den heute gültigen Sicherheitsfaktoren. Die Annäherung durch *Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen* muß verfolgt werden, aber eine praktische Anwendung ist für die nächsten Jahre unwahrscheinlich. Zur Zeit wird die Entwicklung einer *neuen, rationalen* Struktur für die Berechnungsgrundlagen erforderlich, welche spätere Teilabänderungen erlaubt, ohne die Gültigkeit des Systems in Frage zu stellen.

Zunehmende Bestrebungen sind im Gange, um die durch den C.I.B.-Ausschuß, unter der Leitung des verstorbenen Professors TORROJA formulierte und in den kürzlich erschienenen Empfehlungen des Comité Européen du Béton für den Stahlbeton eingeführte Methode als neue Grundlage anzunehmen.

In diesen Empfehlungen wird Rücksicht genommen auf eine Anzahl von «Grenzzuständen», welchen jeweils ein besonderer Fall von Unbrauchbarkeit des Tragwerkes entspricht, wie zum Beispiel Bruch oder übermäßige Verformung.

Zu jedem Grenzzustand wird ein zweckmäßiger Sicherheitsfaktor zugeordnet, welcher *im Prinzip einzig* dazu dient, zu gewährleisten, daß die Wahrscheinlichkeit, diesen Grenzzustand zu erreichen, nicht unvernünftig hoch wird.

Große Bedeutung wurde bisher der Berechnung in bezug auf den *Bruchzustand* gegeben, für welche geeignete Sicherheitsfaktoren für das Verhältnis der errechneten Bruchfestigkeit zu der angenommenen Betriebsbelastung vorgeschlagen wurden. «Charakteristische» Werte für die Bruchfestigkeit und für die Betriebslasten werden zu diesem Zweck benutzt; diese Werte nehmen eine gewisse Rücksicht auf die durch die Statistik erfaßte Streuung der Festigkeiten und der Lasten.

Ein wichtiger Punkt dieser Methode ist, daß der globale Sicherheitsfaktor in zwei Teilsicherheitsfaktoren aufgeteilt wird, einer in bezug auf die Festigkeit der Baustoffe, der andere in bezug auf die Lasten. Derjenige bezüglich der Festigkeit berücksichtigt die Abnahme der Festigkeit, welche während der Ausführung entsteht und welche *zusätzlich* zu den durch Versuche an Materialproben ermittelten auftritt. Der Teilsicherheitsfaktor für Lasten berücksichtigt mögliche Überschreitungen der Lasten über den charakteristischen Wert sowie mögliche Ungenauigkeiten in den Berechnungen oder Fehler in den Konstruktionen.

Es ist zu hoffen, daß diese Grundlagen bei der Ausarbeitung nationaler

und internationaler Berechnungsgrundlagen berücksichtigt werden. In England untersucht zur Zeit die Institution of Structural Engineers, wie weit dies möglich ist bei der Revision aller englischen Baunormen, für welche sie verantwortlich ist.

D. SFINTESCO berichtet über die Arbeit der Europäischen Konvention für Stahlbau, welche beschlossen hat, Empfehlungen aufzustellen für den Entwurf und die Berechnung von Stahlbauten unter Berücksichtigung der modernen Sicherheitskonzeption. Der Vorschlag der C. E. C. M. widerspiegelt die im Beitrag von J. DUTHEIL im Vorbericht enthaltenen Ideen, mit dem wichtigen Unterschied, daß die Sicherheitsfaktoren auf die Lasten und auf die Lastwirkungen, anstatt auf die Spannungen bezogen werden.

Die Stabilität von Druckstäben wird im Detail studiert, und zwar sowohl theoretisch als auch durch Versuche. Die Versuche werden in mehreren Staaten in Übereinstimmung mit einem gemeinsamen Programm durchgeführt, unter Berücksichtigung der effektiven Bedingungen, unter welchen Stahlelemente in der Praxis verwendet werden, mit den vielen Möglichkeiten von Unvollkommenheiten und Streuungen von Abmessungen und Güte. Alle diese Einflüsse werden zusammen betrachtet durch statistische Methoden, so daß die Resultate so ausgedrückt werden können, daß dem Statiker stets eine gleichbleibende Sicherheit für alle Schlankheitsgrade gewährleistet ist.

CH. MASSONNET und M. SAVE betrachten ebenfalls den Entwurf von Stahlbauten. Sie stellen fest, daß, um ein befriedigendes Verhalten unter Betriebsbedingungen zu erhalten, normalerweise die Kontrolle der Verformung mittels der Elastizitätstheorie zusammen mit empirischen Korrekturen, um nicht in der Theorie enthaltene Einflüsse zu berücksichtigen, erforderlich ist.

Um angemessene Bruchsicherheiten zu gewährleisten, sollten statistische Methoden, ähnlich denjenigen durch die C. E. B. angewendeten und zur Zeit beim C. E. C. M. in Prüfung, oder die bereits in den Normen osteuropäischer Länder eingeführten Methoden, verwendet werden.

Bei der Betrachtung von Bruchlasten ist je nach den Verhältnissen erforderlich, die Elastizitätstheorie mit zusätzlichen empirischen Regeln, die Plastizitätstheorie oder noch öfters die Traglast, oder die Viskoelastizität zu verwenden. Die Autoren betrachteten verschiedene Brucherscheinungen sowie die entsprechenden Berechnungsmethoden.

Der Ingenieur muß entscheiden, ob die *Bemessung* in der Hauptsache auf die Betriebsbedingungen oder auf Bruchbedingungen erfolgen soll. Welche Methode auch angewandt wird, sind im Prinzip stets noch Kontrollen erforderlich für die andere Bedingung, wobei einige Berechnungsmethoden bereits Korrekturen einschließen, um die sonst notwendigen zusätzlichen Kontrollen zu vermeiden.

G. WINTER, den Beitrag von LIND, TURKSTRA und WRIGHT besprechend, unterstützt die Autoren, daß es niemals möglich sein wird, Sicherheitsmaßnahmen nur auf die gewünschte Wahrscheinlichkeit des Bruches oder der

Unbrauchbarkeit zu beziehen, aber er unterstützt die volle Ausnützung der statistischen Unterlagen über die Streuungen der Festigkeiten und der Belastungen.

Im Hinblick auf den Vorschlag der Autoren, die Entwurfsbelastungen systematisch und periodisch zu reduzieren, glaubt er, daß ein rationellerer Entwurf entstehen würde durch geeignete individuelle Beachtung und Untersuchung der verschiedenen Belastungen. Einige Belastungen sind mit großer Genauigkeit bekannt und können nicht in der vorgeschlagenen Art periodisch reduziert werden. Auf der anderen Seite sind einige Belastungen mit großen Unsicherheiten behaftet und erfordern mehr statische Unterlagen. Mehr Unterlagen sind auch erforderlich über die effektive Festigkeit bestehender Bauwerke.

Professor WINTER hebt hervor, daß hier verschiedene nichttechnische Faktoren vorhanden sind, welche bei der Aufstellung von Entwurfsnormen berücksichtigt werden müssen, und erwähnt, daß neuere Entwürfe für den ACI-Code zahlreiche Einwände hervorriefen, begründet auf Gewohnheit, Tradition, Konkurrenzlage oder sogar auf gesetzliche Maßnahmen.

In Erwiderung zu diesen Bemerkungen geben N. C. LIND, C. J. TURKSTRA und D. T. WRIGHT zu, daß ein rationaler Fortschritt bei Entwurfsnormen schwierig ist, sie glauben aber, daß ein Versuch gemacht werden muß, trotz den enthaltenen technischen und nichttechnischen Problemen. Sie sind auch darin einig, daß grundsätzlich mehr statistische Angaben über Belastungen und über die effektiven Festigkeiten der fertig erstellten Tragwerke erforderlich sind. Sie stellen fest, daß, selbst ohne das Vorhandensein eines vollständigen Rahmens rationaler Normen, Verbesserungen möglich sind, auch wenn sie manchmal nur auf relativ wenige Angaben erfolgen.

Die Professoren LIND, TURKSTRA und WRIGHT stellen fest, daß wegen der bestehenden Diskrepanz zwischen den Entwurfslasten und den effektiven Lasten und somit auch zwischen den berechneten und den effektiven Spannungen das Verhalten der nach den bestehenden Normen ausgeführten Bauwerke die wichtigste Quelle für die Verbesserung der Normen ist. Sie kommen zum Schluß, daß die Sicherheitsfaktoren im ganzen zu hoch sind und wiederholen ihren Vorschlag, die Sicherheitsfaktoren allmählich herabzusetzen.

A. HRENNIKOFF kritisiert den Beitrag von M. R. HORNE*) in verschiedenen Punkten. Er stellt fest, daß die RANKINE-Formel eine empirische Formel ist und daß Professor HORNE einzig deren Glaubwürdigkeit gezeigt, aber nichts bewiesen hat. Der vorgeschlagene Weg ist willkürlich und zweideutig, die angenommene Verformung weist keine physikalische Ähnlichkeit mit den tatsächlichen Verformungen des Tragwerkes auf, und die fünfzigprozentige Vergrößerung der bei reiner plastischer Dehnung berechneten Werte erscheint einzig als ein Kunstgriff, um den Lastfaktor mit einigen vorbestimmten End-

*) Der Beitrag von Professor HORNE ist in den «Abhandlungen», Band 23, erschienen.

werten in Einklang zu bringen. Der Vergleich der durch die Methode von Professor HORNE erhaltenen Werte mit den sogenannten genauen Lösungen führt zu einem veränderlichen und unbefriedigenden Grad von Übereinstimmung. Schlußendlich scheint dieses Vorgehen keine Sicherung gegen Zerstörung infolge Kippen oder lokaler Beulung vorzusehen.

In seiner Erwiderung ist M. R. HORNE mit der Feststellung, die RANKINE-Last sei rein empirischer Art, nicht einverstanden und verweist auf eine frühere Publikation, in welcher theoretische Gründe angeführt werden, wonach die RANKINE-Last als eine angenäherte untere Grenze für die Zerstörung eines elastisch-reinplastischen Tragwerkes betrachtet werden kann.

Im Hinblick auf die Genauigkeit, mit der die Bruchlasten bestimmt werden, bestreitet Professor HORNE die Möglichkeit des Auftretens größerer Fehler. Die Beispiele wurden von ihm nicht ausgesucht, damit sie besser der Methode entsprachen.

Die Berechnung von elastisch-plastischen Traglasten ist heute eine Routineangelegenheit mit der Zuhilfenahme elektrischer Rechengерäte, wobei volle Rücksicht auf die Rahmenstabilität und auf Änderungen der geometrischen Charakteristiken genommen wird.

Professor HORNE bleibt überzeugt, daß die von ihm vorgeschlagene Methode wertvoll ist, besonders wenn deren Einfachheit beachtet wird. Er möchte gerne andere semiempirische Methoden kennen lernen, die so einfach und gut sind.

A. A. BELES befaßt sich mit den 3 Stufen, die für den Erfolg jeder Konstruktion maßgebend sind, (1) die Konzeption, (2) die statische Berechnung und die Dimensionierung und (3) die Ausführung. Einzig auf der zweiten Stufe sind mathematische Methoden anwendbar, um die Festigkeit und die Stabilität der Tragwerke zu gewährleisten.

Nach Professor BELES gibt die Benützung mathematischer Grundlagen für den Entwurf die Illusion erhöhter Sicherheit; aber die mathematischen Methoden und die Rechengenauigkeit helfen nicht, irgendeine der *Annahmen* zu verbessern. Er erwähnt auch einige Einflüsse, welche nicht in die Berechnungen eingeführt werden oder nicht eingeführt werden können, Einflüsse wie das Vorhandensein von Eigenspannungen oder Montagespannungen, durch Berechnungsvereinfachungen eingeführte Fehler und Schwind-, Kriech- und Temperatureinflüsse.

Professor BELES stellt fest, daß alle diese Einflüsse auf den Sicherheitsfaktor reduzierend wirken und daß im Hinblick auf diese Einflüsse die Konzeption und die Ausführung die Hauptrolle spielen; die Berechnungen können im allgemeinen diesen Einflüssen nicht genügend Rechnung tragen. Er kommt zum Schluß, daß der einzige Weg, um ein wahrheitsgetreues Bild über das Verhalten der Tragwerke zu erhalten, in der Beobachtung der bestehenden Tragwerke liegt und glaubt, daß ein durch die IVBH organisiertes Symposium über dieses Thema wertvoll sein würde.

d) Räumliche Berechnung von Tragwerken

Moderne Entwicklungen bei den elektronischen Rechenmaschinen und bei den Modellversuchen hatten einen bedeutenden Anteil an der Lösung der komplexen Probleme, die durch die Berechnung räumlicher Tragwerke gestellt wurden, so daß eine spezielle Diskussion dieser Probleme, getrennt von den Diskussionen der Themen Ia und Ib, als nicht notwendig erachtet wurde.

F. VENANCIO FILHO diskutiert den Beitrag von J. MICHALOS und B. GROSSFIELD «Berechnung von räumlichen Netzwerken» und stellt fest, daß die benutzte Annäherung nichts anderes ist als die Anwendung der Deformationsmethode auf räumliche Tragwerke. Er bemerkt auch, daß für verschiedene Typen von Rechenproblemen die Steifigkeitsmatrix durch ein dreigliedriges Diagonalband dargestellt werden kann, wobei durch Umkehrung dieser Matrix eine bedeutende Minderbeanspruchung der Speicherkapazität der elektronischen Rechenmaschine und auch eine Verminderung der Rechenzeit erzielt werden kann.

K. H. BEST erwähnt einige praktische Methoden bei der statischen Berechnung von Richtantennen, deren Reflektoren nur geringste Formabweichungen zulassen. Die Untersuchung betrifft fast allein die Abschätzung von Verformungen, wobei auch Rücksicht auf die Ausführungsgenauigkeit genommen wird.

Richtantennen sind oftmals mehrfach statisch unbestimmt. Diese zusätzlichen Bindungen helfen die Verformung klein zu halten, erschweren aber andererseits deren Berechnung. So bestehen auch keine Programme, die erlauben, ein räumliches, durch eine feste Membrane ausgesteiftes Stabtragwerk als Ganzes zu berechnen. Dennoch können mit Hilfe der bereits vorhandenen Standard-Rahmenprogramme die relativen Steifigkeiten der verschiedenen Teilelemente bestimmt werden, und dadurch wird dem Ingenieur die Möglichkeit gegeben, alternative Anordnungen miteinander zu vergleichen.

Die Schlußbemerkung von BEST ist allgemein gültig. Die Ergebnisse elektronischer Rechengeräte können weder die Erfahrung noch das Urteilsvermögen des Ingenieurs ersetzen.

Leere Seite
Blank page
Page vide