

# General report

Autor(en): **Thomas, F.G.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **7 (1964)**

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-7815>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## General Report

F. G. THOMAS

Dr., Building Research Station, U.K.

In a time of accelerating progress, the structural engineer is having a new look at his design methods. The advent of the electronic digital computer has introduced the possibility of more searching and rigorous analysis of problems that were previously intractable without introducing many simplifying approximations. The behaviour of complicated structures can now be studied quickly and easily in great detail over a wide range of variations in loadings and stiffnesses of the structural members. Tests on models are being increasingly used to check, supplement, or even replace theoretical studies of the response of structures to both static and dynamic loading. The fundamental approach to structural safety is being reconsidered, and codes of practice are being remodelled to replace the methods based on permissible stresses by those in which the behaviour of a structure is examined in relation to various limit states. The papers submitted for Theme I all have some significance in helping the engineer to understand what is happening in this revolution in structural design.

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

The paper by B. RAWLINGS, on the analysis of structures under impulsive loading, illustrates three important points concerning the use of computers. The first is that modern computers enable many complex problems to be solved on a more realistic basis than was previously possible, without the need for so many simplifying assumptions. Simplifying assumptions are not completely removed, e.g. the author assumes that steel may be regarded as a rigid-plastic material when the impulsive loads are large, but the effects of alternative assumptions on the predicted behaviour of complex structures can be readily examined, and their relative merits may thus be assessed.

The second point is that the solution of a problem can often be reduced mathematically to a sequence of operations on matrices. Subroutines for standard matrix operations are readily available for most computers, and the actual programming of these operations involves little more than making a list of the required operations in the correct order.

The third point is that there may be more than one way of programming a computer to solve a given problem. For the author's problem two methods are suggested, one of which demands less preliminary mathematical analysis than the other at the expense of a lengthier program and presumably more computer time for solution. The choice between these two methods will depend

on the relative values attached to programmer's time and machine time and on the number of times the program is expected to be used.

The preparation of a computer program involves three more or less distinct stages, namely (1) Mathematical solution; (2) Flow diagram; and (3) Coding; but a decision taken at any one stage may be influenced by considerations relevant to any other. For the more complex programs, it may be necessary at some stage to reconsider an earlier stage, e. g. to reconsider the flow diagram as a result of some consideration that has arisen during the coding.

### *Mathematical Solution*

This stage is not only concerned with the statement of the mathematical solution in a formal sense, it also involves the preparation of an algorithm, i. e. a finite sequence of arithmetic operations, which will give numerical values for the solution. The algorithm chosen may well depend on the facilities associated with the particular computer to be used and here we have to look ahead to stage (3), the coding. There will be a library of subroutines for carrying out many of the more common operations available for any computer, and there will be a simple procedure for incorporating these subroutines in any program.

If the problem can be solved using standard subroutines the task of the programmer is considerably eased. He may have a choice of two or more methods and will decide between them on the basis of accuracy or time. For example, the paper by J. E. GOLDBERG, W. D. GLAUZ and A. V. SETLUR deals mainly with the mathematics of two different methods of analysis for folded plate structures. For both methods loads, displacements and tractions are represented by suitable Fourier series expansions and each harmonic is dealt with separately. Little is said about the actual programming, presumably because both methods are based largely on standard subroutines, namely, matrix operations in one case and the solution of systems of first order differential equations in the other.

It is usually possible to use some standard subroutines but the programmer may sometimes have to write the major part of the program himself. He must remember that he can possibly use a method of solution which could not be contemplated for hand solution, and that the coding of the method should be as simple as possible. With regard to this second point, the high speed of the computer can be utilised only because it is possible to write a program in such a way that nearly all instructions are obeyed many times during the execution of the program. This is made possible by a conditional jump instruction which interrupts the normal sequential selection of instructions when a certain condition is satisfied, and permits the use of either sub-routines or a loop of instructions, i. e. a sequence of instructions which is repeatedly obeyed for a certain number of cycles.

### *Flow Diagram*

The Flow Diagram shows the main groups of calculations and the way in which control passes from one to another during the execution of the program. The degree of detail may depend on the complexity of the program, the extent to which standard subroutines are used (since these may be included as units) and sometimes on the particular computer used.

H. KOJIMA and M. NARUOKA describe a program for the elastic analysis of plane steel frameworks which is essentially of the Livesley type except that the effects of axial loads in members is ignored. The organization of the program is clearly set out in a flow diagram which indicates, in particular, certain steps which depend on the particular computer used, namely the transfer of information between "internal" and "external" drums.

A machine time of 50 mins. is quoted for a frame having 18 joints and the stiffness matrix is stated to be of order  $45 \times 45$ . This suggests that a standard subroutine was used to invert the stiffness matrix in its entirety. However in problems of this type the stiffness matrix usually contains a large proportion of zero elements, the non-zero elements being concentrated around the main diagonal. The time required for the inversion of such matrices can be considerably reduced if account is taken of their special "banded" structure and subroutines which do this are now available on many computers. H. KRETZSCHMAR and H. MÜLLER achieve the same effect by using a 2-stage process for the solution of the equilibrium equations for a multi-storey framework when the effects of axial loads are taken into account.

The paper by W. MERCHANT and D. M. BROTON illustrates the use of more realistic assumptions in analysing the behaviour of certain structures — in this case the need to take into account the effects of the shortening of frame members due to bowing. This is introduced by means of a modified axial stiffness for each member and an iterative method of analysis is necessary since the effect is non-linear. A flow diagram for the program is given.

The preparation of a flow diagram will considerably assist in the subsequent coding of the program. It will indicate how the program can be broken down into routines and sub-routines and how these must be linked together by the master routine. Where alternative methods of computation are available it may help in choosing between them without having to consider the actual coding in detail.

### *Coding*

There are broadly speaking three methods of coding a program, namely, (1) machine code; (2) autocode; and (3) Algol. For a program written in machine code there is, for most of the program, a one-to-one correspondence between written instructions and the instructions which will eventually be stored in the computer. However, for autocodes or Algol, a written instruction will

usually correspond to a number of instructions in the computer store. Autocodes and Algol are similar in many respects, but they differ in that an autocode is written for a particular machine whereas Algol can be used on any computer with a sufficiently large storage capacity. This is made possible by writing a special program, called an Algol Compiler, for each computer which will read a program written in the Algol language and translate it into the particular machine instructions required to execute the program on that computer.

For programs which do not require the full storage capacity of the computer and which will not take a long time to run the quickly-learned autocode will probably be the most suitable method of coding. It is however less efficient than machine code, i. e. the program will take longer to run than would the same program written in machine code. Algol is less efficient than autocode and is probably more difficult to learn but it does not restrict the programmer to a particular computer. For more complex programs, the maximum efficiency to be derived from machine code may justify any additional effort that its use may involve, but programs based on it will usually be left to the expert programmer.

The number of programming languages and language variants has increased considerably in recent years and a committee of the International Organization for Standardisation is studying the possibility of standardising a limited number for various purposes.

#### *Special Examples*

The paper by J. FOUCRIAT indicates how the effective capacity of a small computer may be extended by a suitable choice of the method of analysis coupled with a division of the program into a number of stages, the output of each stage being used as the input for the next. Since input and output are relatively slow processes such a program will require much more machine time than one which can be carried out continuously but the method does enable a small computer to be used for a problem which would otherwise be beyond its capacity.

J. COURBON considers the analysis of a bridge consisting of a concrete slab supported by (identical) longitudinal beams only, the slab being assumed to act as a series of independent transverse beams. The main part of his paper is devoted to the derivation of a solution in series form, the loading having been expanded in a Fourier series.

The paper by R. LACROIX deals with rectangular grid frameworks in the analysis of which the torsional rigidity of the main beams is taken into account but that of the transverse beams is neglected. The problem is reduced to the solution of a set of linear equations of the banded type but it is not stated whether this feature is utilised in solving them. A program which determines the mutual reactions of the members has been written in the Fortran language for computers of moderate capacity.

## b) The Function and Use of Model Tests

### *General*

Model tests are being used increasingly by designers to check or replace some of the design calculations. Both static and dynamic tests can usefully be made, to give information on the probable behaviour of a structure at normal working loads or on the ultimate strength and mode of failure. The details of the test arrangements and of the model itself, including the material used in its construction, need careful consideration in relation to the primary purpose of the tests.

R. E. ROWE and B. C. BEST describe three tests which illustrate several points of importance. All three were made to help the designers on problems that could not readily be solved by calculation. In the first test, on a model of a prestressed concrete bridge of variable section and curved in plan, it was required to know the deflections and support reactions during construction, after adjustment of the reactions (necessary in practice to reduce certain critical bending moments), and as a result of live loading. It was reasonable to use Perspex for making this model, since the deflections and reactions are not sensitive to the value of Poisson's ratio, and only the elastic behaviour of the bridge was being examined.

In the second test, on a model of a continuous reinforced concrete slab bridge with edge stiffening, the designers wished to know the stresses and support reactions (on columns) corresponding to vehicular loading. Since the distribution of load depends on Poisson's ratio, it was necessary to make the model of concrete. To allow the strains to be increased (for greater ease and accuracy of measurement) without cracking and consequent loss of stiffness of the model, the concrete was prestressed in two directions; with this arrangement, the elastic behaviour of the bridge was investigated, it being assumed that this was the practical condition for a slab bridge with low working stresses.

The third model was of a bridge construction of precast concrete elements, joined by post-tensioned cables. The designers wished to check the ultimate strength characteristics of certain features of the design, and a reinforced and prestressed model of the relevant part of the bridge was therefore built, from one-twelfth scale precast units, using micro-concrete of the same quality as that of the concrete to be used in the actual structure. The test gave information not only on the ultimate strength of the structure, but also on the stresses before cracking (confirming the relevant part of the design calculations).

The tests on a model of a prestressed concrete box-girder bridge, described by V. MICHÁLEK and V. BŘEZINA, were required to give information on the spatial behaviour of the bridge, particularly for asymmetrical or transverse loading, in view of the omission of diaphragms or stiffening frames inside the box section. Since only the conditions (assumed elastic) at working loads were

to be examined, the model was made of PVC-N (polyvinylchloride hard) using low stresses for which it was shown that creep effects were negligible. The tests were made in a room kept at constant temperature and humidity.

Model tests are sometimes required to check a theoretical treatment of a problem and perhaps to provide corrections to the analytical results when the theory has ignored some feature that can, however, be introduced in the tests. An example of this is the test on a model of an asymmetric steel box girder made by R. DZIEWOLSKI to check a theoretical analysis of the torsional behaviour of this girder under load. The model was made in steel and the results indicated a *distribution* of stresses in accordance with the theory. The stresses were however 35 per cent less than the calculated values, the reduction being mainly attributable to the presence of diaphragms and stiffeners, the effect of which had not been included in the theory.

The tests described by G. K. JEWGRAFWO had a similar purpose. A model was made of part of a prestressed concrete trussed bridge-girder to check the analysis based on the elastic theory and to determine the effect of joint stiffness on crack formation. Subsidiary tests, to destruction, were made on larger-scale models of the joints. The test results were used to improve the design calculations, to help decide on the precise details of the joints, and to choose the most desirable erection procedure.

For some problems a model test is probably the most satisfactory (if not the only) way of obtaining a solution. The tests by E. FUMAGALLI on the interaction between a reinforced concrete tunnel liner and the surrounding rock or soil yielded information that could not easily have been obtained otherwise. The shape of the tunnel having been predetermined, the measurements of stresses and deformations in the model, for various loading conditions, provided the data required for final decisions about the necessary amount of reinforcement and the thickness of the concrete section to be provided.

### *Dynamic Tests*

The solution of many problems of dynamic behaviour of structures is also only practicable with the aid of model tests. Three papers deal with such problems. F. LEONHARDT describes dynamic tests on a model of a novel type of suspension bridge designed to eliminate aerodynamic instability by using a single suspension cable to carry the roadway by a series of diagonal cables, forming a cable-truss system. In model tests in a wind tunnel, the bridge was found to be stable under combined bending and torsion, but purely vertical oscillations required further consideration. These were eliminated by providing sheeting below the deck to give a closed hollow profile and complete aerodynamic stability was then obtained.

E. LAULETTA deals with the problem of the response of complex structures to earthquakes, and illustrates the solution of this problem by reference to

dynamic tests on a celluloid model of a tall building. The response of the structure to nearly stationary horizontal vibrations applied at its base was obtained from the tests. As LAULETTA points out, however, the model is still to be regarded as a calculating machine and the test results need to be suitably interpreted to relate them to the behaviour of actual structures subjected to actual earthquakes. A method of doing this is discussed in the paper.

A similar problem is considered by L. PŮST whose paper deals with model studies of the vibrations of framed structures. Checks were made (for simple examples) between the results of the tests and calculations, and then measurements were made on models of framed foundations for machines, vibrations being applied in a way simulating those that arise from the machines in practice. The influence of the soil stiffness on the behaviour of the machine foundation was also investigated.

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

#### *General*

The basic principles of a rational design philosophy can be stated very simply. The designer must satisfy himself that (1) the load that will cause failure of the structure is sufficiently greater than the working load so that the probability of failure during the required life of the structure is less than a specified limit; (2) for working load conditions throughout the required life the deformations of the structure are not such as to impair its safety or efficiency; and (3) economic considerations are given full attention, in regard to not only the initial cost but also that of maintenance and repair.

In the past the risk of structural failure has been largely controlled by the permissible stresses and assumed loadings in design codes. When experience has indicated that failures are rare for structures designed on one basis, it has seemed reasonable to increase the permissible stresses or reduce the assumed loads, or both. Such a process has certain merits but can be a hindrance to the application of new knowledge to design; the reasons for modifications to Codes of Practice tend to be forgotten and the actual margin of safety differs widely from one type of construction to another. This method must be regarded as irrational and will undoubtedly be replaced by a new approach within a few years.

A new rational design method should, to satisfy the first requirement set out above, specify (a) the loads that must be withstood by the structure, defined as precisely as possible in terms of their likelihood of occurring; (b) the methods of estimating the ultimate strength of the structure, including the statistical variation in this strength due to variation in the properties of the materials; and (c) the permissible degree of risk of collapse of the structure.



At present the data available on actual loadings are very few. Considerable research effort has been given to the determination of ultimate strength and its variability, but still much needs to be done. With regard to the acceptable degree of risk, there are difficult psychological and sociological problems involved which cannot easily be resolved. It is clear therefore that a design method based explicitly on ensuring a probability of failure less than a stated value is not yet practicable.

The second requirement, of avoiding excessive deformations (or cracking in concrete structures) for normal service conditions, can be satisfied if (a) the deformations (or crack widths) can be calculated sufficiently accurately and (b) permissible limits of deformation or cracking can be specified. Research is leading to a continuous improvement in the estimation of actual deformations, but little has so far been done scientifically to establish permissible limits, although several international organisations are studying the problem.

Economic considerations are largely matters for the judgment and experience of the designer and cannot at present be dealt with satisfactorily in design rules.

These and other difficulties of the various approaches to improved design processes have been considered by N. C. LIND, C. J. TURKSTRA and D. T. WRIGHT in a delightfully-written paper that deals with the general problem of safety, economy and rationality in structural design in a concise, objective and constructive way. They point out that the traditional design method is irrational and uneconomically conservative; that methods based on an acceptable probability of failure are impracticable with the limited data available on loadings and strengths; and that codes of practice tend to force even experienced engineers to over-design. An interesting proposal (not easily implemented) is put forward for improving the position; this involves systematic reductions of design loads in regular revisions of codes, and the monitoring of experience so that the reductions could be halted before "failure" rates become excessive. The codes could include two levels for the loads, the most up-to-date (lowest) values being chosen by competent designers whilst more conservative values might be more suitable for the less-experienced engineer.

Despite the difficulties of developing a wholly rational design procedure, many engineers feel that a more general improvement can be made than for design loads only, and most of the contributions to theme Ic relate to attempts to make such an improvement.

The use of a statistical approach that is being adopted in the revision of the French code for metallic structures is referred to in the paper by J. DUTHEIL. The basis for safety is that the yield stress (of value corresponding to some low probability of not being reached) must be not less than the sum of the stresses in any member due to various loads, these stresses being modified according to probability considerations. Each stress is first increased by a factor, appro-

priate to the type of load concerned, such that there is only a small probability that the stress, due to this particular load, could in practice be increased further. Where several loads (other than permanent loads) are considered to act together, the sum of the factored stresses is multiplied by a reduction factor to allow for the improbability of all the loads acting together with their individual maximum effects. Finally, the sum of all stresses so modified is multiplied by a factor which is commonly equal to unity, but is increased for very important structures or reduced for temporary structures.

With regard to column buckling, a uniform margin of safety is maintained by adopting for the ultimate strength, for any slenderness ratio, the value corresponding to a specified small probability of not being reached as determined by tests.

The author makes brief reference to redistribution of stresses and moments due to plasticity, and the need for logical methods of ensuring a uniform degree of safety when allowing for plasticity. He feels that many of the proposals for plastic design have created, because of their inadequacy, a climate of distrust which has not yet been entirely dissipated.

#### *Elastic and Plastic Design — Opposed or Complementary?*

Engineers can readily find arguments why a new design method is unacceptable, unsafe and premature, failing to consider at the same time the inaccuracy, irrationality, and lack of sound scientific basis of the old method. Although the basic design criteria set out at the beginning of this section clearly require consideration of the behaviour of a structure at working loads, when the conditions are largely elastic, and also of the behaviour of a structure at incipient failure, when the conditions usually include some plasticity, it is not always easy to convince designers that it is rational to include both types of action in his calculations.

A. HRENNIKOFF puts the case for elastic design in relation to *steel construction*. He agrees that basically both elastic and plastic methods are sound but contends that for practical design purposes the plastic design method has greater deficiencies than the elastic method. He suggests that plastic redistribution of stresses and moments can readily be allowed for by suitable adjustment of permissible stresses. But he feels that design related to conditions at failure, a basic feature of plastic design, is at present unsatisfactory in view of the great possibility of error in estimating failing loads. This is particularly the case for problems of lateral instability which become considerably more difficult when plasticity has to be considered.

The author comments also on the difficulties with regard to the effects of intermittent loading and the need to consider different distributions of the live load in the design of different members of the structure. He considers it unreasonable to ignore residual stresses produced by plastification of some

members under one distribution of loads, when estimating the behaviour of the structure under a different distribution.

Those who have pioneered the introduction of plastic design methods for steel structures have become increasingly aware of the need to consider elastic behaviour to ensure satisfactory behaviour under normal working loads and adequate safeguards against instability. With regard to the latter, M. R. HORNE has agreed \*) that there are dangers in using plastic theory in that phenomena associated with elastic and plastic deformations may be ignored. He suggests methods however whereby approximate assessments of elastic stability may be obtained with the use of rigid-plastic-rigid theory which allows for the degree of stability introduced by strain hardening. The estimates of elastic critical loads so obtained can then be used in the Rankine formula for obtaining satisfactory conservative estimates of the failing load of the structure.

In the design of *reinforced concrete frames* by plastic methods it is particularly necessary to check that the deformations at plastic hinges are not excessive, leading to premature failure, and Y. GUYON indicates one method of dealing with the problem. He shows that full moment redistribution between the ends and middle of a span of a beam would lead to incompatibility of hinge rotations at the supports and at mid-span, but that compatibility can be ensured if the sum of the average ultimate resistance moment at the supports and that at mid-span is at least equal to 1.06 times the maximum "free" moment due to the factored loads.

Having thus determined the *sum* of the span and support resistance moments, it is necessary to choose the individual values at the critical sections so that excessive cracking is avoided *at working loads*. The author shows that this can be done by limiting the amount of moment redistribution, although he indicates that more detailed study of the conditions of compatibility and serviceability can sometimes lead to greater economy.

A. MOREIRA DA ROCHA suggests for reinforced concrete bridge grillages an explicit combination of elastic and plastic design methods, the former for ensuring serviceability at working loads, and the latter for ensuring adequate safety against collapse. As a link between the results of the two methods, he proposes that the ultimate moments at plastic hinges should be proportional to the maximum moments determined from the elastic theory for working load conditions.

For checking serviceability at working loads, an approximate elastic analysis is sufficient for calculating the bending moments for these conditions. For checking safety against collapse a simple analysis is made, using virtual work methods, of the bending moments corresponding to the formation of appropriate plastic hinges in the grillage. In order to ensure that premature failure of one of the hinges does not occur before the envisaged final configuration at

---

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

failure, the rotations of the hinges are calculated and compared with the limits of rotation determined from tests. The dimensioning of the structure is made on the basis of the plastic conditions at failure, followed by checks on the steel and concrete stresses for the elastic conditions at working loads.

### *Variability of Factors Affecting Structural Safety*

Several contributors have considered problems of variability of the factors affecting structural safety. J. FERRY BORGES points out that the real behaviour of structures is represented by non-linear relationships. These are inconvenient for use directly in design, and it will probably be more useful to use non-linear analysis in more general design studies for defining the corrections to be introduced in the usual methods (elastic or plastic); he illustrates this approach by examples.

He considers that a fundamental need is to establish a satisfactory method of transforming the random character of the mechanical properties of materials into an assessment of the statistical variability of the behaviour of structures made with these materials. Although a general statistical theory for determining the random variability of structural behaviour is not yet available, typical solutions can be obtained by numerical investigations.

FERRY BORGES studies the probability of collapse of a structure as a function of the probability of its strength being less than a certain value and the probability that the load is greater than the same value. He shows that, when the variability of the load is small, the probability of collapse depends mainly on the variability of the structural behaviour; whereas for highly variable loads (wind or earthquakes) the probability of collapse depends essentially on the mean structural behaviour without being much influenced by the variability of this behaviour.

As stated earlier, design based explicitly on a selected probability of collapse is at present impracticable. Nevertheless, FERRY BORGES' studies will help to give the designer some indication of the relative importance of various factors involved in the resistance of structures to excessive deformation or collapse, and thus help him to exercise better judgment when considering the various parameters that are included in simplified structural safety calculations.

For the same reason, the paper by Z. SOBOTKA is to be welcomed, although the information it contains may not be of direct value to designers for a long time to come. He derives general formulae for the approximate calculation of the distribution of a function of several random variables, and illustrates the results by reference to the safety of a reinforced concrete slab, designed according to yield-line theory.

W. WIERZBICKI considers the probability of collapse of steel bridges and includes the effect of a variable dynamic stress increase due to moving loads.

The direct references to probabilities and their quantitative treatment appear to contain inconsistencies and may not be acceptable to designers. However the final formulae for determining the permissible stress indicate a primary feature of the semi-probabilistic approach, i. e. the inclusion of a stress-increase term corresponding to an assumed probability of unity that it will occur, together with a stress-increase term that corresponds to a chosen probability that it will not be exceeded. The first is clearly associated with non-random effects that may increase the stress, such as errors in design or construction, whilst the second relates to an increase of a randomly variable character, in this instance due to dynamic effects.

This distinction between random and non-random effects is of importance in the consideration of a rational approach to structural safety. Random effects can be treated statistically; non-random effects are best considered together and allowed for by means of a safety factor, chosen intuitively by the designer. A simple example is the strength of concrete, for which a "characteristic" strength may be chosen on a statistical basis to make allowance for the degree of quality control, but a partial safety factor is used to allow for reductions in strength due to non-random effects.

Although the difference between the concrete strength as indicated by test samples and the actual strength of the concrete in the structure is thus allowed for by a partial safety factor, it is desirable to obtain data that will enable the designer to choose this safety factor on a realistic basis. N. PETERSONS has investigated variations in the strength of concrete columns made in the laboratory and has also collected data from building sites on the actual strength of concrete in finished structures. He compares this strength with that of standard test specimens and with the specified value, and estimates the standard deviations of the ultimate strength of columns and beams, expressed as functions of the strength of concrete, the characteristics of the reinforcement, the eccentricity of loading and the dimensions of the cross-section. He found that, in a study of the relationships between the factor of safety or the risk of failure, on the one hand, and the different quantities by which it is influenced, on the other hand, it was not possible to take into account each of these quantities separately. It was possible however to determine the relative importance of various factors in relation to their effects on the variability of ultimate strength.

In view of the large number of parameters affecting structural safety, it is essential for practical design to group some parameters and to ignore others. For this purpose, a consideration of the relative importance of the various factors, and any change of this relativity with type of structure or of loading, is of value and further studies extending PETERSONS' results are desirable. The same problem has been dealt with by B. GILG, who classifies the factors that influence the safety of various types of dam construction, in regard to the importance of their variability.

#### d) Calculation of Space Structures

The papers submitted for Theme Id all deal with the analysis of space structures, but otherwise have little in common. Each contributes however to a general understanding of the approach to three-dimensional design and some have significance in relation to other parts of theme I.

J. MICHALOS and B. GROSSFIELD present a method of analysis for interconnected space frames of any configuration and orientation in space, subjected to any system of loading or deformations. An assumed solution, usually corresponding to complete restraint of joints common to individual branches, is corrected to remove the associated errors in statics. The correction involves the rotational and translational stiffnesses of all members in each reference direction, and is made with the help of matrices in which the stiffness coefficients are arranged.

E. R. BRYAN has investigated the effect of roof sheeting in stiffening intermediate frames of a pitched-roof portal shed. He has confirmed his analysis by tests on a full-scale shed and on laboratory models. The spread of intermediate frames is resisted by the sheeting, which acts like the web of a deep girder spanning between the stiff gable ends, and the bending moments in these frames are thus reduced. Tests indicated that no appreciable T-beam effect of the sheeting can be assumed for practical purposes, however.

B. KATO describes the stress analysis for a tower, consisting of an outer hyperboloidal net with a central shaft, subjected to lateral forces (such as seismic loads); and also the results of tests on a model of the tower. There was satisfactory agreement between the stresses observed in these tests and those calculated, except near the top of the tower. Suitable adjustments were therefore made, when using the analysis in the practical design, to allow for the effects at the top of the tower that were demonstrated in the model test.

R. DĄBROWSKI derives a solution for the analysis of a curved box girder, including the deformation of the cross-section. The analysis is in two parts: (1) the bending moments and torsional moments for the girder are determined on the assumption that the cross-section is restrained by means of frequent diaphragms; (2) the diaphragms are assumed to be removed and replaced by a corresponding balancing system of external forces which cause the shape of the section to change. The solution is analogous to that of a beam on an elastic foundation.

B. J. ULIZKIJ refers to the defects of the simplified methods commonly used for analysing bridge deck systems and puts forward proposals for a rigorous method of analysis in which these defects are avoided. The author's method consists basically of dividing the deck into longitudinal beam and slab elements, and setting up expressions for the equilibrium of internal forces and moments at each section.

## Rapport général

Dans un temps où le progrès va s'accéléralant, l'ingénieur constructeur reconsidère ses méthodes de calcul. L'avènement du calculateur digital électronique offre la possibilité d'une étude plus poussée et d'une analyse plus rigoureuse de problèmes que l'on ne pouvait jusqu'alors traiter que par l'artifice d'approximations simplificatrices. On peut maintenant, rapidement et facilement, étudier dans le détail le comportement de structures complexes pour des conditions très diverses de charge et de rigidité des éléments. On recourt de plus en plus aux essais sur modèle pour contrôler, compléter ou, même, remplacer l'étude théorique du comportement des constructions soumises à des sollicitations à la fois statiques et dynamiques. C'est la conception elle-même de la sécurité des constructions qu'on est en train de reconsidérer, et l'on revoit les règlements existants pour substituer à celles basées sur les contraintes admissibles des méthodes où l'on étudie le comportement des structures par rapport à divers états limites. Les mémoires qui ont été soumis au titre du Thème I contribueront tous à aider l'ingénieur à comprendre ce qui se passe dans cette révolution du calcul des structures.

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

Le mémoire de B. RAWLINGS, relatif au calcul des structures soumises à des charges dynamiques, illustre trois points importants qui intéressent l'emploi des calculateurs. Le premier concerne le fait que les calculateurs modernes permettent de résoudre nombre de problèmes difficiles sur une base plus réaliste que précédemment, sans qu'il soit nécessaire de recourir à tant d'hypothèses simplificatrices. Il en subsiste encore, par exemple l'auteur assimile l'acier à un matériau rigide-plastique quand les efforts dynamiques sont importants, mais on peut rapidement examiner les effets d'autres hypothèses sur le comportement prévu des structures complexes, et, de cette façon, on peut apprécier leurs mérites respectifs.

Le second point est que l'on peut souvent, à l'aide des mathématiques, ramener la résolution de tel problème à une suite d'opérations portant sur des matrices. On obtient facilement les sous-programmes correspondant aux opérations matricielles courantes pour la plupart des calculateurs, et la programmation des opérations elle-même revient presque uniquement à dresser la liste des opérations à effectuer dans l'ordre requis.

Le troisième point est qu'il peut y avoir plus d'une façon de programmer pour résoudre un problème donné à l'aide d'un calculateur. Dans le cas du problème de l'auteur, on propose deux méthodes, l'une d'elles comportant une analyse mathématique préliminaire qui est plus brève que celle requise par

l'autre, mais aux dépens du programme, qui est plus long, et du temps de machine, vraisemblablement plus long aussi. Le choix entre ces deux méthodes sera fonction de la valeur attachée d'une part au temps du programmeur et d'autre part à celui de la machine ainsi que de la fréquence d'utilisation vraisemblable du programme.

L'élaboration d'un programme comporte trois phases plus ou moins distinctes, à savoir: 1) formulation mathématique, 2) carte de flux, 3) codage; mais une décision prise dans l'une quelconque de ces phases peut être influencée par des considérations relatives à l'une des autres. Dans le cas de programmes complexes il peut arriver, au cours de l'une des phases, que l'on doive reconsidérer une phase antérieure, par exemple reconsidérer la carte de flux à la suite d'une difficulté se présentant dans le codage.

### *La formulation mathématique*

Cette étape ne concerne pas seulement l'expression mathématique du problème au sens formel, elle comprend aussi l'élaboration d'un algorithme, c'est-à-dire une suite finie d'opérations arithmétiques, qui fournira des valeurs numériques. Le choix de l'algorithme peut dépendre des caractéristiques du calculateur qu'on va utiliser, et, à ce propos, il nous faut nous reporter à la 3e phase, le codage. On aura une bibliothèque de sous-programmes pour l'exécution des opérations les plus courantes avec un calculateur quelconque et un procédé simple permettra l'incorporation de ces sous-programmes dans tout programme.

La tâche du programmeur se trouve grandement facilitée si l'on peut résoudre le problème au moyen de sous-programmes types. On peut avoir à choisir entre deux ou plusieurs méthodes et, dans ce cas, la décision sera prise en cherchant la meilleure précision ou le temps le plus court. Par exemple, le mémoire de J. E. GOLDBERG, W. D. GLAUZ et A. V. SETLUR traite, pour l'essentiel, de la partie mathématique de deux méthodes différentes de calcul des toits plissés. Dans les deux méthodes, on développe les charges, les déplacements et les tractions en série de Fourier et on traite séparément chaque harmonique. Il n'est dit que peu de choses de la programmation elle-même, sans doute parce que les deux méthodes sont, pour une grande part, basées sur des sous-programmes types, à savoir, dans un cas, sur le calcul matriciel et, dans l'autre, sur la résolution de systèmes d'équations différentielles du premier ordre.

Généralement il est possible d'utiliser quelques sous-programmes types, mais il arrive que le programmeur ait à écrire lui-même la plus grande partie du programme. Il doit avoir présent à l'esprit qu'il lui est loisible d'utiliser une méthode qu'il lui faudrait écarter s'il devait calculer manuellement et, d'autre part, que le codage de la méthode doit être aussi simple que possible. En ce qui concerne ce dernier point, ce n'est que parce que toutes les instructions sont suivies chacune plusieurs fois pendant l'exécution du programme que la rapidité du calculateur peut être mise à profit. On y pourvoit par une ins-



truction conditionnelle de renvoi qui, dès qu'une certaine condition est satisfaite, interrompt la séquence normale des instructions et permet d'utiliser des sous-programmes ou bien des cycles d'instructions, par exemple, l'exécution répétée d'une séquence un certain nombre de fois.

### *La carte de flux*

La carte de flux indique les principaux groupes de calculs et la façon selon laquelle le contrôle est assuré de l'un à l'autre pendant l'exécution du programme. Elle est plus ou moins détaillée selon la complexité du programme, l'utilisation qui est faite des sous-programmes (puisque ceux-ci peuvent être incorporés) et, parfois, le type de calculateur utilisé.

H. KOJIMA et M. NARUOKA décrivent un programme pour le calcul élastique d'ossatures métalliques planes qui, pour l'essentiel, est du type Livesley à ceci près qu'il n'est pas tenu compte des effets du second ordre dans les éléments. L'organisation du programme est clairement exposée dans une carte de flux qui fait ressortir, en particulier, certaines opérations qui dépendent du type de calculateur utilisé, notamment la transmission de l'information entre les tambours «interne» et «externe».

On indique un temps de machine de 50 min. pour une structure comportant 18 nœuds, et on a une matrice carrée d'ordre 45. On en déduit qu'on a eu recours à un sous-programme pour l'inversion de la matrice de rigidité tout entière. Toutefois, dans les problèmes de cette sorte, la matrice de rigidité contient une proportion importante d'éléments nuls, les éléments non nuls se concentrant autour de la diagonale principale. On peut réduire considérablement le temps nécessaire pour l'inversion de ces matrices si on tient compte de leur structure spéciale «étagée»; les sous-programmes pour cette opération existent maintenant sur de nombreux calculateurs. H. KRETZSCHMAR et H. MÜLLER obtiennent le même effet en utilisant un procédé en deux étapes pour résoudre les équations d'équilibre d'un portique étagé, en tenant compte des effets du second ordre.

Dans le mémoire de W. MERCHANT et D. M. BROTON, on trouve l'exemple d'hypothèses plus réalistes dans l'étude du comportement de certaines structures — ici, la nécessité de tenir compte des effets du raccourcissement des éléments dû à la courbure. Il y est pourvu en prenant, pour chaque élément, une rigidité axiale modifiée, et il est nécessaire de procéder par itérations dans le calcul en raison de la non-linéarité de l'effet. Il est donné une carte de flux pour le programme.

La préparation d'une carte de flux facilitera considérablement le codage ultérieur du programme. Elle indiquera comment fractionner le programme en séquences et en sous-séquences et comment les associer au moyen de la séquence maîtresse. Quand on a à choisir entre plusieurs méthodes de calcul, elle peut aider à le faire sans avoir à considérer le codage lui-même dans le détail.

*Le codage*

Il y a en gros trois méthodes pour coder un programme, à savoir: 1) un code de machine, 2) un autocode, 3) l'Algol. Dans un programme écrit dans le code de la machine, il existe, pour la plus grande partie du programme, une correspondance biunivoque entre les instructions écrites et les instructions qui seront mémorisées par le calculateur. En revanche, dans le cas des autocodes ou de l'Algol, une instruction écrite correspondra généralement à un certain nombre d'instructions dans la mémoire du calculateur. Les autocodes et l'Algol se ressemblent à beaucoup d'égards, mais ils diffèrent en ce qu'un autocode est écrit pour une machine particulière, tandis que l'Algol peut être utilisé sur tout calculateur ayant une mémoire de capacité suffisante. Cela est possible en écrivant un programme spécial, appelé «compilateur Algol», pour chaque calculateur, qui lira le programme écrit dans le langage Algol et le traduira en des instructions conformes au type de machine et permettant l'exécution du programme par ce calculateur.

Dans le cas de programmes qui ne requièrent pas la pleine capacité de mémoire du calculateur et dont l'exécution ne prend pas beaucoup de temps, c'est certainement l'autocode, rapidement appris, qui sera la méthode de codage la mieux appropriée. Toutefois, son efficacité est moindre que celle du code de machine, ainsi, par exemple, l'exécution du programme sera plus longue que s'il avait été écrit dans le code de la machine. L'Algol est moins efficace que l'autocode et est sans doute plus difficile à apprendre, mais il ne lie pas le programmeur à un type de calculateur. En présence de programmes plus complexes, l'efficacité maximum qu'autorise le code de machine peut justifier le travail supplémentaire que son emploi risque de demander, mais c'est au programmeur spécialiste qu'il faudra, la plupart du temps, confier les programmes écrits dans ce code.

Le nombre des langages de programmation et de leurs variantes s'est considérablement accru au cours de ces dernières années; une commission de l'Organisation Internationale de Normalisation étudie actuellement la possibilité de les limiter à un certain nombre en fonction des divers usages.

*Exemples particuliers*

Dans le mémoire de J. FOUCRIAT, il est montré comment la capacité théorique d'un petit calculateur peut se trouver en fait accrue par un choix judicieux de la méthode d'analyse et le fractionnement du programme en étapes successives, chaque sortie constituant l'entrée de la phase suivante. L'élaboration des résultats intermédiaires et leur réintroduction comme données sont des processus relativement lents, et un programme de cette sorte demandera donc beaucoup plus de temps que celui qui pourrait être exécuté de façon continue, mais l'avantage de cette méthode est de permettre l'utilisation d'un

petit calculateur dans le cas d'un problème qui, autrement, excéderait sa capacité.

J. COURBON considère le calcul d'un pont constitué d'une dalle en béton reposant seulement sur des poutres longitudinales (identiques), en assimilant la dalle à une infinité de poutres transversales indépendantes. La majeure partie de son mémoire est consacrée à la recherche d'une solution sous forme de série, la charge ayant été développée en série de Fourier.

Le mémoire de R. LACROIX traite de réseaux de poutres se croisant à angle droit; dans le calcul de ces réseaux, il est tenu compte de la rigidité de torsion des poutres-maîtresses mais non de celle des entretoises. Le problème se ramène à la résolution d'un système d'équations linéaires étagées sans qu'il soit dit si cette caractéristique est mise à profit pour résoudre le système. Un programme écrit dans le langage Fortran pour des calculateurs de capacité moyenne, permet d'obtenir les valeurs des réactions mutuelles des poutres.

## **b) Fonctions et emploi des essais sur modèles**

### *Généralités*

Les ingénieurs ont de plus en plus recours aux essais sur modèles pour contrôler ou remplacer une partie des calculs. On peut utilement exécuter des essais à la fois statiques et dynamiques pour étudier le comportement probable d'une structure soumise aux charges de service normales ou en évaluer la résistance à la ruine et déterminer le processus de rupture. Il importe, en ayant présent à l'esprit l'objet principal des essais, de prêter la plus grande attention aux détails des essais et au modèle lui-même, y compris le matériau utilisé.

R. E. ROWE et B. C. BEST décrivent trois essais qui illustrent plusieurs points de première importance. Chacun des essais a été fait en vue d'aider les ingénieurs dans des problèmes que le calcul ne permettrait pas de résoudre rapidement. Dans le premier essai, sur un modèle de pont courbe de section variable en béton précontraint, il s'agissait de déterminer les flèches et les réactions aux appuis pendant l'érection, après le réglage des réactions (nécessaire pour réduire certains moments fléchissants critiques) et sous l'effet des surcharges. Le modèle fut construit en plexiglas: rien ne s'y opposait puisque les flèches et les réactions ne dépendent que faiblement de la valeur du coefficient de Poisson et qu'on n'étudiait le comportement du pont que dans le domaine élastique.

Dans le second essai, exécuté sur un modèle de pont à dalle continue en béton armé et à bords raidis, les ingénieurs désiraient déterminer les contraintes et les réactions aux appuis (sur des colonnes) sous l'effet des surcharges. Il était nécessaire de faire le modèle en béton puisque la répartition des efforts

dépend du coefficient de Poisson. Le béton a été précontraint dans deux directions, de façon à permettre l'accroissement des contraintes (en vue de faciliter les mesures et d'obtenir une meilleure précision) sans formation de fissures, ni, par suite, perte de rigidité dans le modèle; c'est dans ces conditions qu'on a étudié le comportement du pont en élasticité, en considérant que c'était le domaine pratique de travail d'un pont à dalle soumis à de faibles tensions de service.

Le troisième modèle est celui d'un pont en béton constitué d'éléments préfabriqués reliés par des câbles précontraints. Les ingénieurs avaient en vue de contrôler les caractéristiques de la résistance à la rupture de certains éléments, et on a donc construit, pour la partie intéressée du pont et à l'aide de microbéton de même qualité que le béton devant servir à la construction elle-même, un modèle armé et précontraint constitué d'éléments préfabriqués à l'échelle 1/12. L'essai permit de mieux connaître non seulement la résistance à la rupture de l'ouvrage mais aussi les contraintes en jeu avant la fissuration (et confirma les calculs correspondants).

Les essais exécutés sur un modèle de pont à poutre-caisson en béton précontraint, décrits par V. MICHÁLEK et V. BŘEZINA visaient à renseigner sur le comportement du pont dans l'espace, notamment dans le cas de charges asymétriques ou transversales, en vue de supprimer les diaphragmes ou les cadres raidisseurs à l'intérieur des caissons. Comme seules les conditions (supposées élastiques) aux charges de travail devaient être étudiées, on fit un modèle en PVC-N (chlorure polyvinylique dur) en appliquant des efforts limités pour lesquels il a été montré que les effets de fluage sont négligeables. Les essais furent exécutés dans un local à température et humidité maintenues constantes.

Les essais sur modèles ont parfois pour but de contrôler l'étude théorique d'un problème et de permettre éventuellement de corriger les résultats du calcul lorsque la théorie n'a pas tenu compte de certaines particularités qu'en revanche il est possible de faire intervenir dans les essais. Un exemple en est l'essai exécuté par R. DZIEWOLSKI sur un modèle de poutre-caisson métallique asymétrique pour contrôler le calcul du comportement à la torsion de cette poutre chargée. Le modèle était en acier et les résultats indiquèrent une *répartition* des contraintes en accord avec la théorie. Leur valeur était toutefois de 35% inférieure aux valeurs calculées, cette réduction étant principalement due à la présence de diaphragmes et de raidisseurs dont l'effet n'avait pas été pris en compte dans le calcul.

L'objet des essais décrits par G. K. JEWGRAFOW était similaire. Le modèle était une partie de poutre de pont en treillis en béton précontraint et l'on se proposait de contrôler le calcul élastique et de mettre en évidence l'effet de la rigidité des nœuds sur la formation des fissures. On a exécuté des essais complémentaires, à la rupture, sur des modèles de nœuds réalisés à une échelle supérieure. On a mis à profit les résultats des essais pour améliorer les calculs,

faciliter le choix des détails des nœuds et déterminer le meilleur procédé de montage.

Pour certains problèmes, c'est très certainement l'essai sur modèle qui constitue la façon la plus satisfaisante (si ce n'est la seule) d'obtenir une solution. Les essais de E. FUMAGALLI sur les interactions entre le revêtement en béton armé d'un tunnel et le rocher et le sol environnants ont fourni des indications qu'il n'aurait pas été facile d'obtenir autrement. La section du tunnel ayant été préalablement déterminée, les mesures des contraintes et des déformations effectuées sur le modèle, pour diverses conditions de charges, ont fourni les données dont il fallait disposer pour prendre les décisions définitives quant à l'épaisseur du revêtement en béton à réaliser et au pourcentage d'armatures.

### *Essais dynamiques*

De nombreux problèmes relatifs au comportement dynamique des structures ne peuvent également être étudiés que par des essais sur modèles. Trois mémoires traitent de problèmes de cette sorte. F. LEONHARDT décrit des essais dynamiques sur un modèle de pont suspendu d'un nouveau type, étudié pour éliminer l'instabilité aérodynamique en utilisant un seul câble porteur supportant la chaussée par l'intermédiaire de suspentes inclinées formant une triangulation. Au cours des essais exécutés en soufflerie sur le modèle, on constata la stabilité du pont sous des efforts combinés de torsion et de flexion mais le problème des oscillations purement verticales n'était pas résolu. On les supprima au moyen de tôle sous le tablier pour former un profil creux fermé et la stabilité aérodynamique se trouva complètement réalisée.

E. LAULETTA considère le problème du comportement des structures complexes soumises à un tremblement de terre et en indique la solution en se rapportant à des essais dynamiques sur le modèle en celluloïde d'un immeuble de grande hauteur. Les essais permirent de déterminer le comportement de la structure sous des vibrations horizontales presque stationnaires appliquées à ses fondations. Toutefois, ainsi que M. LAULETTA le remarque, il ne faut encore considérer le modèle que comme une machine à calculer, et les résultats des essais demandent à être convenablement interprétés pour rendre compte du comportement de structures réelles soumises aux effets de tremblements de terre réels. Le mémoire expose une méthode permettant cette interprétation.

L. PŮST aborde un problème similaire dans son mémoire, qui traite de l'étude, sur des modèles, des vibrations dans des ouvrages en forme de portiques. On a exécuté un contrôle (dans des cas simples) entre les résultats des essais et le calcul et on a effectué des mesures sur des modèles de socles de machine en forme de cadre, en appliquant des vibrations pour simuler les conditions réelles de fonctionnement de la machine. On a également étudié l'influence de l'élasticité du sol sur le comportement du socle.

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

#### *Généralités*

On peut énoncer de façon très simple les principes d'une philosophie rationnelle de la conception en matière de construction. L'ingénieur doit s'assurer de trois choses: 1<sup>o</sup> que la charge de rupture excède suffisamment la charge de service pour que la probabilité de ruine au cours du temps de service prévu reste inférieure à une limite imposée; 2<sup>o</sup> que pour les conditions de charge auxquelles l'ouvrage sera soumis pendant son temps de service, les déformations qui se produiront ne pourront compromettre sa sécurité ni affecter ses conditions d'utilisation; 3<sup>o</sup> que toute l'attention souhaitable est donnée aux questions économiques, non seulement en ce qui concerne l'investissement initial mais également en matière d'entretien et de réparations.

Dans le passé, on obviait aux risques de ruine principalement en fixant dans les règlements les contraintes admissibles et les charges imposées. Quand l'expérience montrait que les ruptures étaient rares dans les ouvrages calculés sur une certaine base, il semblait raisonnable d'augmenter les contraintes admissibles ou de réduire les charges réglementaires, ou de faire les deux. Ce procédé a certains avantages mais peut constituer un obstacle à l'application des nouvelles acquisitions de la technique; on tend à oublier les raisons qui ont provoqué une modification des règlements et la marge réelle de sécurité diffère grandement d'un type d'ouvrage à l'autre. Cette méthode doit être tenue pour irrationnelle et elle sera certainement complètement remplacée d'ici quelques années.

Une méthode nouvelle et rationnelle devrait, pour satisfaire aux premières conditions exposées ci-dessus, préciser les points suivants: a) charges devant être supportées par l'ouvrage, définies aussi précisément que possible en fonction de leur probabilité, b) méthodes d'estimation de la résistance limite de l'ouvrage, y compris la variation statistique de cette résistance du fait de la dispersion des propriétés des matériaux, c) risque de ruine admissible.

Actuellement on ne possède que très peu de données sur les charges réelles. De nombreuses recherches ont été consacrées à la détermination de la résistance limite et de sa variabilité, mais il y a encore beaucoup à faire. En ce qui concerne les risques admissibles, des problèmes difficiles d'ordre psychologique et d'ordre sociologique se posent, qu'il n'est pas aisé de résoudre. Il apparaît donc clairement qu'il n'est pas encore possible de pratiquer une méthode de calcul explicitement basée sur la garantie d'une probabilité de ruine inférieure à une valeur donnée.

La seconde condition, qui consiste à éviter des déformations excessives (ou la fissuration dans les ouvrages en béton) sous les charges de service normales, peut être satisfaite si: a) on peut calculer les déformations (ou l'ouverture des fissures) avec une précision suffisante et si: b) il est possible de spécifier les

limites admissibles de déformation ou de fissuration. Grâce aux recherches qui sont faites, l'estimation des déformations réelles ne cesse de devenir plus précise mais, bien que plusieurs organisations internationales étudient le problème, on n'a encore fait que peu de choses, sur une base scientifique, pour établir des limites admissibles.

Les considérations économiques sont des questions qui font largement appel au jugement et à l'expérience de l'ingénieur, et aucun procédé d'étude ne peut actuellement en tenir compte d'une manière satisfaisante.

Ces difficultés, ainsi que d'autres, liées aux diverses tentatives faites pour améliorer les méthodes d'étude, ont été étudiées par N. C. LIND, C. J. TURKSTRA et D. T. WRIGHT dans un mémoire rédigé avec beaucoup d'humour qui traite avec objectivité, concision et d'une façon constructive de la sécurité, de l'économie et de la rationalité dans le calcul des ouvrages. Ils mettent en évidence l'aspect irrationnel et anti-économiquement conservateur de la méthode traditionnelle, signalent que, en raison des données restreintes dont on dispose sur les résistances et sur les charges, il est impossible d'appliquer des méthodes basées sur une probabilité admissible de ruine, et font ressortir que les règlements obligent les ingénieurs même expérimentés à surdimensionner leurs ouvrages. Une proposition intéressante (dont la mise en œuvre ne serait pas facile) est formulée en vue d'améliorer la situation ; elle implique des réductions systématiques des hypothèses de charges lors de révisions régulières des règlements, et le contrôle de l'expérience de façon à arrêter les réductions avant que la proportion de « ruptures » ne devienne excessive. Les règlements pourraient définir deux niveaux de charges, les valeurs les plus « modernes » (les plus basses) étant retenues par les ingénieurs éprouvés tandis que des valeurs plus prudentes pourraient mieux convenir pour l'ingénieur de moins d'expérience.

En dépit des difficultés que présente l'élaboration d'une conception d'étude parfaitement rationnelle, nombreux sont les ingénieurs qui estiment qu'il est possible d'apporter une amélioration plus générale que celle intéressant uniquement les hypothèses de charges, et c'est à des tentatives ayant cette amélioration générale pour objet que se rapportent la plupart des contributions au Thème Ic.

Le mémoire de J. DUTHEIL traite de l'emploi de la statistique dans la révision en cours du règlement français pour les constructions métalliques. La sécurité s'exprime par le fait que la limite élastique (dont la probabilité intégrale est suffisamment faible) doit ne pas être inférieure à la somme des contraintes dues aux diverses charges dans chacun des éléments, ces contraintes étant pondérées en fonction des probabilités. Chaque contrainte est d'abord majorée par l'application d'un facteur propre au type de charge considéré et tel qu'il n'existe qu'une faible probabilité que la contrainte due à cette charge particulière puisse, dans la réalité, prendre une valeur supérieure. Lorsque l'on considère que plusieurs charges (autres que les charges permanentes) agissent simultanément, la somme des contraintes en jeu est multipliée par un coefficient

de réduction tenant compte de l'improbabilité d'une simultanéité de chacune des charges, à leur valeur maximale. Enfin, cette somme ainsi modifiée est encore multipliée par un facteur qui, généralement, est égal à l'unité mais qu'on prend supérieur à 1 pour les ouvrages très importants et inférieur à 1 pour des constructions provisoires.

En ce qui concerne le flambement, on conserve une marge uniforme de sécurité en prenant comme valeur de la résistance limite pour tout coefficient d'élançement, celle correspondant, à la lumière des essais, à une probabilité donnée, suffisamment faible.

L'auteur mentionne la redistribution des contraintes et des moments due à la plasticité et indique combien il serait nécessaire de disposer de méthodes logiques, permettant de réaliser sûrement une sécurité uniforme quand la plasticité est prise en compte. Il estime que bon nombre de méthodes préconisées pour le calcul en plasticité ont créé, par leur insuffisance, un climat de défiance qui ne s'est pas encore totalement dissipé.

#### *Le calcul élastique et le calcul plastique — Contradictoires ou complémentaires?*

S'ils omettent de tenir en même temps compte de l'imprécision, du caractère irrationnel et de l'absence de base scientifique saine que présente l'ancienne méthode, les ingénieurs trouveront aisément des arguments pour montrer qu'une nouvelle méthode de calcul est inacceptable, hasardeuse et encore insuffisante. Bien que les bases de calcul définies au début de ce chapitre comportent clairement l'étude du comportement de l'ouvrage soumis aux charges de service, dans un domaine largement élastique, et aussi celle de son comportement au début de la rupture, où une plastification partielle se manifeste généralement, il n'est pas toujours facile de convaincre les ingénieurs qu'il est rationnel d'inclure ces deux sortes d'effets dans leurs calculs.

Le problème est traité par A. HRENNIKOFF à propos du calcul élastique en *construction métallique*. Pour lui, les deux méthodes plastique et élastique ont des bases saines mais il soutient que, dans le calcul pratique, le calcul plastique présente des insuffisances plus importantes que la méthode élastique. Il avance l'idée selon laquelle, au moyen d'une adaptation convenable des tensions admissibles, on pourrait facilement tenir compte de la redistribution des tensions et des moments due à la plastification. Mais, en raison des possibilités d'erreurs importantes que présente l'estimation des charges de rupture, il estime que le calcul à la rupture, caractéristique du calcul plastique, ne peut être tenu pour satisfaisant en l'état actuel. Ceci est tout particulièrement vrai en ce qui concerne l'instabilité latérale, qui pose des problèmes beaucoup plus difficiles dès qu'il faut tenir compte de la plasticité.

L'auteur aborde également les difficultés concernant les effets des charges intermittentes et la nécessité de considérer différentes répartitions des surcharges dans le calcul des divers éléments de l'ouvrage. Il lui apparaît déraison-



nable d'ignorer les contraintes résiduelles dues à la plastification de certains éléments sous telle distribution des charges quand on étudie le comportement de l'ouvrage sous telle autre.

Ceux qui ont frayé le chemin des méthodes de calcul en plasticité des constructions métalliques ont pris de plus en plus nettement conscience de la nécessité de considérer le comportement élastique pour obtenir un bon comportement sous les charges de service normales et prévenir l'instabilité avec suffisamment de sécurité. En ce qui concerne cette dernière question, M. R. HORNE a admis\*) que le recours à la théorie plastique présente des dangers du fait de l'ignorance en laquelle on peut tenir certains processus liés aux déformations élastiques et plastiques. Il propose cependant des méthodes permettant d'évaluer de façon approximative la stabilité élastique à l'aide de la théorie rigide—plastique—rigide qui tient compte du degré de stabilité dû à l'érouissage. On peut alors, à partir de l'estimation des charges élastiques critiques ainsi obtenue, appliquer la formule de Rankine pour avoir une estimation prudente de la charge de ruine de l'ouvrage.

Dans le calcul des *ossatures en béton armé*, il est tout particulièrement important de vérifier que les déformations aux articulations plastiques ne sont pas excessives, de nature à provoquer prématurément la ruine, et Y. GUYON indique une méthode permettant de traiter le problème. Il montre qu'une redistribution totale des moments entre les extrémités et le milieu de la travée d'une poutre rendrait incompatibles les rotations des rotules aux appuis et à mi-travée mais qu'on pourra être certain de la compatibilité si la somme du moment de rupture moyen sur appuis et du moment à mi-travée est supérieure ou égale à 1,06 fois le moment isostatique maximum sous charges majorées.

Après avoir ainsi déterminé la *somme* des moments résistants sur appuis et en travée, il est nécessaire de choisir aux sections critiques des valeurs telles qu'il n'y ait pas de fissuration excessive sous l'effet des *charges de service*. L'auteur montre qu'on peut le faire en limitant la redistribution des moments, tout en faisant ressortir l'intérêt que pourrait avoir parfois, au point de vue économique, une étude plus détaillée des conditions de compatibilité et de serviceabilité.

A propos des réseaux de poutres dans les ponts en béton armé, A. MOREIRA DA ROCHA propose une combinaison précise des méthodes élastique et plastique, la première pour assurer la serviceabilité sous les charges de service et la seconde, une sécurité satisfaisante à la ruine. Comme liaison entre les résultats des deux méthodes, il suggère de prendre des moments résistants aux rotules plastiques proportionnels aux moments maximums calculés élastiquement pour les conditions des charges de service.

Pour contrôler la serviceabilité sous les charges de service, il suffit d'un calcul élastique approché pour déterminer les moments de flexion dans ces

---

\*) L'article du Professeur Horne est publié dans les «Mémoires», vol. 23.

conditions. Pour contrôler la sécurité à la ruine on détermine simplement, par la méthode des travaux virtuels, les moments fléchissants correspondant à la formation de rotules plastiques appropriées dans le réseau. Pour s'assurer que la rupture d'une des rotules n'interviendra pas prématurément, avant la réalisation de la configuration finale de rupture prévue, on calcule les rotations des rotules et on les compare aux rotations limites déterminées par les essais. Le dimensionnement de l'ouvrage est basé sur les conditions plastiques à la ruine et on contrôle ensuite les contraintes de l'acier et du béton dans les conditions élastiques, pour les charges de service.

### *La variabilité des facteurs affectant la sécurité des ouvrages*

Plusieurs auteurs ont traité des problèmes de variabilité des facteurs affectant la sécurité des ouvrages. J. FERRY BORGES fait ressortir que ce sont des relations non linéaires qui représentent le comportement réel des ouvrages. Il n'est pas commode de les utiliser directement dans le calcul, et il sera sans doute plus avantageux d'appliquer l'analyse non-linéaire dans des recherches de caractère plus général pour définir les corrections à faire intervenir dans les méthodes usuelles (élastiques ou plastiques); des exemples sont présentés à titre d'illustration.

L'auteur estime qu'il est absolument nécessaire d'élaborer une méthode satisfaisante pour passer du caractère aléatoire des propriétés mécaniques des matériaux à une estimation de la variabilité statistique du comportement des ouvrages construits avec ces matériaux. Il n'existe pas encore de théorie statistique générale pour déterminer la variabilité aléatoire du comportement des structures, mais on peut obtenir des solutions particulières par le calcul numérique.

M. FERRY BORGES étudie la probabilité de ruine d'un ouvrage en fonction de la probabilité que sa résistance soit inférieure à une certaine valeur et de celle que la charge soit supérieure à cette même valeur. Il montre que, si les variations statistiques de la charge sont faibles, la probabilité de ruine dépend principalement de la variabilité du comportement de la structure; tandis que dans le cas de sollicitations présentant de fortes variations (vent ou tremblement de terre), la probabilité de ruine dépend essentiellement du comportement moyen de l'ouvrage sans être grandement influencée par la variabilité de ce comportement.

Comme il a été dit précédemment, le calcul basé fondamentalement sur un risque déterminé de ruine est actuellement impraticable. Néanmoins, les recherches de M. FERRY BORGES contribueront à mieux informer l'ingénieur quant à l'importance relative des divers facteurs affectant la résistance des structures à des déformations excessives ou à la rupture, et l'aideront ainsi à pouvoir mieux apprécier les divers paramètres qui entrent dans les calculs simplifiés de la sécurité des ouvrages.

Pour la même raison, on accueillera avec faveur le mémoire de Z. SOBOTKA, bien que son contenu ne puisse être directement utilisé par les ingénieurs pendant encore longtemps. L'auteur établit des formules générales pour le calcul approché de la distribution d'une fonction de plusieurs variables aléatoires et illustre les résultats obtenus en se rapportant à la sécurité d'une dalle en béton armé, calculée d'après la théorie des lignes de rupture.

W. WIERZBICKI considère la probabilité de ruine de ponts métalliques en tenant compte de l'influence de la variation du coefficient dynamique dû à l'effet des surcharges. Le recours direct aux probabilités et leur exploitation numérique semblent être parfois inconséquents et peuvent paraître inacceptables aux ingénieurs. Pourtant, les formules finales servant à déterminer les contraintes admissibles montrent une propriété essentielle de la méthode semi-probabiliste: elles contiennent un terme majorant les contraintes qui correspond à une probabilité d'existence sous-entendue égale à l'unité, et un terme de majoration qui correspond à une probabilité déterminée de non-dépassement. Il est clair que le premier se rapporte à des effets non aléatoires qui peuvent accroître les contraintes, par exemple des erreurs dans le calcul ou la construction, tandis que le second concerne l'accroissement d'un facteur qui est une variable aléatoire, dû à des effets dynamiques dans le cas présent.

Cette distinction entre effets aléatoires et non aléatoires a une grande importance quand on envisage une conception rationnelle de la sécurité des structures. Les effets aléatoires sont justiciables d'un traitement statistique; on tient mieux compte, globalement, des effets non aléatoires au moyen d'un coefficient de sécurité fixé intuitivement par l'ingénieur. Un exemple simple en est la résistance du béton, pour lequel on peut, sur une base statistique, fixer une résistance «caractéristique» afin de tenir compte de l'efficacité du contrôle de qualité, mais pour lequel également on applique un coefficient de sécurité partiel pour prendre en compte les réductions de résistance dues aux effets non aléatoires.

Bien que l'on prenne ainsi en compte, au moyen d'un coefficient de sécurité partiel, la différence qui existe entre la résistance du béton telle qu'elle ressort des essais sur échantillons et la résistance effective du béton de l'ouvrage, il est souhaitable qu'on puisse disposer de données permettant à l'ingénieur de fixer ce coefficient de sécurité sur une base concrète. N. PETERSONS a fait des recherches sur les variations de la résistance de piliers en béton fabriqués au laboratoire et a également, sur des chantiers, réuni des informations sur la résistance réelle du béton dans des ouvrages terminés. Il compare cette résistance à celle mesurée sur éprouvette et à la valeur prescrite, et estime l'écart-type de la distribution de la résistance limite de piliers et de poutres, en fonction de la résistance du béton, des caractéristiques des armatures, de l'excentricité des charges et des dimensions des sections. Il a constaté qu'en étudiant les relations entre le coefficient de sécurité ou le risque de rupture et les divers facteurs qui influent sur lui, il n'était pas possible de prendre en compte chacun

de ces facteurs séparément. Il était possible, en revanche, de déterminer l'importance relative de divers facteurs par rapport à leurs effets sur la variabilité de la résistance limite.

En raison du grand nombre de paramètres qui entrent en jeu dans la sécurité des structures, il importe, en pratique, de grouper certains d'entre eux et d'en écarter d'autres. A cet effet, la considération de l'importance relative des divers facteurs et de son rapport éventuel au type de structure ou de chargement présente un grand intérêt, et il est souhaitable que d'autres recherches viennent développer les résultats obtenus par M. PETERSONS. Le même problème a été traité par B. GILG, qui effectue une classification des facteurs, influant sur la sécurité de barrages de divers types, en fonction de l'importance de leur variabilité.

#### d) Calcul tridimensionnel des structures

Tous les mémoires relatifs au Thème Id traitent du calcul tridimensionnel des structures mais, à part cela, ont peu de choses en commun. Néanmoins chacun contribue à la compréhension de la conception générale du calcul tridimensionnel, et certains intéressent également d'autres rubriques du Thème I.

J. MICHALOS et B. GROSSFIELD exposent une méthode de calcul des ossatures tridimensionnelles solidaires, de toute configuration et orientation dans l'espace, soumises à un système quelconque de charges ou de déformations. Une solution provisoire, qu'on obtient généralement en empêchant tout mouvement des nœuds communs aux divers rameaux, est ensuite corrigée pour supprimer les erreurs ainsi commises. Cette correction fait intervenir les rigidités de rotation et de translation de tous les éléments dans chacune des directions de référence, et elle est faite à l'aide de matrices dont les éléments sont les coefficients de rigidité.

E. R. BRYAN a étudié l'effet de la couverture en tôle d'une halle, sur le comportement des portiques intermédiaires. Il a confirmé les résultats de ses calculs par des essais sur une halle à l'échelle normale et sur des modèles au laboratoire. La couverture s'oppose au déplacement latéral des portiques intermédiaires, en agissant comme l'âme d'une poutre de grande hauteur reliant les pignons; les moments fléchissants se trouvent ainsi réduits dans ces portiques. Il ressort des essais que dans la pratique on ne peut par contre pas compter sur une collaboration directe de la couverture à la résistance des traverses (effet de poutre en T).

B. KATO décrit le calcul des contraintes dans une tour, constituée d'une nappe extérieure en hyperboloïde et d'un puits central, soumise à des efforts latéraux (charges sismiques, par exemple); et il présente aussi les résultats d'essais effectués sur un modèle de la tour. On a constaté une concordance satisfaisante entre les contraintes observées dans ces essais et celles mises en évidence par le calcul, sauf à proximité du sommet de la tour. On a donc

pratiqué l'adaptation appropriée, dans l'étude définitive, pour prendre en compte les effets se développant au sommet de la tour, tels que les essais les avaient fait ressortir.

R. DABROWSKI expose le calcul d'une poutre-caisson courbe en tenant compte de la déformation des sections. Le calcul comprend deux parties: 1<sup>o</sup> on détermine les moments de flexion et de torsion dans la poutre en supposant la section rendue indéformable par de nombreux diaphragmes, 2<sup>o</sup> on supprime les diaphragmes et on les remplace par un système compensateur de forces extérieures provoquant la déformation de la section. Le calcul est analogue à celui d'une poutre sur fondation élastique.

B. J. ULIZKIJ traite des insuffisances des méthodes simplifiées communément utilisées pour le calcul des systèmes de tablier de pont et propose une méthode rigoureuse de calcul ne comportant pas ces insuffisances. La méthode de l'auteur consiste essentiellement à décomposer le tablier en poutres longitudinales et éléments de dalle et à établir les relations d'équilibre des forces intérieures et des moments dans chaque section.

## Generalbericht

In einer Zeit beschleunigten Fortschrittes muß der konstruierende Ingenieur seine Berechnungsverfahren neu überdenken. Das Erscheinen programmgesteuerter elektronischer Rechengerate bringt die Möglichkeit einer eingehenderen und strengeren Untersuchung von Problemen mit sich, die bis anhin ohne einschneidende Vereinfachungen kaum behandelt werden konnten. Heute kann das Verhalten komplizierter Konstruktionen mit beliebig veränderlichen Steifigkeiten in den verschiedenen Tragelementen und unter einer Vielzahl möglicher Lastfälle innert kürzester Zeit und mit großer Genauigkeit ermittelt werden. Auf der andern Seite findet der Modellversuch wachsende Verbreitung zur Prüfung, Ergänzung oder sogar zum völligen Ersatz analytischer Untersuchungen, und zwar sowohl bei statischen als auch bei dynamischen Beanspruchungen. Schließlich gilt es, den Sicherheitsbegriff unserer Bauwerke neu zu überprüfen, und man geht daran, die althergebrachten, auf zulässigen Spannungen aufgebauten Bemessungsverfahren durch Betrachtungsweisen von kritischen Grenzzuständen zu ersetzen oder zumindest zu ergänzen. Alle unter dem Thema I erscheinenden Abhandlungen wollen den konstruierenden Ingenieur mit der einen oder andern dieser umwälzenden Erscheinungen vertrauter machen.

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

Der Artikel von B. RAWLINGS über Bauwerke unter Stoßbeanspruchung deckt drei wichtige Gesichtspunkte bei der Anwendung elektronischer Rechengeräte auf. Erstens bieten diese Geräte die Möglichkeit, komplizierte Aufgaben praktisch ohne vereinfachende und vergrößernde Annahmen anzugehen. Die verbleibenden Vereinfachungen betreffen vor allem das Materialverhalten. So setzt der Verfasser beispielsweise für den Stahl ideal-plastisches Verhalten voraus. Da der Einfluß andersgearteter Materialcharakteristiken jedoch ebenfalls überprüft werden kann, ergeben sich wertvolle Vergleichsmöglichkeiten.

Zweitens gelangt man zum Erkenntnis, daß die Lösung einer Aufgabe vom mathematischen Standpunkt aus oft auf eine Folge von Matrix-Operationen führt. Unterprogramme für die gebräuchlichen Matrix-Operationen sind nun aber für die meisten Rechengерäte leicht erhältlich, so daß sich die Programmierarbeit für solche Aufgaben mehr oder weniger auf ein Hintereinanderschalten vorhandener Unterprogramme in der richtigen Reihenfolge reduziert.

Drittens bleibt zu bemerken, daß für die Programmierung ein und derselben Aufgabe mehrere Wege offen stehen. Für die vom Verfasser behandelte Aufgabe werden zwei Verfahren angegeben, wobei das eine weniger mathematische Vorbereitungsarbeit erfordert, dafür auf ein umfangreicheres Programm mit vermutlich wesentlich größeren Rechenzeiten führt. Die Wahl zwischen den beiden Möglichkeiten hängt ab von der Bewertung der Programmier- und Maschinenzeit sowie von der voraussichtlichen Verwendungshäufigkeit des Programmes.

Die Vorbereitung eines Rechenprogramms geschieht in drei mehr oder weniger ausgeprägten Schritten, nämlich in der mathematischen Lösung (1), in der Erstellung des Flußdiagrammes (2) und im Kodieren (Verschlüsseln) (3). Eine Entscheidung in irgend einem dieser Schritte kann aber durch Rücksichten auf einen der andern beeinflußt sein. So kann es sich in komplizierteren Programmen in einem bestimmten Zeitpunkt als notwendig erweisen, auf frühere Schritte zurückzukommen und beispielsweise das Flußdiagramm auf Grund von Feststellungen während des Kodierens zu überarbeiten.

#### *Mathematische Lösung*

Diese Stufe betrifft nicht nur die mathematische Lösung im formalen Sinn, sondern auch die Angabe eines Algorithmus, d. h. einer bestimmten endlichen Folge von arithmetischen Operationen, welche auf die numerischen Werte für die Lösung führen. Die Wahl des Algorithmus kann von den Möglichkeiten des in Aussicht genommenen Rechengерätes abhängen, und wir haben bereits hier Stufe 3, das Kodieren, ins Auge zu fassen. Für jedes Rechengерät (Computer) bestehen Bibliotheken von Unterprogrammen für die gebräuchlichen

mathematischen Operationen, und diese Unterprogramme lassen sich auf einfache Weise in den Gesamtablauf einbauen.

Wenn ein Problem mit schon vorhandenen Unterprogrammen allein gelöst werden kann, so erleichtert dies die Aufgabe des Programmierers ganz wesentlich. Er kann zwischen zwei oder mehreren Methoden zu wählen haben und wird sich auf Grund von Genauigkeits- oder Rentabilitätsbetrachtungen entscheiden. So befaßt sich die Abhandlung von J. E. GOLDBERG, W. G. GLAUZ und A. V. SETLUR hauptsächlich mit der Eignung zweier verschiedener mathematischer Methoden zur Berechnung von Faltwerkkonstruktionen. In beiden Verfahren werden Lasten, Verschiebungen und Spannungen durch passende Fourierreihen dargestellt, und jede Harmonische wird getrennt angegeben. Über das eigentliche Programmieren wird wenig gesagt, wahrscheinlich weil sich beide Methoden auf Standard-Unterprogramme stützen, nämlich Matrix-Operationen im einen und Auflösung von Systemen linearer Differentialgleichungen erster Ordnung im andern Fall.

In der Regel werden einige Standard-Unterprogramme verwendet werden können, aber der Programmierer wird doch oft den größten Teil des Programms selbst zu schreiben haben. Er muß sich bewußt sein, daß er auch Methoden verwenden darf, welche für eine Handrechnung außer Betracht fallen, und daß das Kodieren so einfach wie möglich sein soll. In bezug auf diesen letzten Punkt ist zu bemerken, daß die große Geschwindigkeit der Rechengenäte nur dort voll ausgenützt werden kann, wo fast alle Instruktionen im Ablauf einer Rechnung viele Male durchlaufen werden. Dies wird möglich durch bedingte Sprungbefehle, welche den normalen Ablauf unterbrechen, sobald eine bestimmte Bedingung erfüllt ist, und dann entweder den Gebrauch von Unterprogrammen oder aber von Schleifen, d. h. von mehrfach durchlaufenen Befehlsfolgen, anordnen.

### *Flußdiagramm*

Das Flußdiagramm zeigt die Hauptteile der Rechnung und veranschaulicht den Ablauf des Programms. Die Ausführlichkeit der Angaben kann vom Aufbau des Programms, vom Ausmaß der Verwendung von Unterprogrammen (die als Einheiten in Erscheinung treten) und gegebenenfalls vom vorgesehenen Gerätetyp abhängen.

H. KOJIMA und M. NARUOKA beschreiben ein Programm für elastische, ebene Stahlrahmen, worin der Einfluß der Normalkräfte vernachlässigt wird. Der Aufbau des Programms ist im Flußdiagramm übersichtlich dargestellt, welches insbesondere den Austausch von Daten zwischen den „inneren“ und „äußeren“ Trommeln wiedergibt, als Besonderheit des hier zur Anwendung gelangenden Rechengenätes.

Für einen Rahmen mit 18 Knoten und einer Steifigkeitsmatrix der Ordnung  $45 \times 45$  wird eine Maschinenzeit von 45 Minuten angegeben. Dies läßt vermuten,

daß ein Standard-Unterprogramm für die Inversion der vollen Matrix verwendet wird. Indessen enthält die Matrix in Problemen dieser Art normalerweise eine große Anzahl von Null-Elementen, wobei sich die nicht verschwindenden Elemente in der Regel um die Hauptdiagonale konzentrieren.

Die für die Inversion solcher Matrizen erforderliche Rechenzeit kann beträchtlich herabgesetzt werden, wenn diese „Bandstruktur“ berücksichtigt wird, und Unterprogramme, die dies tun, sind für viele Rechengenäte erhältlich. H. KRETSCHMAR und H. MÜLLER erreichen dieselbe Wirkung durch einen 2-Stufen-Aufbau zur Lösung der Gleichgewichtsgleichungen für einen mehrstöckigen Rahmen unter Berücksichtigung der Axialkräfte.

Der Artikel von W. MERCHANT und D. M. BROTON veranschaulicht den Einsatz verfeinerter Methoden bei der Untersuchung gewisser Systeme — in diesem Falle die Notwendigkeit, der Verkürzung von Rahmenelementen infolge Krümmung Rechnung zu tragen. Dieser Effekt wird durch eine modifizierte axiale Stabsteifigkeit für jedes Element berücksichtigt, was auf ein iteratives Berechnungsverfahren führt, da das Problem nicht mehr linear ist. Das Flußdiagramm wird angegeben.

Ein gut aufgestelltes Flußdiagramm ist eine beträchtliche Hilfe für das nachfolgende Kodieren. Es zeigt, wie sich das Programm aus Teilen und Unterprogrammen zusammensetzt, wie diese miteinander verbunden sind und hilft oft bei der Auswahl verschiedener Lösungswege, ohne detailliertere Betrachtungen über das Kodieren notwendig zu machen.

### *Das Kodieren*

Es gibt, etwas verallgemeinert gesprochen, drei Möglichkeiten des Kodierens, nämlich (1) in Maschinensprache, (2) mit Übersetzungsprogrammen (Auto-Code) und (3) in Algol. Bei einem in Maschinensprache geschriebenen Programm besteht für dessen größten Teil eine eindeutige Zuordnung zwischen geschriebenen und in der Maschine gespeicherten Befehlen. Beim Übersetzungsprogramm und beim Algol andererseits kann einer geschriebenen Instruktion eine ganze Reihe von Befehlen im Speicher entsprechen. Übersetzungsprogramme und Algol entsprechen sich in manchen Beziehungen, aber sie unterscheiden sich dadurch, daß jene für einen ganz bestimmten Maschinentyp geschrieben, während diese für jeden Computer mit genügend großem Speicherraum verwendbar sind. Dies wird möglich durch Vorschalten eines sog. «Algol-Compilers», welcher ein in Algol geschriebenes Programm lesen und in die spezifische Maschinensprache übersetzen kann.

Für Programme, welche nicht die volle Speicherkapazität erfordern und nicht viel Rechenzeit beanspruchen, dürfte der leicht erlernbare Autocode die angebrachte Kodier-Methode bilden. Er ist indessen weniger «wirksam», d. h. das Programm braucht für dieselbe Rechnung mehr Maschinenzeit als ein Programm in Maschinensprache. Algol ist nochmals weniger wirksam als die



Übersetzungsprogramme; es dürfte auch schwieriger zu erlernen sein, bindet aber den Programmierer nicht an einen bestimmten Maschinentyp.

Die größere Wirtschaftlichkeit, welche sich durch Verwendung der Maschinensprache erreichen läßt, mag bei sehr anspruchsvollen Programmen jeden zusätzlichen Aufwand rechtfertigen. Die Erstellung solcher Programme bleibt indessen den Spezialisten vorbehalten.

Die Zahl der Programmiersprachen und deren Varianten hat in letzter Zeit stark zugenommen. Ein Komitee des Internationalen Normenausschusses prüft gegenwärtig die Möglichkeit einer Beschränkung auf eine den verschiedenen Bedürfnissen angepaßte Anzahl.

### *Besondere Anwendungsbeispiele*

Die Abhandlung von J. FOUCRIAT zeigt, in welchem Maße die Kapazität einer kleinen Rechenanlage durch eine geschickte Wahl der Lösungsmethode, verbunden mit einem stufenweisen Aufbau des Programms gesteigert werden kann. Die Ausgabedaten der einen Stufe werden als Eingabedaten für die nächste Stufe verwendet. Da Ausgabe und Eingabe verhältnismäßig langsam ablaufen, wird ein solches Programm ziemlich viel Rechenzeit beanspruchen. Dagegen kann man sich damit an Aufgaben heranwagen, die sonst die Kapazität einer verfügbaren Anlage übersteigen würden.

J. COURBON untersucht eine Brückenplatte aus Eisenbeton, welche allein durch identische Längsträger gestützt wird. Die Wirkung der Platte wird ersetzt gedacht durch unabhängig wirkende Querträger. Der Hauptteil dieser Abhandlung ist der Herleitung einer Lösung in Reihenform gewidmet, wobei die Belastung in Fourierreihen entwickelt wird.

Der Artikel von R. LACROIX befaßt sich mit rechteckigen Balkenrosten, bei welchen die Torsionssteifigkeit der Längsträger berücksichtigt, die der Querträger indessen vernachlässigt wird. Die Aufgabe wird zurückgeführt auf die Lösung eines Gleichungssystems mit «Bandstruktur», wobei indessen nicht angegeben wird, ob man sich diese Eigenschaft bei der Lösung zu Nutzen macht. Für die gegenseitige Beeinflussung der Träger wird in der Fortran-Sprache ein Programm aufgestellt, bestimmt für den Einsatz von Rechengeräten mit mittlerer Speicherfähigkeit.

## **b) Bedeutung und Anwendung von Modellversuchen**

### *Allgemeines*

Immer mehr gelangen Modellversuche zur Anwendung mit dem Zweck, Teile der Berechnungen zu überprüfen oder zu ersetzen. Es können statische und dynamische Probleme anhand von Modellversuchen studiert werden, und zwar sowohl was das Verhalten der Bauwerke im Gebrauchs- als auch im

Bruchzustand anbetrifft. Dies bedingt allerdings, daß man die Einzelheiten der Versuchseinrichtung, einschließlich Materialwahl und Konstruktionsart, peinlich genau auf den verfolgten Versuchszweck abstimmt.

R. E. ROWE und B. C. BEST beschreiben drei Versuche, welche verschiedene Punkte von grundsätzlicher Bedeutung hervortreten lassen. Alle drei Versuche betreffen Probleme, die sich einer rechnerischen Behandlung entziehen. Im ersten wird eine im Grundriß gekrümmte Spannbetonbrücke mit veränderlichem Querschnitt untersucht, und zwar im Hinblick auf die im Bauzustand auftretenden Durchbiegungen und Auflagerreaktionen, nach Ausregulierung der Lager (zur Vermeidung gewisser Momentenspitzen), und schließlich unter Einwirkung der Nutzlast. In diesem Fall war Perspex als Modellbaustoff angezeigt, da Durchbiegungen und Auflagerreaktionen nur wenig von der Querdehnungszahl abhängen und im weiteren nur das elastische Verhalten des Bauwerks im Gebrauchszustand interessierte.

Im zweiten Modellversuch, einer durchlaufenden Stahlbetonplattenbrücke mit Randversteifungen, wollten die Verfasser Aufschluß über die Spannungen und Auflagerdrücke (auf Stützen) unter Fahrzeug-Belastung erhalten. Da die Lastverteilung durch die Querdehnungszahl beeinflußt wird, mußte das Modell aus Beton hergestellt werden. Um größere Dehnungen zu erhalten (zum Zwecke einer Steigerung der Meßgenauigkeit) ohne Risse zu riskieren, wurde das Modell in zwei Richtungen vorgespannt. Mit dieser Versuchseinrichtung konnte das elastische Verhalten der unter niedrigen Spannungen arbeitenden Brücke untersucht werden.

Der dritte Versuch galt einer Brückenkonstruktion aus vorgefertigten Spannbetonelementen, welche mittels durchgehender Kabel nachträglich zusammengespannt werden. Die Verfasser wünschten Aufschluß über das Verhalten des Bauwerks im Bruchzustand und damit eine Kontrollmöglichkeit ihrer angestellten Berechnungen zu erhalten. Es wurde deshalb ein charakteristischer Brückenausschnitt im Maßstab 1 : 12 abgebildet, unter ähnlicher Reduktion der Korngrößen in den Zuschlagstoffen des verwendeten Betons und unter Anpassung der respektiven Materialfestigkeiten. Dieser Versuch gab nicht nur Aufschluß über die Bruchlast selbst, sondern auch über die Spannungsverteilung vor und während des Rissestadiums und bestätigte im wesentlichen die rechnerisch ermittelten Werte.

Der Versuch über eine Spannbetonbrücke mit Kastenquerschnitt, von den Verfassern V. MICHÁLEK und V. BŘEZINA beschrieben, galt dem räumlichen Tragverhalten der Brücke, insbesondere unter einseitigen und in Querrichtung angreifenden Lasten, und dies im Hinblick auf ein Weglassen von Querträgern oder andern aussteifenden Verbänden. Da nur der (elastisch vorausgesetzte) Gebrauchszustand interessiert, ist das Modell aus Hart-PVC hergestellt worden, welches zudem im Bereich niedriger Spannungen arbeitet, wo die Kriechwirkungen vernachlässigbar sind. Die Versuche wurden in einem Raum mit konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit durchgeführt.

Öfters werden Modellversuche dort angewendet, wo es gilt, über die Wirkung von in der Theorie vernachlässigten Einflüssen Aufschluß zu erhalten. Ein solches Beispiel beschreibt R. DZIEWOLSKI, der einen theoretischen Ansatz zur Berechnung eines unsymmetrischen Stahlkastenträgers (insbesondere seines Torsionsverhaltens) anhand eines Modellversuchs überprüft hat. Das Modell wurde aus Stahl gebaut, und die Ergebnisse zeigten eine mit der Theorie in Übereinstimmung stehende Spannungsverteilung. Die absoluten Werte der Spannungen andererseits lagen ca. 35% tiefer als theoretisch berechnet, was auf die aussteifende und in der Theorie nicht berücksichtigte Wirkung von Querscheiben und Aussteifungen zurückzuführen ist.

Der von G. K. JEWGRAFW beschriebene Versuch verfolgt einen ähnlichen Zweck. Von einem Fachwerk aus Spannbeton wurde ein Modell angefertigt in der Absicht, die rechnerischen Grundlagen sowie den Einfluß der Steifigkeit der Verbindungen auf das Rissebild zu überprüfen. Daneben liefen Hilfsversuche in größerem Maßstab zur Abklärung der Bruchfestigkeit der Knoten. Die Meßergebnisse dienten der Überprüfung der Berechnung, der konstruktiven Entwicklung günstiger Knotenformen sowie der Wahl des bestmöglichen Montagevorganges.

Für manche Aufgabe stellt der Modellversuch das am besten geeignete (wenn nicht einzig mögliche) Vorgehen zur Abklärung des Kräftespiels dar. Der Versuch von E. FUMAGALLI über das Zusammenwirken eines Stahlbetongewölbes mit dem umgebenden Fels oder Boden zeitigte Ergebnisse, die auf anderem Wege kaum erhältlich wären. Da die Form des Tunnels zum vornherein feststand, lieferten die Meßergebnisse, unter Berücksichtigung verschiedener Lastfälle, alle notwendigen Angaben zur Bemessung der erforderlichen Betonstärken und Bewehrungsquerschnitte.

### *Dynamische Versuche*

Auch bei der Abklärung des dynamischen Verhaltens von Bauwerken ist öfters ohne Modellversuch nicht auszukommen. Hierüber liegen drei Abhandlungen vor. F. LEONHARDT beschreibt dynamische Versuche am Modell eines neuartigen Hängebrückentyps. Diese Versuche galten dem Ausschalten von aerodynamischen Unstabilitäten bei Verwendung eines einzigen Hauptkabels mit diagonal verlaufenden Hängestangen zur Befestigung der Fahrbahn. Die im Windkanal durchgeführten Versuche zeigten, daß die Brücke unter kombinierter Biege- und Torsionsbeanspruchung stabil war, dagegen traten beachtliche Vertikal-Schwingungen auf. Diese wurden eliminiert durch Anbringen eines dünnen Bleches unter der Fahrbahn, was zu einem geschlossenen Hohlkasten führt, so daß schließlich volle aerodynamische Stabilität vorliegt.

E. LAULETTA befaßt sich mit der Wirkung von Erdbeben auf Bauwerke und veranschaulicht die Lösung dieses Problems am Celluloid-Modell eines Hochhauses. Aus diesem Versuch ging die Wirkung nahezu stationärer und

an der Basis wirkender horizontaler Vibrationen auf das Gebäude hervor. Immerhin weist der Verfasser selbst darauf hin, daß es sich bei diesem Versuch gewissermaßen nur um ein Analogierechengerät handelt und daß das Übertragen der Ergebnisse auf das Verhalten wirklicher Bauwerke unter der Einwirkung tatsächlicher Erdbeben nur unter Vorbehalt geschehen kann. Hiezu wird ein Verfahren entwickelt.

L. PŪST untersucht ein ähnliches Problem, nämlich Schwingungen von Rahmentragwerken. In einfacheren Fällen werden die Ergebnisse des Modellversuchs den rechnerisch gefundenen Werten gegenübergestellt. Die Modellversuche betreffen auch aufgelöste Konstruktionen von Maschinenfundamenten, wobei die entsprechenden Maschinenschwingungen durch Simulatoren aufgebracht werden; hier wird zudem untersucht, wie sich die Steifigkeit des Untergrundes auf das Schwingungsverhalten auswirkt.

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

*Allgemeines*

Die Grundsätze einer vernünftigen Bemessungskunst lassen sich einfach formulieren. Der Statiker muß sich überzeugen, daß (1) die Last, unter welcher das Bauwerk zusammenbricht, genügend größer ist als die Gebrauchslasten, so daß die Wahrscheinlichkeit eines Einsturzes während des für die Benützung vorgesehenen Zeitraumes unterhalb einer festgesetzten Grenze bleibt; (2) die Verformungen des Tragwerkes dürfen unter Gebrauchslasten gewisse zulässige Werte nicht übersteigen, so daß weder die Sicherheit noch die Brauchbarkeit des Tragwerks in Frage gestellt werden; (3) den Erfordernissen der Wirtschaftlichkeit ist unter Berücksichtigung der oben gesetzten Grenzen voll Genüge zu tun, und zwar sowohl was die Gestehungs- als auch was die Unterhaltskosten anbetrifft.

Früher wurde das Risiko eines Einsturzes weitgehend auf Grund angenommener Lasten und zulässiger Spannungen beurteilt. Hatte sich auf Grund gesammelter Erfahrungen herausgestellt, daß eine gewisse Berechnungsweise übermäßige Reserven in sich schloß, so schien es angezeigt, entweder die zulässigen Spannungen hinauf- oder die üblichen Belastungsannahmen herabzusetzen, oder beides. Dieses Verfahren ist nicht ohne Verdienste, doch kann es ein Hindernis darstellen auf dem Wege zur Anwendung neuer Erkenntnisse. Die Gründe für Änderungen der Vorschriften können leicht in Vergessenheit geraten, und es ergeben sich für die verschiedenen Konstruktionstypen stark voneinander abweichende Sicherheiten. So muß dieses Verfahren heute als un-

befriedigend angesehen und damit gerechnet werden, daß es schon in wenigen Jahren durch eine neue Betrachtungsweise ersetzt wird.

Eine neue, leistungsfähige Bemessungsmethode sollte, um der ersten der oben erwähnten Forderungen Genüge zu tun, (a) die vom Tragwerk zu übernehmenden Lasten, einschließlich die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens, möglichst genau erfassen; (b) Verfahren zum zuverlässigen Bestimmen der Bruchlast unter Berücksichtigung der möglichen Schwankungen in den Materialfestigkeiten entwickeln und (c) das zulässige Einsturzrisiko eines Tragwerkes festsetzen.

Über Angaben zur Festsetzung der auftretenden Lasten liegen noch wenig Untersuchungen vor. Mit der Bestimmung von Bruchlasten und ihrer Streuungen haben sich dagegen schon viele Forscher befaßt, doch bleibt auch hier noch vieles zu tun. Bei der Festsetzung eines annehmbaren Einsturzrisikos schließlich stellen sich schwierige psychologische und soziale Probleme, die nicht leicht überwunden werden können. Hieraus erhellt eindeutig, daß ein Bemessungsverfahren, das ausdrücklich auf Einhalten einer unter einem festgelegten Wert liegenden Bruchwahrscheinlichkeit aufgebaut ist, noch nicht genügt.

Die zweite Forderung, welche auf eine Begrenzung der Verformungen (oder der Risse in Betonkonstruktionen) ausgeht, ist dann erfüllbar, wenn es (a) gelingt, die auftretenden Verformungen (oder Rißbreiten) genügend genau zu bestimmen und wenn sich (b) zulässige Verformungen (bzw. Rißbreiten) angeben lassen. Auf Grund verfeinerter Berechnungsweisen lassen sich die auftretenden Verformungen und Rißbilder zuverlässiger erfassen; dagegen fehlt es noch weitgehend an wissenschaftlichen Untersuchungen zur Angabe zulässiger Schranken, obschon diese Probleme heute von verschiedenen internationalen Organisationen studiert werden.

Die Überlegungen wirtschaftlicher Art schließlich entspringen ausschließlich dem Urteilsvermögen des Konstrukteurs und lassen sich nicht in Bemessungsregeln zwingen.

Diese und andere Schwierigkeiten auf dem Wege zu verfeinerten Bemessungsweisen werden uns in einer ausgezeichnet verfaßten Abhandlung von N. C. LIND, C. J. TURKSTRA und D. T. WRIGHT vorgeführt. Sie befaßten sich in objektiver, knapper und konstruktiver Weise mit den Problemen der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit im Bauwesen. Die Verfasser heben hervor, daß das hergebrachte Bemessungsverfahren unwirklich und unwirtschaftlich ist; daß andererseits, beim heutigen Stand der Erkenntnisse über Lastannahmen und Materialeigenschaften, nur auf einer zulässigen Bruchwahrscheinlichkeit aufgebaute Verfahren nicht zu genügen vermögen und daß die praktischen Bemessungsregeln selbst erfahrene Ingenieure zu einem oft übermäßigen Berechnungsaufwand zwingen. Ein interessanter (aber nicht leicht zu handhabender) Vorschlag sieht eine systematische Vereinfachung der Belastungsannahmen in den Normen vor, welche allerdings, um Rückschläge zu vermeiden, einer ein-

gehenden Überwachung durch die Praxis bedürfen. Für die Lastannahmen sollten in den Normen zwei verschiedene Stufen vorgesehen werden, nämlich eine untere (niedrigere) Stufe für kompetente und eine höhere für weniger erfahrene Statiker.

Trotz den Schwierigkeiten, die sich einem umfassenden und einheitlichen Bemessungsverfahren entgegenstellen, verspüren doch viele Forscher, daß tiefergreifendere Verbesserungen notwendig sind als nur Anpassungen der Belastungsannahmen, und so widmen sich denn auch die meisten unter dem Thema Ic erschienenen Abhandlungen solchen allgemeineren Verbesserungsvorschlägen.

Im Artikel von J. DUTHEIL wird über die statistischen Annäherungen, die in den französischen Stahlbaunormen Eingang gefunden haben, berichtet. Als Bemessungsgrundlage gilt die Forderung, wonach die Fließspannung höher sein muß als die Summe der unter Gebrauchslasten auftretenden Spannungen, welche ihrerseits auf Grund von Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen angemessen erhöht werden. Wo verschiedene Lasten (außer Eigengewicht) zusammenwirken, wird zudem ein Reduktionsfaktor eingeführt, welcher der geringen Wahrscheinlichkeit eines gleichzeitigen Auftretens aller ungünstigen Einflüsse Rechnung trägt. Schließlich werden die dergestalt ermittelten «Vergleichsspannungen» noch mit einem Faktor multipliziert, der normalerweise gleich der Einheit ist, aber für sehr wichtige Bauwerke oder für provisorische Bauten angemessen erhöht bzw. herabgesetzt werden kann.

Im Hinblick auf das Ausknicken von Stützen wird durch Festsetzen eines vom Schlankheitsgrad abhängigen und durch Versuche überprüften Sicherheitsgrades eine einheitliche Bemessungsweise erreicht.

Der Verfasser weist kurz auf Spannungsumlagerungen infolge Plastizität und auf das Bedürfnis nach logischen und im Sicherheitsgrad einheitlichen Bemessungsverfahren unter Würdigung auch dieser Erscheinungen hin. Er spürt, daß verschiedene Vorschläge zu plastischen Berechnungsweisen ihrer Unausgewogenheit wegen ein gewisses Mißtrauen gesät haben, das noch nicht ganz überwunden ist.

### *Elastische und plastische Berechnungsweisen — Gegensatz oder Ergänzung?*

Es fällt nicht schwer, Argumente gegen ein neues Berechnungsverfahren zu finden und dieses als unsicher und verfrüht abzustempeln, wenn man das Ungenügen und den Mangel an solider wissenschaftlicher Basis der alten Methode übersieht. Obwohl die eingangs erwähnten, grundlegenden Kriterien sowohl das Verhalten des Bauwerks im weitgehend elastischen Gebrauchszustand als auch den Grenzzustand beginnenden Versagens bei teilweiser Plastifizierung berücksichtigen, fällt es nicht immer leicht, die Statiker von der Notwendigkeit *beider* Betrachtungsweisen zu überzeugen.

A. HRENNIKOFF untersucht die elastische Berechnungsmethode mit Bezug

auf Stahlkonstruktionen. Er anerkennt, daß sowohl das elastische als auch das plastische Berechnungsverfahren zu vernünftigen Ergebnissen führen, bestreitet aber den Vorrang des letzt- gegenüber dem erstgenannten. Er schlägt vor, die plastischen Spannungsumlagerungen durch entsprechende Anpassung der zulässigen Spannungen in Anschlag zu bringen. Indessen spürt auch er, daß eine nur auf die Untersuchung des Bruchzustandes abgestützte Berechnungsweise — infolge der großen Streuung der Bruchlasten — nicht zu befriedigen vermag. Dies zeigt sich insbesondere bei Stabilitätsproblemen, wie dem Kippen von Trägern, die wesentlich verwickelter werden, wenn Plastifizierungserscheinungen zu berücksichtigen sind.

Der Verfasser weist auch auf die Schwierigkeiten beim Erfassen der Wirkung von Wechsellasten hin. Ferner erkennt er die Notwendigkeit, den Restspannungen, die nach der Plastifizierung zurückbleiben, bei erneuter Belastung des Tragwerks Rechnung zu tragen.

Gerade die Pioniere, die den plastischen Berechnungsweisen im Stahlbau zum Durchbruch verholfen, werden sich immer mehr der Notwendigkeit bewußt, die elastischen Berechnungsweisen ebenfalls heranzuziehen, um ein vernünftiges Verhalten im Gebrauchszustand und eine angemessene Sicherheit gegen Instabilwerden sicherzustellen. M. R. HORNE weist auf Gefahren bei der Verwendung plastischer Berechnungsweisen hin, welche den auftretenden Verformungen keine Beachtung schenken. Er schlägt Verfahren vor, welche ein Abschätzen der elastischen Stabilität gestatten, unter Voraussetzung eines starr-plastisch-starren Materialverhaltens zur Berücksichtigung des Verfestigungsbereiches. Die so bestimmten kritischen elastischen Lasten können dann in die Rankine-Formel eingeführt werden, womit man zu einer genügend vorsichtigen Abschätzung des Tragvermögens einer Konstruktion gelangt.

In der Berechnung von Stahlbetonrahmen nach der Plastizitätstheorie ist es sehr wichtig zu prüfen, ob in den plastischen Gelenken nicht übermäßige Verformungen entstehen und einen vorzeitigen Bruch erzeugen können. Y. GUYON befaßt sich mit diesem Problem. Er zeigt, daß die Annahme eines vollständigen Momentenausgleichs zwischen Auflagerquerschnitten und Feldmitte zu einer Unverträglichkeit der auftretenden Gelenkrotationen führt, daß diese Verformungen jedoch verträglich werden, wenn die Summe der mittleren Bruchmomente in den Auflagerquerschnitten und in der Feldmitte mindestens dem 1,06fachen Betrag des größten «freien» Momentes unter den mit Sicherheitsfaktoren behafteten Gebrauchslasten entspricht.

Ist so die zulässige Momentensumme zwischen Auflager und Feldmitte bestimmt, so bleibt nur noch nachzuweisen, daß in den einzelnen Schnitten die auftretenden Momente zu keiner übermäßigen Rißbildung unter Gebrauchslasten führen. Der Verfasser führt diesen Nachweis durch eine Beschränkung des zulässigen Momentenausgleichs, läßt aber durchblicken, daß hier auf Grund eingehenderer Untersuchungen der Verträglichkeits- und Brauchbarkeitsbedingungen oft wirtschaftlichere Lösungen gefunden werden könnten.

A. MOREIRA DA ROCHA schlägt für Trägerrostbrücken aus Stahlbeton eine kombiniert elastisch-plastische Berechnungsweise vor. Diese soll sowohl ein vernünftiges Verhalten im Gebrauchszustand als auch eine genügende Bruch-sicherheit gewährleisten. Als Bindeglied zwischen den beiden Berechnungs-weisen steht die Forderung, daß die in den plastischen Gelenken auftretenden Grenzmomente proportional zu den unter Gebrauchslasten entstehenden Momenten angesetzt werden sollen.

Zur Überprüfung des Verhaltens im Gebrauchszustand genügt eine vereinfachte Berechnung nach der Elastizitätstheorie. Zur Überprüfung der Bruch-sicherheit werden einfache Energiebetrachtungen auf Grund passend gewählter plastischer Gelenke herangezogen. Um ein vorzeitiges Versagen eines einzelnen Gelenkes vor Eintreten der endgültigen Bruchfigur zu vermeiden, werden die auftretenden Gelenkrotationen berechnet und mit Versuchsergebnissen ver-glichen. Die Bemessung des Tragwerks erfolgt schließlich auf Grund der Plastizitätsbedingungen im Bruchzustand, ergänzt durch eine Überprüfung der im elastisch vorausgesetzten Gebrauchszustand im Stahl und im Beton auftretenden Spannungen.

#### *Die Veränderlichkeit der die Tragwerkssicherheit beeinflussenden Faktoren*

Verschiedene Beiträge befassen sich mit dem Einfluß der verschiedenen Faktoren auf die Tragwerkssicherheit. J. FERRY BORGES weist darauf hin, daß das tatsächliche Verhalten von Tragwerken durch nichtlineare Beziehungen gesteuert wird. Diese eignen sich nicht für eine direkte Anwendung in der Praxis, und es scheint eher angezeigt, auf Grund vertiefter und allgemein gehaltener Untersuchungen Korrekturfaktoren herzuleiten, welche die herge-brachten (elastischen oder plastischen) Berechnungsmethoden zu verfeinern gestatten; ein Beispiel erläutert diese Gedankengänge.

Der Verfasser findet, daß die dem Zufall unterworfenen mechanischen Eigenschaften der Baumaterialien in statistisch klar erfaßbare Aussagen für das damit errichtete Bauwerk umgedeutet werden müssen. Eine allgemein verwendbare statistische Theorie des Tragverhaltens liegt indessen noch nicht vor; in einfacheren Fällen lassen sich auf numerischem Wege Lösungen finden.

FERRY BORGES untersucht die Wahrscheinlichkeit des Einsturzes eines Trag-werkes auf Grund der Streuung der Materialfestigkeiten einerseits und der Wahrscheinlichkeit im Auftreten der zugrunde liegenden Lasten anderer-seits. Er zeigt, daß bei niedriger Veränderlichkeit der Lasten die Einsturz-wahrscheinlichkeit hauptsächlich vom Tragverhalten des Bauwerks abhängt. Bei stark variablen äußeren Lasten andererseits (wie Wind oder Erdbeben) hängt die Einsturzwahrscheinlichkeit fast ausschließlich nur vom mittleren zu erwartenden Tragverhalten ab ohne Rücksicht auf dessen mögliche Schwan-kungen.

Wie schon erwähnt, reicht der Nachweis einer passend gewählten Bruch-



sicherheit zur Bemessung eines Tragwerks allein nicht aus. Die Untersuchungen von FERRY BORGES helfen dem Statiker indessen bei der Beurteilung des Einflusses gewisser Faktoren, die in vereinfachten Bruchsicherheitsberechnungen auftreten.

Im selben Sinne ist die Abhandlung von Z. SOBOTKA zu begrüßen, trotzdem hier für die nächste Zukunft noch keine direkte praktische Anwendbarkeit abzusehen ist. Er leitet allgemeine Formeln über die Streuung einer Funktion, die von verschiedenen, mit Zufälligkeiten behafteten Variablen abhängt, ab und veranschaulicht die Ergebnisse am Beispiel einer nach der Bruchlinientheorie berechneten Platte.

W. WIERZBICKI untersucht die Wahrscheinlichkeit des Einsturzes von Stahlbrücken, wobei er die Möglichkeit dynamischer Spannungsspitzen infolge bewegter Lasten einschließt. Das direkte Abstellen auf statistische Überlegungen und deren quantitative Ergebnisse bei der Bemessung von Tragwerken mag dem Konstrukteur ungewohnt und unzulässig erscheinen. Immerhin zeigen die endgültigen Formeln zur Festlegung einer zulässigen Spannung bereits die Hauptmerkmale einer halbstatistischen Annäherung, d. h. die Berücksichtigung eines möglichen Spannungszuwachses verbunden mit der Wahrscheinlichkeit seines Eintretens, verglichen mit einem Spannungszuwachs und vorgegebener Wahrscheinlichkeit, daß dieser nicht überschritten werden soll. Im ersten Faktor treten nichtzufällige (systematische) Einflüsse auf, welche zu einer Spannungssteigerung führen können, wie Rechenfehler und Ungenauigkeiten in der Ausführung, während mit dem zweiten Faktor zufällige Abweichungen erfaßt werden, welche im vorliegenden Falle dynamischen Effekten zuzuschreiben sind.

Der Unterschied zwischen zufälligen und systematischen Abweichungen ist wichtig für das zuverlässige Erfassen der Tragwerkssicherheit. Zufällige Effekte lassen sich statistisch erfassen; systematische Fehler werden am besten global durch einen vom Konstrukteur intuitiv festgelegten Sicherheitsfaktor berücksichtigt. Als einfaches Beispiel sei die Betonfestigkeit erwähnt, wofür auf statischer Basis ein «charakteristischer Wert» abhängig von Güte und Zahl der Festigkeitsproben angegeben werden kann, die indessen trotzdem noch mit einem partiellen Sicherheitsfaktor behaftet in die Berechnungen eingeführt wird, um systematischen Fehlern Rechnung zu tragen.

Immerhin besteht ein Bedürfnis, auch diese Sicherheitsfaktoren auf realistischer Basis zu wählen. N. PETERSONS hat Festigkeitsstreuungen von im Laboratorium hergestellten Betonsäulen untersucht und auch Ergebnisse von Festigkeitsuntersuchungen an ausgeführten Bauwerken gesammelt. Er vergleicht diese Festigkeiten mit denen von Standard-Versuchskörpern und schätzt die Standard-Abweichungen von Bruchlasten für Säulen und Balken ab, in Abhängigkeit der Betonfestigkeit, der Bewehrungsanordnung, der Lastexzentrizität und der Querschnittsabmessungen. Es zeigte sich, daß es nicht möglich ist, diese verschiedenartigen Einflüsse in ihrer Wirkungsweise säuber-

lich getrennt auseinanderzuhalten. Immerhin gelang es, Vergleiche zwischen der Bedeutung von einzelnen Faktoren auf die Bruchfestigkeit anzustellen.

Im Hinblick auf die Vielfalt der Parameter, welche die Tragwerkssicherheit beeinflussen können, ist es für die Praxis von Bedeutung zu wissen, welche allenfalls vernachlässigt werden dürfen. In diesem Zusammenhang sind Untersuchungen über die Bedeutung dieser Faktoren für verschiedene Tragwerksysteme und Belastungsarten von Interesse und eine Fortsetzung und Erweiterung der Untersuchungen von PETERSONS ist wünschbar. Dieselben Fragen stellt sich B. GILG im Zusammenhang mit einer Klassifizierung der Faktoren und ihrer Streuungen im Hinblick auf ihren Einfluß auf die Sicherheit von verschiedenen Typen von Dammbauten.

#### **d) Besondere Anwendungen. (Zum Beispiel: räumliche Berechnung von Tragwerken)**

Die unter Thema Id erschienenen Artikel befassen sich alle mit der Berechnung räumlicher Tragwerke, haben sonst aber wenig gemeinsam. Jeder trägt indessen etwas zum besseren Verständnis des räumlichen Tragverhaltens bei, und einige stehen im Zusammenhang mit andern Teilen von Thema I.

J. MICHALOS und B. GROSSFIELD bieten ein Verfahren zur Berechnung untereinander verbundener räumlicher Rahmen von beliebiger Orientierung an, welche durch beliebige Systeme von Lasten oder Deformationen beansprucht werden. Die Knoten, welche den Verbindungsgliedern zwischen den Teilsystemen angehören, werden vorerst festgehalten und dann gelöst, wodurch das Kräftespiel die notwendigen Korrekturen im Sinne eines Ausgleichs erfährt. Dabei treten die räumlichen Dreh- und Verschiebesteifigkeiten aller Elemente, geordnet in Matrizenform, in Erscheinung.

E. R. BRYAN untersucht den Einfluß der Dachhaut auf die Beanspruchung der Portalrahmen einer Hallenüberdachung. Er hat seine rechnerischen Ergebnisse sowohl an Modellversuchen als auch am ausgeführten Bauwerk überprüft. Das seitliche Ausweichen der Rahmenknoten wird durch die Dachhaut verhindert, welche wie der Steg eines hohen, zwischen den steifen Giebelwänden gespannten Trägers wirkt und die Biegemomente in den Rahmen merklich herabsetzt. Die Versuche zeigen andererseits, daß die Dachhaut zusammen mit den Rahmen keinen nennenswerten T-Balkeneffekt zu erzeugen vermag.

B. KATO untersucht die Spannungsverteilung in einem Turm bestehend aus einem äußern hyperboloidischen Netzwerk und einem zentralen Schaft, welcher durch horizontale Kräfte (wie Erdbeben) beansprucht wird. Der Vergleich mit einem Modellversuch ergab gute Übereinstimmung der rechnerischen Werte, ausgenommen im Bereich der Spitze des Turms. Die Berechnungsmethode wurde daraufhin verfeinert, so daß nun auch die speziellen Verhältnisse im Bereich der Turmspitze rechnerisch befriedigend erfaßt werden können.

R. DABROWSKI entwickelt eine Theorie zur Berechnung gekrümmter Kasten-träger unter Berücksichtigung der innern Verformung der Querschnitte. Die Berechnung erfolgt in zwei Stufen. In der ersten davon werden die Biege- und Torsionsmomente bestimmt unter Annahme aussteifender Querschoten, welche eine Verformung der Querschnitte verhindern. In der zweiten Berechnungsstufe werden diese Querschoten entfernt und ersetzt durch ein Gleichgewichtssystem äußerer Kräfte, welche die tatsächlichen Querschnittsverformungen hervorrufen. Die Lösung steht in Analogie zum Balken auf elastischer Bettung.

B. J. ULIZKIJ schließlich berichtet über die Unzulänglichkeiten der hergebrachten Verfahren zur Berechnung von Brückenfahrbahnplatten und entwickelt eine Methode, welche diese Unzulänglichkeiten vermeidet. Der Verfasser trennt vorerst die Längsträger von der Fahrbahntafel und führt dann die entsprechenden Scheibenkräfte ein, welche das Zusammenwirken dieser beiden Elemente erzwingen.

Leere Seite  
Blank page  
Page vide