

Zeitschrift:	IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht
Band:	9 (1972)
Rubrik:	Theme VI: Experimental study of the behaviour of structures under loads

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 20.01.2026

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

Contrôle des ouvrages existants

Kontrolle bestehender Bauten

Checking of Actual Structures

F. PANCHAUD
Ingénieur Conseil, Professeur
à l'Ecole Polytechnique Fédérale
de Lausanne, Suisse

1. INTRODUCTION

Aujourd'hui, dans la plupart des réglementations nationales, l'auscultation des ouvrages et les épreuves de charge qui les accompagnent sont impérativement imposées pour toutes les constructions de quelque importance, c'est-à-dire que ces opérations sont reconnues indispensables pour s'assurer que la construction satisfait aux exigences requises de sécurité.

Il est vrai que ces épreuves imposent souvent la mise en oeuvre de moyens importants: elles mobilisent un personnel d'observation nombreux; elles gênent l'exploitation des ouvrages en service. En présence de ces inconvénients, on pourrait donc être tenté de les juger superflues. Si l'on ajoute encore, qu'aujourd'hui les méthodes de calcul actuellement disponibles permettent d'étudier d'une manière plus approfondie le comportement statique probable des ouvrages, on est tenté, une fois de plus, de renoncer à de telles épreuves.

L'objet de notre propos est d'analyser dans quelle mesure les auscultations des ouvrages restent encore utiles à la technique actuelle, en examinant successivement les différents problèmes qui se posent à tous ceux qui sont chargés

d'exécuter les opérations, d'en interpréter les résultats et d'en tirer les conclusions.

Nous souhaitons que nos réflexions générales, souvent banales, suggèrent aux spécialistes des exposés de détail, mettant en lumière les difficultés des techniques d'application et la manière de les surmonter pour atteindre, malgré tout, des résultats aussi sûrs que possible et utilisables pour les progrès de la technique.

Nous analyserons successivement les quatre groupes de problèmes essentiels que posent l'auscultation des ouvrages :

- a) Les buts de l'auscultation
- b) Les méthodes de l'auscultation
- c) L'interprétation des résultats
- d) Directives pour un programme d'essais simplifiés.

2. LES BUTS DE L'AUSCULTATION

2.1. GENERALITES

L'auscultation des ouvrages présente deux aspects :

- a) L'auscultation essentiellement qualitative a pour objet l'examen de l'état de l'ouvrage dans ses éléments principaux, en relevant les détériorations de toute nature, en particulier :
 - les fissurations,
 - les dislocations locales,
 - les corrosions des éléments porteurs,
 - l'état de fonctionnement des appareils d'appui.Il s'agit ici d'une description de l'état de l'ouvrage, afin d'apprécier sa résistance, avec la durée, aux actions agressives des agents atmosphériques. Quoique cette auscultation qualitative puisse présenter certains aspects subjectifs, elle n'en reste pas moins nécessaire pour supputer l'état de vétusté d'une construction et décider des travaux confortatifs éventuels. C'est pourquoi nous avons signalé cet aspect de l'auscultation, bien qu'il ne fasse pas l'objet essentiel de nos réflexions.

b) L'auscultation quantitative se propose d'étudier le comportement statique de l'ouvrage sous l'effet des surcharges d'épreuve; au cours de cette auscultation, on mesure les déformations sous l'effet des charges; ce qui permet d'analyser le comportement statique en révélant les zones de l'ouvrage les plus sollicitées et finalement le mode de distribution des efforts.

Bien que l'auscultation qualitative, comme dit plus haut, ait son importance pour diagnostiquer immédiatement des désordres graves, nous nous attachons davantage ici à examiner l'auscultation quantitative qui soulève souvent des problèmes complexes dans ses principes et dans ses techniques. En effet, comme nous le verrons plus loin, l'observation des déformations ne conduit pas directement à une appréciation de la résistance, mais elle doit faire au préalable l'objet d'une interprétation tenant compte surtout des qualités physiques du matériau.

2.2. BUTS DE L'AUSCULTATION QUANTITATIVE

Par la mesure des déformations des ouvrages, sous l'effet des charges d'épreuves, on peut viser trois buts :

- a) L'essai initial avant la mise en service, c'est le contrôle réglementaire de réception de l'ouvrage.
- b) Le contrôle périodique de surveillance permet, par comparaison avec l'essai de charge initial, d'évaluer l'évolution du comportement de l'ouvrage avec les années de service.
- c) L'auscultation en vue de l'étude d'un type d'ouvrage

Dans les structures complexes, la mesure des déformations, en mettant en lumière la distribution effective des efforts, permet d'apprécier l'exactitude des hypothèses admises dans le calcul et, éventuellement, de donner des directives pour définir de nouvelles hypothèses de base. Pour les ouvrages en béton armé en par-

ticulier, cette auscultation peut avantageusement être précédée de l'étude d'un modèle réduit, pour procéder à l'analyse du comportement théorique élastique; l'auscultation de l'ouvrage réel donne alors des renseignements complémentaires tenant à la nature du matériau béton armé lui-même.

Les buts (a) et (b) sont semblables et visent tous deux essentiellement à une vérification de la résistance.

Les opérations du but (c) font partie du domaine des recherches. Elles exigent des mesures plus nombreuses, plus fouillées, dont la précision doit être définie méthodiquement. Elles contribuent à la mise au point de méthodes de calcul nouvelles, plus conformes à la physique des choses, en vue de mieux apprécier, à l'avance, la résistance de l'ouvrage.

2.3. IMPORTANCE DES PROGRAMMES D'ESSAIS

Le programme d'essais doit être adapté à chaque ouvrage en vue d'observer les phénomènes qui le caractérisent.

Si les essais ont pour seul but de contrôler le comportement de l'ouvrage pour en déceler les défauts d'exécution, il est essentiel que les observations portent sur l'ensemble de l'ouvrage; par exemple, dans un pont à plusieurs travées, il ne suffit pas d'ausculter une des travées pour porter un jugement sur les qualités effectives de résistance de l'ensemble. On devra donc étendre le programme des essais à toutes les travées.

Nous définirons plus loin l'ampleur d'un programme minimum qui permettrait, d'après nous, de porter un jugement avec quelque certitude.

Par contre, lorsqu'on procède à une auscultation ayant pour but l'étude d'un type d'ouvrage, il n'est plus indispensable d'étendre les mesures sur l'ensemble de la construction. On désire étudier le détail du comportement, on concentrera donc les observations sur la partie restreinte de l'ouvrage, en mesurant les grandeurs caractéristiques en nombre suffi-

sant pour pouvoir s'affranchir le plus possible de l'indétermination. Il faut en effet acquérir la certitude que le comportement observé traduit un principe général, susceptible d'être finalement érigé en loi pouvant être introduite à la base du calcul.

En conclusion, l'auscultation des ouvrages offre à l'ingénieur la double possibilité :

d'une part, de contrôler le comportement des constructions, et,

d'autre part, de définir les règles de calcul plus générales qui doivent être admises pour l'étude future des ouvrages.

3. LES METHODES DE L'AUSCULTATION

3.1. Généralités

Les méthodes de l'auscultation comportent trois groupes d'opérations:

- a) Les mesures des déplacements ou des flèches de la construction.
- b) Les mesures des angles de rotation des sections.
- c) Les mesures des déformations spécifiques locales.

Nous n'avons pas l'intention de décrire ici l'appareillage très varié disponible aujourd'hui pour mesurer ces différentes grandeurs. Nous retiendrons seulement que toutes ces mesures doivent être conduites de façon que les résultats obtenus correspondent effectivement aux exigences du problème posé.

3.2. NATURE DES OBSERVATIONS

La mesure des déformations d'un ouvrage sous les effets d'une charge donnée reste toujours un problème de physique avec toutes les sujétions que cela comporte; les grandeurs à mesurer sont petites et susceptibles d'être entachées de nombreuses erreurs; les opérations ont lieu en plein air. L'opérateur doit être conscient de ces difficultés pour

prendre toutes les précautions nécessaires.

Il s'agit de s'assurer que les valeurs mesurées représentent bien le seul effet des charges et qu'elles ne contiennent pas les effets de causes secondaires tels que les effets des variations de température ou d'humidité et les effets d'une évolution lente dans le comportement du matériau, par exemple une déformation plastique de fluage.

A ce sujet, les conditions sont favorables lorsque l'application des charges est rapide, car, pendant la courte durée des opérations, les variations de température restent le plus souvent négligeables. Néanmoins, on devra toujours relever la température des ouvrages et de l'air ambiant au cours de l'expérience, avant, pendant et après l'essai, en notant une éventuelle variation d'insolation.

Nous ne faisons que relever ici les correctifs principaux qu'il est nécessaire de prendre en compte pour obtenir une valeur correcte de la grandeur cherchée.

Les expérimentateurs chevronnés savent combien des précautions apparemment superflues peuvent se révéler indispensables pour éviter des erreurs de mesure. Ces précautions portent, soit sur la sensibilité des appareils, soit sur la stabilité des montages, soit encore sur les influences secondaires. Ces réserves étant prises en considération, aujourd'hui, on peut dire que les mesures de déformation des ouvrages, sous l'effet des surcharges rapides, peuvent s'effectuer avec une précision satisfaisante.

Lorsque la durée de mise en charge est grande, il n'en est plus de même. Les difficultés deviennent rapidement considérables. C'est le cas, en particulier, lors de l'auscultation des barrages: Entre l'état initial et l'état de charge maximum, s'écoulent souvent plusieurs mois, de sorte que l'état thermique de l'ouvrage peut subir des fluctuations si considérables que les résultats des mesures ne représentent que de loin le seul effet de la charge eau. Il est alors indispensable d'évaluer les effets thermiques pour eux-mêmes et de corriger les mesures brutes en conséquence.

3.3. APPAREILS DE MESURE

Les appareils de mesure comportent des fleximètres, des extensomètres et des clinomètres. Ces appareils sont connus de tous les spécialistes. Aujourd'hui, l'appareillage électrique devient d'un usage courant, bien que les appareils mécaniques, dans l'auscultation des ouvrages, sont encore ceux qui se comportent le mieux hors du laboratoire. Nous serions heureux de connaître l'avis des expérimentateurs sur ce point et en particulier leur opinion concernant les difficultés rencontrées et les précautions à prendre lorsqu'on utilise, en plein air, des équipements électriques de quelque importance.

3.4. ENREGISTREMENT DES VIBRATIONS

L'enregistrement des vibrations des constructions fait partie des auscultations fréquemment demandées parce que le calcul reste encore mal commode pour analyser ce mode de sollicitation.

L'analyse des effets dynamiques dûs aux charges mobiles rentre dans la catégorie des observations des vibrations.

Les appareils enregistreurs doivent avoir des caractéristiques particulières pour donner une représentation correcte des oscillations à observer sans introduire des distorsions gênantes. Souvent l'effet des masses en mouvement des appareils de mesure perturbe les phénomènes à un tel degré que l'enregistrement en est profondément modifié.

Dans le domaine de l'enregistrement des vibrations, les appareillages électriques conviennent particulièrement lorsqu'ils sont bien conçus : Ils sont capables de reproduire plus fidèlement les phénomènes à observer.

4. INTERPRETATION DES RÉSULTATS

4.1. GÉNÉRALITÉS

Les analyses du comportement de l'ouvrage, en partant des résultats nets des mesures, peuvent se présenter sous deux formes :

- a) On interprète les résultats pour eux-mêmes, en faisant abstraction du calcul statique. C'est une analyse du comportement intrinsèque de l'ouvrage.
- b) Les résultats des essais sont à confronter avec les résultats du calcul statique pour mettre en lumière les divergences éventuelles, et en tirer les conclusions concernant la tenue effective de l'ouvrage.

4.2. ANALYSE DU COMPORTEMENT INTRINSEQUE DE L'OUVRAGE

Cette analyse présente les aspects suivants :

- a) Observation des déformations d'ensemble et appréciation du degré d'élasticité de l'ouvrage.
- b) Evaluation des efforts intérieurs.
- c) Evaluation des contraintes locales.

4.2.1. DEFORMATIONS D'ENSEMBLE

Les observations d'ensemble permettent de connaître les déformées de la construction, révélant ainsi l'importance des flèches, le rôle des liaisons de continuité et l'effet des déplacements des appuis.

On peut alors se rendre compte, d'une manière générale, quels sont les éléments qui jouent un rôle déterminant dans le comportement statique de l'ouvrage. En particulier, on peut apprécier le fonctionnement des joints de dilatation.

Il peut arriver en effet qu'un joint de dilatation, séparant deux parties d'ouvrage statiquement indépendantes, fonctionne mal et constitue accidentellement une liaison, de sorte qu'une charge placée sur un des ouvrages se transmet partiellement sur l'autre, à travers ce joint de dilatation.

Une telle disposition n'est pas tolérable, car elle peut avoir des conséquences graves sur le comportement de l'une ou de

l'autre des parties dans l'éventualité où, lors de l'application d'une charge plus élevée, la résistance du joint cède brusquement, provoquant alors un choc.

4.2.2. CRITERE D'ELASTICITE DE L'OUVRAGE

En principe, les déformations des ouvrages sous les charges de service doivent être réversibles : Une charge quelconque ne doit pas produire de déformation permanente.

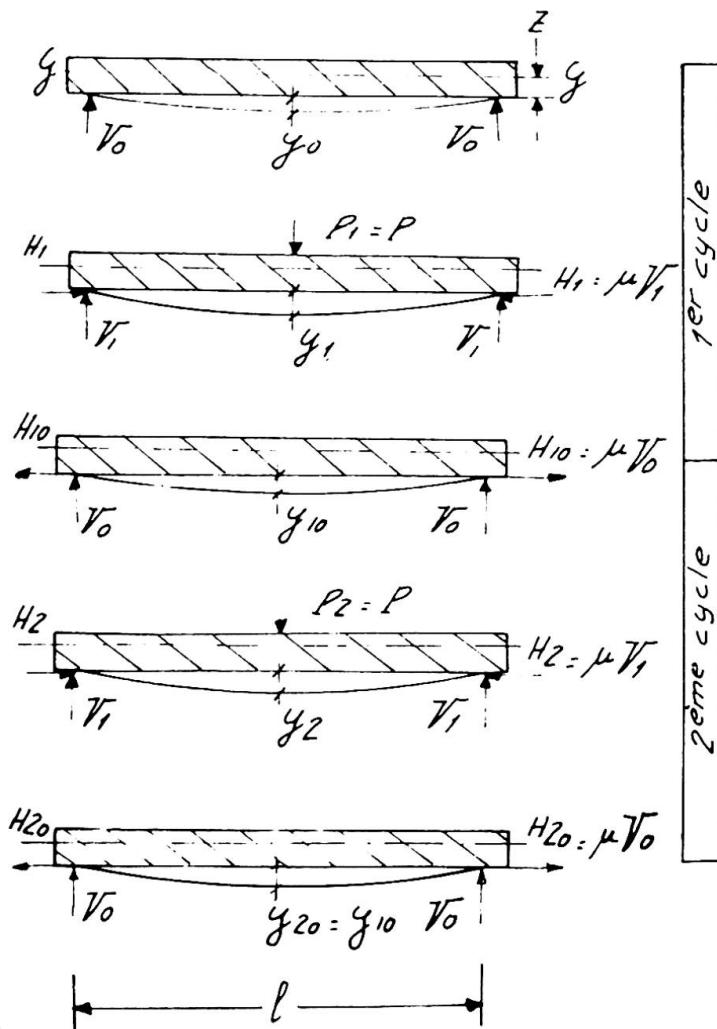
Ce critère est caractéristique d'un comportement satisfaisant. En effet, on peut en déduire que la construction pourra supporter indéfiniment une succession de charges et de décharges sans être compromise. Cela peut signifier aussi que nulle part la matière n'a subi de déformations importantes dépassant l'état élastique.

Pour vérifier si cette condition de réversibilité est remplie, il suffirait de procéder à un seul cycle de charge en mesurant les déformations avant, pendant et après l'exécution du cycle.

En réalité, il est rare que les ouvrages les mieux construits satisfassent d'une manière absolue à cette condition après un seul cycle de charge. Est-à dire que leur comportement ne serait pas satisfaisant ? Il faut se garder de porter un jugement si hâtif. Avant de se prononcer, on doit d'abord analyser méthodiquement l'origine de la déformation permanente observée et son ampleur comparativement à la précision des mesures.

Le problème réel est complexe, car l'expérience montre que souvent, lors de la répétition d'un cycle de charge ayant produit une certaine irréversibilité, la construction se comporte à nouveau élastiquement. Cette irréversibilité temporaire ou anélasticité apparente résulte des effets des forces de frottement agissant simultanément avec les forces élastiques. Le phénomène peut s'expliquer relativement facilement. Considérons, par exemple, (voir figure 1.), une poutre à deux appuis simples sur laquelle on applique une charge verticale. De ce fait, les appuis ont tendance à s'écartier : Ce mouvement fait apparaître des forces

Fig 1 : Anélasticité apparente due aux frottements des appuis



Etat initial du 1er cycle
Poids propre seul
 y_0

1er cycle: application de la charge
 $y_1 = y_0 + \frac{P\ell^3}{48EI} - \frac{\mu V_1 Z \ell^2}{8EI}$

Etat final du 1er cycle et
Etat initial du 2ème cycle
 $y_{10} = y_0 + \frac{\mu V_0 Z \ell^2}{8EI}$

2ème cycle: application de la charge
 $y_2 = y_0 + \frac{P\ell^3}{48EI} - \frac{\mu V_1 Z \ell^2}{8EI}$

Etat final du 2ème cycle
 $y_{20} = y_0 + \frac{\mu V_0 Z \ell^2}{8EI}$

Les déformations du 2ème cycle sont devenues réversibles, tandis que celles du 1er ne l'étaient pas.

de frottement tendant toujours à s'opposer au mouvement, et, par conséquent, à réduire l'importance de la flèche observée de l'ouvrage. On trouvera donc une flèche plus petite que la flèche élastique, sans effets des frottements. Lorsqu'on décharge, le mouvement des appuis se manifeste en sens inverse, mobilisant des forces de frottement de signe contraire des précédentes et

s'opposant au raccourcissement de la fibre inférieure dû à la décharge. Il en résultera une déformation permanente appréciable, laissant imaginer que la poutre ne se déforme pas élastiquement. Mais si maintenant, on répète le cycle de charge et décharge, au début de ce 2e cycle, l'état correspond à l'état de déformation permanente du premier, tandis que l'état de charge sera identique à celui du 1er cycle; après la décharge du 2e cycle, on retrouvera un état semblable à l'état initial de ce même cycle. La construction se révélera alors à nouveau élastique.

Cette constatation entraîne une conclusion pratique : Les essais de charge d'un ouvrage doivent toujours comporter une répétition des cycles de charge. Quoiqu'il en soit, toute irréversibilité observée des déformations doit être analysée pour en rechercher la cause. Si la cause de l'irréversibilité est la manifestation d'une sollicitation locale exagérée ayant provoqué un état de plasticité, l'irréversibilité n'est pas admissible. Si par contre, la cause est un phénomène ne concernant pas la résistance proprement dite de la structure, l'effet des forces de frottement par exemple, l'irréversibilité des déformations peut être admissible.

Le 2e cycle de charge permet de reconnaître s'il en est bien ainsi.

Si l'on reprend l'exemple de la poutre à 2 appuis, évoquée plus haut, on peut relever encore deux constatations :

- a) Si l'ouvrage, au début du 1er cycle de charge se trouvait en état d'évolution thermique avec refroidissement, le système initial serait semblable à celui du début du 2e cycle et de ce fait l'anélasticité apparente disparaîtrait.
- b) La flèche observée dans le 2e cycle, réputé élastique, ne correspond pas à la flèche statique due à la surcharge; elle est plus petite à cause des effets des frottements.

D'après ce qui précède, on voit que l'interprétation des résultats doit toujours être conduite avec prudence avant de porter un jugement.

D'une manière générale, les forces de frottement perturbent le comportement des ouvrages en s'opposant chaque fois aux déformations qui ont tendance à se manifester. Il en est ainsi, par exemple, dans les ponts-rails où le ballast et le rail s'opposent au mouvement de contraction possible du tablier; de ce fait, il apparaît finalement que ballast et rail semblent participer à la résistance, de sorte que la déformation observée est notablement inférieure à celle que l'on aurait pu supposer à priori.

On risque d'attribuer cette diminution à une augmentation du module d'élasticité du matériau, alors qu'en réalité, elle provient des frottements de l'ensemble des structures, infrastructures et superstructures.

4.2.3. EVALUATION DES EFFORTS INTÉRIEURS ET DES CONTRAINTES LOCALES

L'interprétation des mesures, en vue de déterminer les efforts intérieurs, peut se faire soit en calculant les courbures résultant des flèches observées, soit en mesurant localement les déformations spécifiques de la matière. Dans un cas comme dans l'autre, on doit faire intervenir les caractéristiques physiques du matériau et les rigidités des sections.

Pour un matériau tel que l'acier, et si les contraintes ne dépassent pas la limite vraie d'élasticité, la détermination des efforts en partant des déformations nettes mesurées ne présente pas de difficulté.

Pour le béton armé, par contre, on sait que la notion de module d'élasticité présente une double ambiguïté : D'une part le matériau n'est pas régulièrement élastique surtout dans les zones tendues et d'autre part, le module est variable d'un béton à l'autre. Dans ce cas, on doit rester prudent. Dans l'évaluation des efforts intérieurs, on est souvent conduit à admettre deux valeurs limites du module

d'élasticité définissant parallèlement les valeurs limites des efforts intérieurs. En dépit de cette incertitude concernant le module d'élasticité du béton, l'expérience nous montre que, pour les charges de service ne créant pas des contraintes supérieures aux contraintes admissibles, le comportement de l'ensemble de l'ouvrage en béton armé reste encore élastique, ce qui justifie largement la supposition encore admise de calculer le comportement statique des constructions en béton armé en les assimilant à des structures parfaitement élastiques.

4.3. COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS DU CALCUL ET LES RESULTATS DES ESSAIS

Cette comparaison porte sur les flèches observées, la valeur des efforts intérieurs et les contraintes locales.

En général, en ce qui concerne les flèches et les efforts intérieurs, la concordance reste acceptable; les divergences sont beaucoup plus grandes si l'on prend en considération les contraintes locales. Ce fait s'explique de lui-même puisque le calcul fait souvent abstraction des phénomènes locaux de distribution des contraintes, des effets d'entaille par exemple.

En présence de divergences entre le résultat du calcul et le résultat des essais, on est souvent tenté de donner la préférence à l'un ou à l'autre des modes d'appréciation.

Nous voulons essayer d'examiner ici la manière de porter un jugement en présence d'une telle divergence, en comparant les démarches respectives du calculateur et de l'expérimentateur.

4.3.1. LE MODELE MATHEMATIQUE, IMAGE DU CALCULATEUR

L'ingénieur qui projette une construction, afin de pouvoir supposer les efforts intérieurs et fixer les dimensions des sections, aura toujours besoin d'une représentation sous la forme d'un modèle mathématique. Ce modèle mathématique restera toujours nécessairement un schéma simplifié; la simplification se manifestera non seulement dans le comportement même de la matière qui le constitue - loi de Hooke - mais aussi dans les relations des éléments entre eux.

Le schéma définit donc une association de deux groupes de phénomènes :

- a) Le comportement élémentaire ou comportement des éléments d'une part, et,
- b) Le comportement de solidarité entre les éléments, d'autre part.

La forme adoptée pour le schéma peut influencer d'une façon marquée la distribution des efforts dans la construction. Il en est ainsi en particulier lorsque l'un ou l'autre des groupes de phénomènes devient dominant. Par exemple, lorsque les sections des pièces sont relativement grandes par rapport à leur longueur, comme c'est souvent le cas dans les structures en béton armé, les phénomènes de liaison prennent une importance prédominante dans la distribution des efforts.

Partant du modèle mathématique, l'ingénieur utilise des méthodes qui aujourd'hui peuvent représenter, avec une précision pratiquement suffisante, les mécanismes des éléments linéaires simplifiés, tels que poutres, colonne isolée, dalles par exemple. Par contre, cette analyse mathématique se révèle souvent incapable de représenter commodément des mécanismes d'association dès que des complexités se manifestent. C'est le cas si les éléments constitutifs ont des dimensions et des formes transversales qui les distinguent des formes linéaires de la poutre ou de la colonne; alors, les systèmes hyperstatiques correspondants, où les assemblages des éléments font naître des efforts composés de flexions, de torsions ou d'efforts normaux, deviennent difficiles à étudier correctement par le calcul. Pour obtenir cependant une évaluation des efforts, indispensable à l'établissement d'un projet, le calcul doit alors introduire des hypothèses simplificatrices qui d'emblée entacheront les résultats d'une erreur souvent du même ordre de grandeur que les valeurs à déterminer.

Cela tient au fait que la distribution des efforts, pour

assurer l'équilibre, est tributaire essentiellement de mécanisme de déformations de détail qu'il est difficile de schématiser avec une rigueur suffisante. En un mot, le modèle mathématique d'une construction est limité dans ses possibilités d'exprimer simultanément ces deux groupes de conditions :

- Conditions d'équilibre d'une part,
- Conditions de déformation réelle, d'autre part.

Cette limite des moyens du calcul, indépendante de la technique du calcul peut expliquer, dans certains cas, les écarts entre résultats d'essais et calcul.

4.3.2. L'OUVRAGE REEL, RESULTATS DES AUSCULTATIONS

Dans son comportement, l'ouvrage réel satisfait automatiquement et régulièrement aux deux groupes de conditions cités plus haut, s'affranchissant par ailleurs de toute restriction concernant le comportement intérieur du matériau; il y a lieu cependant de prendre en considération les phénomènes secondaires, tels que les effets de frottement, si l'on veut avoir une image plus pure du comportement théorique.

On comprend dès lors combien l'analyse du comportement réel d'un ouvrage peut devenir une source précieuse de renseignements pour l'ingénieur qui doit respecter avant tout les exigences naturelles et cherche des règles lui permettant d'évaluer à l'avance les dimensions à choisir en conséquence.

C'est en contemplant méthodiquement les ouvrages en service, pour les différents types de structures, que l'ingénieur peut définir les dispositions constructives les plus favorables, celles qui respectent au mieux le mécanisme naturel de la résistance.

5. ESQUISSE DE DIRECTIVES POUR UN PROGRAMME D'ESSAIS SIMPLIFIES

Nous prenons l'initiative de résumer notre manière de voir en proposant un ensemble de directives permettant dans chaque cas de définir un programme d'essais.

5.1. BUT DES ESSAIS SIMPLIFIES

Les essais de charge des ouvrages d'art ont pour but de s'assurer que la construction auscultée ne présente pas de faiblesse pouvant entraîner sa ruine à brève échéance.

Pour réduire dans toute la mesure du possible l'ampleur de ces essais, qui sont relativement coûteux, et les limiter à ce qui est strictement nécessaire pour atteindre les buts définis plus haut, les essais seront prévus en deux temps :

D'abord, on procède à un essai simplifié destiné à montrer que la construction se comporte normalement, et ne présente pas d'anomalie importante; c'est généralement le cas dans la plupart des ouvrages.

Si cet essai simplifié révèle un comportement anormal, on devra alors procéder à des essais de charge plus approfondis pour mettre en lumière l'origine des anomalies constatées, pour décider s'il y a lieu de procéder à des travaux conformatifs pour rétablir le fonctionnement normal de l'ouvrage.

5.2. ESSAIS SIMPLIFIES

Ces essais doivent permettre de vérifier que :

- a) Le comportement statique général de la construction est normal, c'est-à-dire conforme aux prévisions du calcul.
- b) Tous les éléments porteurs sont correctement exécutés.
- c) Les défauts éventuels visibles de l'ouvrage ne sont pas compromettants pour la résistance avec la durée.

5.2.3. LE COMPORTEMENT STATIQUE

Le comportement statique est jugé satisfaisant :

Si la déformation générale de l'ouvrage est semblable à celle que prévoit le calcul d'une part, et,

Si les déformations sous l'effet de charges de service répétées restent réversibles d'autre part.

La première condition permet de s'assurer qu'il n'y a pas d'effet parasitaire important qui perturbe la distribution normale des efforts intérieurs:

Il suffit de contrôler la similitude des déformations avec celles du calcul sans s'astreindre à en vérifier la valeur absolue qui dépend de la rigidité des sections, toujours difficile à connaître avec précision.

La deuxième condition permet de constater l'élasticité de l'ouvrage, c'est-à-dire sa capacité de supporter la surcharge un nombre de fois quasi illimité.

5.2.4. MESURES A EFFECTUER DANS LE CAS D'UN PONT A PLUSIEURS TRAVEES

Pour atteindre ces objectifs, les essais simplifiés comporteront la mesure des flèches dans trois sections de chaque travée pour chaque poutre, en répétant les charges trois fois au moins, davantage si l'irréversibilité n'est pas atteinte.

La mesure dans trois sections par travée (en général au quart, à la moitié et aux trois quarts), permet de calculer la courbure moyenne résultant de la flexion, par la méthode des différences finies. Il faut noter ici que ce calcul n'est valable que si dans l'intervalle des trois sections, on ne rencontre aucun point d'inflexion de la déformée.

Pour les poutres continues, la mesure des déformations des travées voisines de la travée chargée, permet de contrôler l'effet de continuité et de le comparer avec celui découlant du calcul. La mesure des flèches dans trois sections permet de s'affranchir d'un effet de tassement des appuis

qui n'est pas discernable avec la seule mesure de la flèche médiane.

La répétition de charge permet d'apprécier le degré de réversibilité. Il faut en général répéter trois fois la charge, car après une seule opération de charge et de décharge, on trouve toujours une déformation permanente qui n'est pas nécessairement un défaut de l'élasticité de la construction porteuse, mais qui est due aux frottements consécutifs aux mouvements des appuis.

5.2.5. INTENSITE DES CHARGES

Il n'est pas indispensable d'utiliser comme surcharge la charge réglementaire de calcul. Il est préférable d'adopter une charge qui sera voisine de la surcharge de service maximum pouvant se répéter. Cela permet de limiter le nombre des véhicules à mobiliser pour effectuer les essais, ce qui réduit la dépense et facilite les manœuvres. Il est par contre capital que les essieux de chaque véhicule soient tarausés de façon à connaître la juste disposition des charges.

On serait tenté de regretter de ne pas introduire la surcharge maximum de calcul. A la réflexion, cette solution n'est pas souhaitable. On évite d'imposer inutilement à l'ouvrage des sollicitations qu'il n'aura probablement jamais l'occasion de comporter, ou tout au plus ne les comportera qu'une fois.

5.2.6. PRÉPARATION DES ESSAIS

Le programme des essais doit être établi pour chaque ouvrage en fonction de ses caractéristiques; il sera étudié à l'avance pour que le déroulement puisse s'effectuer dans un minimum de temps.

Les appareils à employer sont des fleximètres ou comparateurs de type courant donnant le 100e de mm.

5.2.7. PRECAUTIONS A PRENDRE

Il ne faut pas oublier que les variations de température peuvent provoquer des déformations de l'ouvrage.

En général, entre le court temps de la charge et de la décharge, ces variations restent faibles et sans importance.

Cependant, il peut arriver que la durée entre charge et décharge soit plus grande ou, par exemple, qu'un orage ou une pluie amène un refroidissement brusque d'une dalle de pont. Auquel cas il en résulte une déformation additionnelle faussant les résultats de mesure statique et cela exige donc que lors de chaque opération de mesure, on note les conditions atmosphériques, et les variations éventuelles de température entre le début et la fin des essais.

5.2.8. ERREURS PROVENANT DES DISPOSITIFS DE MESURE

Les fils d'attache des fleximètres peuvent subir des variations de longueur pouvant entacher les mesures, surtout si les variations de température sont très grandes au cours des essais. On pourrait substituer aux fils d'acier des fils d'invar, mais pratiquement cette solution coûteuse n'offre que peu d'intérêt.

Si les variations de température sont observées, il est possible d'effectuer les calculs correctifs avec une précision encore suffisante. Les procès-verbaux de mesure doivent contenir toutes les mesures et observations effectuées, même celles que l'on est tenté d'éliminer à priori.

Il est avantageux de représenter graphiquement les déformées pour se rendre compte de l'allure générale des phénomènes observés.

5.2.9. TASSEMENTS DES APPUIS

Les tassements des appuis sont en général très faibles pour les charges limitées des essais. Si dans certains cas particuliers il est nécessaire de les observer, la solution consiste à procéder par nivellation.

A côté des observations des déformations, il est nécessaire de procéder à une auscultation générale de l'ouvrage pour noter tous les défauts éventuels visibles (fissures en particulier dans les ouvrages en béton).

6. CONCLUSIONS

L'auscultation des ouvrages reste le seul moyen efficace de s'assurer qu'une construction possède la sécurité désirée.

Les essais doivent être conduits avec toutes les précautions exigées de toute mesure physique. En principe, ils comporteront toujours une répétition du cycle de charge pour mettre en lumière l'origine de déformations permanentes éventuelles. La confrontation des résultats des essais avec ceux d'un calcul devra toujours tenir compte d'un côté des phénomènes secondaires qui accompagnent toute expérience et de l'autre de la schématisation imposée à tout calcul.

Conduites scientifiquement, les auscultations des ouvrages, associées éventuellement à des essais sur un modèle réduit, constitueront un puissant moyen d'investigation, non seulement pour contrôler des ouvrages, mais aussi en vue de préciser des règles de calcul, plus conformes à la réalité, pour l'établissement des projets.

Il n'est donc pas indiqué d'y renoncer si l'on veut progresser dans l'art de bâtir.

VIb

Modellversuche im Hinblick auf die Bemessung

Structural Models and Design

Essai sur modèles comme instrument de dimensionnement

HEINZ HOSSDORF
dipl. Ing. ETH
Basel, Schweiz

Schwerpunkt

Auf dem Gebiet des Bauingenieurwesens war es im letzten Jahrzehnt um den Modellversuch als Mittel zur Bemessung etwas still geworden. Wenn auch verschiedene Institute die Entwicklung der Modellstatik weitergetrieben haben, so beeindruckt doch die Anzahl, vor allem kleinerer Privatlaboratorien, welche ihre Tätigkeit während dieser Zeitspanne völlig eingestellt haben. Die Gründe für diese relative Abwertung experimenteller Verfahren sind denn auch klar erkennbar:

Die Modellversuchstechnik war, von einigen wenigen Spezialanwendungsbereichen abgesehen, nirgends zu einem für den entwerfenden Ingenieur leicht und kurzfristig zugänglichen System entwickelt worden. Die Versuchsverfahren waren umständlich und improvisiert, die Messtechnik aus apparativen oder personellen Gründen oft unzuverlässig und die Deutung der Ergebnisse in der Folge vielfach unbefriedigend. Es hat sich daher unter Bauingenieuren die bis anhin begründete Gewohnheit eingebürgert, auf den Modellversuch nur in ausgesprochenen Notfällen zurückzugreifen. Man zog vor, so lange als immer möglich mit theoretischen, wenn auch oft gröblich vereinfachenden Modellvorstellungen zur Beurteilung des Tragverhaltens einer Struktur auszukommen.

In Anbetracht der bekannten Schwächen der Modellstatik war es nur natürlich, wenn der Ingenieur, unter dem Eindruck der neuen, scheinbar unbegrenzten Zukunftsmöglichkeiten der elektronischen Datenverarbeitung, seine unbegrenzten Hoffnungen auf den Computer setzte und sich in der Folge von den experimentellen Methoden für die Bemessung noch weiter abwandte.

Es ist Hauptanliegen dieses Beitrages aufzuzeigen, dass diese Situation heute einem grundlegenden Wandel unterworfen ist.

Der ursprüngliche Wunderglaube an den Computer macht, da sich dessen Leistungsfähigkeit als Rechengerät für den Ingenieur heute übersehen lässt, einer nüchternen Beurteilung Platz, welche hier kurz zusammengefasst sei:

Der Ingenieur hat mit dem Computer tatsächlich ein neues, mächtiges Werkzeug zur Berechnung von Tragwerken in die Hand bekommen. Aufgaben aus dem für die Praxis so überaus wichtigen Gebiet der elastischen Stabstatik werden durch ihn beinahe ohne Einschränkung mit, gegenüber früher, unvergleichlicher Leichtigkeit bewältigt. Die auf das elektronische Rechnen zugeschnittene Methode der Finiten Elemente hat bis anhin numerisch nicht erfassbare statische und dynamische Probleme aus dem Bereich der Flächentragwerke und der räumlichen, elastischen Körper der Berechnung zugänglich gemacht. Zudem bestehen eine Reihe von schönen Ansätzen zur Beschreibung von nicht-linearen oder elasto-plastischen Vorgängen. Der Computer ist daher auf einigen klar umrissenen Gebieten zu einem selbstverständlichen Hilfsmittel des Praktikers für die Lösung baustatischer Probleme geworden.

Ebensogut wie sich der Erfolg des Computereinsatzes auf dem Gebiet der Baustatik beurteilen und weitgehend überblicken lässt, ist heute auch die tatsächliche, quantitative Begrenzung der Fähigkeiten dieser Rechengeräte sowie die mutmassliche Entwicklungsrichtung der elektronischen Datenverarbeitung genügend klar erkennbar, um feststellen zu dürfen, dass dem weiteren Vordringen der Computerstatik, gemessen an den in sie gesetzten Hoffnungen, äus-

serst enge Grenzen gesetzt sind.

Ohne hier auf die an sich sehr verwickelten Einzelheiten der Problematik grosser Computersysteme eingehen zu wollen, sei nur erwähnt, dass diese Schwierigkeit vor allem mit der in allen modernen numerischen Methoden der Baustatik notwendigen Operation der Matrizeninversion selbst und der bei der Berechnung grosser Gleichungssysteme auftretenden numerischen Instabilitäten zu tun hat. Die Rechenzeit steigt mindestens mit der dritten Potenz der Anzahl von Unbekannten. Aehnlich verhält es sich mit der erforderlichen Grösse der Rechenanlage. Es gibt keine Anzeichen dafür, dass kommende Computergenerationen diese grundlegende Schwierigkeit überwinden werden.

Die Computerstatik wird sich daher in einer voraussehbaren Zukunft darauf beschränken müssen, die Berechnungsmethoden auf den schon eroberten Gebieten (Stabstatik, Flächentragwerksstatik angewandt auf relativ einfache Geometrien etc.) zu verfeinern, und für den Ingenieur leichter zugänglich zu machen. Denn auch die Verfahren des In- und Outputs lassen bei schwierigen Programmen noch vieles zu wünschen übrig.

Ganz anders steht es auf dem Gebiet der Modellstatik. Sie ist auf bestem Wege, durch sinnvolle Integration der elektronischen Rechenmaschinen als Prozessrechner in den Versuchsablauf, ihre herkömmliche Schwerfälligkeit zu überwinden und durch Einsatz moderner Messtechnik die Zuverlässigkeit der experimentell erfassten Daten bis zur Perfektion zu steigern. Die mit mühsamen Rechengängen verbundene Umdeutung der Messwerte in die den Ingenieur interessierenden Aussagen wird vom Computer spielend bewältigt.

Die Modellstatik wird durch diesen Wandel endlich aus einer überwiegend handwerklichen Technik heraus zu einer neuen Art selbständigen Berechnungssystems entwickelt, in welchem das Modell, als das die Lösung tragende Analogon, über die Messtechnik mit dem Computer in direkter Verbindung steht. Dieses neue Konzept ermöglicht nicht nur die Simulation beliebig vieler und vielartiger Lastfälle

und Randbedingungen sowie die Erfassung einer unbegrenzten Anzahl von zuverlässigen Messwerten in kürzester Zeit, sondern sie eröffnet zudem auch von der Theorie her bisher unbeschrittene, wesentlich elegantere Wege zur Behandlung baustatischer Probleme.

Wegen dieses Wesensunterschiedes der neuen, auf dem Experiment beruhenden Bemessungsverfahren drängt es sich auf, sie durch einen neuen Begriff, die Hybridstatik, von der klassischen Modellstatik zu unterscheiden.

Da das Modell die Lösung des elastischen Problems selbst beinhaltet, ist der Computer nicht mit dem für seine innere Struktur widernatürlichen Problem ausgedehnter Matrizeninversionen belastet. Die Hybridstatik ist daher, bei sinnvoller Arbeitsteilung zwischen Modell und Computer in der Lage, jede noch so verwickelte Aufgabe mit vernünftigem Aufwand kurzfristig und exakt zu lösen. Es wäre wünschenswert, wenn diesem neuen Durchbruch der Modellstatik als mächtiges Mittel zur Bemessung des Schwergewichtes Beiträge aus der Praxis gewidmet würden. Es ist das Denken in Systemen, welches erlauben wird, in Zukunft ganz allgemein weit mehr und sinnvollere Aussagen aus dem Experiment zu gewinnen als bis anhin. Die Erkenntnis, dass die Zukunft experimenteller Verfahren in der Symbiose mit dem elektronischen Computer liegt, hat auch eine neue Bewertung der Messverfahren zur Folge, da nur Methoden, welche erlauben, die mechanische Information in Form elektrischer Signale darzustellen, in die Hybridstatik integriert werden können.

Die bleibenden Aufgaben der Modellstatik

Im Gegensatz zur analytischen Baustatik, wo das Gesamtverhalten eines Tragwerkes durch mathematische Verknüpfung (Integration der Differentialgleichung) einer Modellvorstellung über das örtliche Materialverhalten ermittelt wird, besteht die Aufgabe der Modellstatik darin, das physikalische Modell, welches das Verhalten des Tragwerkes als Kontinuum simuliert und damit die Lösung des gestellten Problems a priori enthält, durch geschickte Versuchsver-

fahren unter möglichst vielfältigen Belastungsbedingungen über sein Verhalten auszufragen und die gemessenen Wirkungen in für den Ingenieur brauchbarer Form darzustellen.

Der Aufgabenbereich der Modellstatik lässt sich daher in drei bleibende Hauptgebiete aufteilen, auf welchen allen noch grosse Entwicklungsarbeit zu leisten ist:

1. Die Problematik des Modelles als Analogon selbst d.h. die Erfüllung der von den Aehnlichkeitsgesetzen geforderten Bedingungen an die physikalischen Eigenschaften des Modelles.
2. Die Versuchs- und Messtechnik, welche erlaubt, allgemeine Lastfälle und Lastarten, also Ursachen zu erzeugen und die Wirkung durch Messung zu erfassen.
3. Die sinnvolle Deutung der gemessenen Größen, d.h. deren Umrechnung in für den entwerfenden Ingenieur sinnvolle Aussagen, aufgrund welcher er in die Lage versetzt wird, seinen Prototyp richtig zu bemessen.

Das physikalische Modell als Analogon

Die Anforderungen, welche an die physikalischen Eigenschaften des Modelles zur Simulierung des Tragverhaltens des Prototyps gestellt werden müssen, sind durch die Aehnlichkeitsgesetze der Mechanik determiniert. Die gleichzeitige Erfüllung aller denkbarer Aehnlichkeitsbedingungen ist technisch nicht möglich und in vielen Fällen auch nicht erforderlich. Man beschränkt sich daher darauf, je nach Versuchsart und Zielsetzung des Modellversuches verschiedene Gruppen von Modellbedingungen einzuhalten. Bei allen im folgenden aufgeführten Beispielen wird geometrische Aehnlichkeit des Modelles zum Prototyp vorausgesetzt, eine Bedingung, deren Erfüllung nur in unwesentlichen Ausnahmefällen umgangen werden kann.

VersuchstypAehnlichkeitsbedingung

- Statische Modelle

Elastische Modelle im linearen Kraftdeformationsbereich

Hooke'sches Gesetz
Poisson'sche Zahl

Elastische Modelle im nicht-linearen Kraftdeformationsbereich

zusätzlich:
Aehnlichkeit der Verformung

Plasto-elastische Modelle,
Bruchmodelle

zusätzlich:
Aehnlichkeit der Spannungs-Dehnungs-Kennlinie

Verbundmaterialien
(z.B. bewehrter Mikrobeton)

relative Aehnlichkeit zwischen den Eigenschaften der Verbundmaterialien

Aehnlichkeit der Verbundwirkung

- Dynamische und Hydro- oder Aeroelastische Modelle

Die Modelle für diese Versuchsarten entsprechen einem der oben aufgeführten Typen für statische Versuche und müssen (oder sollten) je nach Zielsetzung des Versuches zusätzliche Aehnlichkeitsbedingungen erfüllen, welche beispielsweise sein können:

Bedingung an die Materialdichte
Druckkoeffizient
Reinold'sche Zahl
Froud'sche Zahl
Strouhal Zahl
Mach'sche Zahl etc.

Die gleichzeitige Erfüllung von mehreren Aehnlichkeitsbedingungen stösst oft auf grosse technische Schwierigkeiten und ist in anderen Fällen gar nicht erreichbar. Viel Erfindungsgabe wurde auf die Entwicklung von exakten Simulationsmodellen aufgewendet und es ist zu erwarten, dass zu diesem Thema am Kongress wertvolle technische Lösungen beigetragen werden.

Wandel in Versuchs- und Messtechnik

Die Versuchstechnik hat die Aufgabe, Wirkungen auf dem Modell zu verursachen, d.h. allgemeine Lastfälle zu erzeugen, seien dies

nun Belastungen durch äussere oder innere Kräfte (wie z.B. Temperatur), oder Verschiebungen. Die Messtechnik ermöglicht die quantitative Erfassung der Wirkung der Lastfälle auf das Modell, die Registrierung von statischen oder dynamischen Deformationen und Kräften.

Im letzten Dezenium hat die elektronische Messtechnik eine ähnlich spektakuläre Entwicklung wie der elektronische Computer durchgemacht. Mechanisch-elektrische Wandler (Messaufnehmer), welche die Erfassung aller interessierenden mechanischen Wirkungen mit hoher Präzision und in kürzester Zeit in Form eines elektrischen Signals gestatten, sind heute überall erhältlich.

Messabfrageeinrichtungen erlauben das rasche Umschalten von Messstelle zu Messstelle.

Der entscheidenste Durchbruch auf dem Gebiet der Messtechnik, der die gesamten Versuchsverfahren der Zukunft, nicht nur der Modellstatik, in Kürze grundlegend wandeln wird, basiert auf der Entwicklung der Analog-Digital-Converter, welche es ermöglichen, einem Computer die gemessenen analogen Messwerte ohne Umwege in digitaler Form zuzuführen. Diese Voraussetzung erlaubt dem Computer, in direkte Konversation mit der physikalischen Umwelt zu treten.

Nach seiner inneren elektronischen Struktur ist die natürlichste Tätigkeit des Computers, logische Entscheide zu treffen, Boole'sche Algebra zu betreiben. Diese Eigenschaft zusammen mit der Möglichkeit der Analog-Digital-Wandlung prädestiniert den Computer zum zentralen Organ für die Steuerung und Regelung von Prozessen. Auf die Technik des Modellversuches angewendet, bedeutet dies, dass der Versuchsablauf, das Erzeugen der Belastung und das Abfragen der Messwerte vom Computer gesteuert vollautomatisch erfolgen kann. Diese Möglichkeit bringt nun gegenüber der üblichen halbmanuellen Messtechnik einen entscheidenden, in seiner Tragweite erst abschätzbaran Fortschritt:

- Der Versuchsablauf wird unvergleichlich viel flexibler:

Auswahl der Belastungsart und der Belastungsabläufe, sowie die . Abfragung der Messwerte erfolgt durch den Computer. Der gesamte Prozess des Versuchsablaufes wird daher programmierbar. Die zeitliche und örtliche Folge von Belastung und Messung wird vollkommen frei wählbar und ist nicht mehr an starre Geräteeinstellungen gebunden. Der exakte Zeitpunkt für jede Messung kann vorher bestimmt werden. Zudem kann der Versuchsablauf durch erfasste Messergebnisse geregelt werden (z.B. Feststellung der Ueberschreitung von Messbereichen und automatische Änderung der Geräteeinstellung, Alarm bei Auftreten irgendwelcher Störeffekte mit sofortiger Diagnose der Ursache etc.)

- Die Messungen werden exakter und zuverlässiger:

Durch die automatische Registrierung und die direkte Weiterverarbeitung der Messdaten durch den Computer wird der menschliche Irrtum ausgeschalten. Von der höheren Präzision moderner analoger Messgeräte abgesehen, wird die Genauigkeit der Messung durch die Automation zusätzlich entscheidend durch die Möglichkeit, den Zeitpunkt der Messung auf Bruchteile von Tausendstel Sekunden genau zu wählen, gesteigert. Zudem können auf Wunsch Messungen zu gewählten Zeitpunkten beliebig oft wiederholt werden und die Daten durch vom Computer durchgeführte statistische Überlegungen gereinigt werden. Automatische Eichmessungen werden in den Messprozess eingebaut.

- Der Versuchsablauf erfolgt unvergleichbar schneller:

Die Mess- und Registrierabläufe erfolgen über den Prozessrechner mit geeigneter Peripherie (z.B. Magnetband, Discs etc.) in der Größenordnung von tausendmal schneller, wie bei einer Handabrechnung.

Die Steuerung und Regelung des Ablaufes entbindet den Menschen von langwierigen und langweiligen Eingriffen in den Versuchsablauf. Die notwendigen Steuerentscheide werden vom Computer zuverlässig innerst Sekundenbruchteilen getroffen.

- Bessere und einfachere Lasterzeuger und Messaufnehmer können in weit gröserer Anzahl eingesetzt werden:

Früher hing die Präzision von Messergebnissen einzig von der Genauigkeit der Messaufnehmer selbst und den Eigenschaften der Messverstärker ab. Man verlangte aus Gründen der Einfachheit für die Auswertung eine temperaturstabile, lineare Kennlinie zwischen mechanischen und elektrischen Effekten. Diese Forderung zwang zum Bau von teuren Präzisionsinstrumenten. Im Messkreis, in welchem on-line ein Computer eingeschaltet ist, kann jedoch ein grosser Teil der Eicharbeit dem Rechengerät überbunden werden. Vom Analogteil der Messkette wird dann nur noch eine mechanisch-elektrische Kennlinie gefordert, welche reproduzierbar ist. Jedem einzelnen Messaufnehmer zugeordnete, einmal bestimmte Eichwerte erlauben dem Computer, die anfallenden Messsignale in die gesuchten mechanischen Grössen umzurechnen.

Die Erkenntnis, dass der Einsatz des Computers als Prozessrechner ganz allgemein eine Entmaterialisierung der Versuchstechnik ermöglicht, ist für die Weiterentwicklung neuer Versuchssysteme von entscheidender Bedeutung. Versuchseinrichtungen und Messaufnehmer, welche nur in Verbindung mit dem Computer Ergebnisse höchster Präzision liefern, können mit einem Bruchteil der bisherigen Kosten hergestellt werden. Dies ermöglicht in der Zukunft den Bau sehr vielfältig einsetzbarer Belastungseinrichtungen und den wirtschaftlichen Einsatz einer stark gesteigerten Anzahl von Messaufnehmern.

Die Weiterverarbeitung der einmal gewonnenen Messdaten zu Aussagen, welche den Ingenieur für die Bemessung seines Tragwerkes interessieren (Uebertragung der am Modell ermittelten Werte auf den Prototyp, Berechnung von Schnittkräften, analytische Simulierung von Lastfällen etc.) kann in einfachen Fällen on-line erfolgen. D.h. gesuchte Ergebnisse liegen nach Abschluss des Versuches schon in der gewünschten Form vor. In den meisten Fällen wird jedoch die endgültige Auswertung der Messdaten auf dem Computer in einem zweiten Arbeitsgang erfolgen. Wesentlich scheint die Erfüllung der folgenden Forderung an die Modellstatik der Zukunft:

Die neue Versuchs- und Messtechnik erlaubt die wirtschaftliche Erfassung und Registrierung einer beinahe unbegrenzten Menge von Information allgemeiner Art über das untersuchte Tragwerk. Nach Ab-

schluss des einen Versuchsablaufes hat das physikalische Modell ausgedient. Alle weiteren Simulationen erfolgen nur noch analytisch auf dem Computer. Hier wird die eigentliche Ingenieurarbeit geleistet.

Diese Philosophie der Trennung des analogen, an das physikalische Modell und die Versuchseinrichtungen gebundenen Teilprozesses vom Auswertungsprozess bringt entscheidende Vorteile:

- Das Modell kann nach kurzer Verwendung abgebaut werden und die Versuchseinrichtungen stehen für die experimentelle Analyse eines weiteren Modelles zur Verfügung.
- Die allgemeine Information kann, auf einem geeigneten Datenträger gespeichert, beliebig lange Zeit archiviert werden, so dass jederzeit weitere Simulationen mit den vorhandenen Daten durchgespielt werden können. (Beispiele: Änderung der Auflagerbedingungen, Nachvollziehen einer Erdbebensimulation, Berechnung der bei einem Belastungsversuch zu erwartenden Beanspruchungen an einem Brückenbauwerk etc.)
- Ein weiterer wesentlicher Vorteil in der Trennung von Informationserfassung und ingenieurmässiger Simulation auf dem Computer besteht in der Erleichterung der Telekommunikation zwischen Versuchslaboratorium und entwerfendem Ingenieur. Die neue Versuchstechnik kann nur von hochspezialisierten Instituten mit dem entsprechend ausgebildeten Personal beherrscht werden. Die Ingenieure der Praxis sind daher einerseits auf eine gute Zusammenarbeit mit diesen Institutionen angewiesen, haben aber andererseits grösstes Interesse daran, kurzfristig die verschiedensten Aussagen über ihr Tragwerk zu erhalten und vor allem: Sie möchten je nach Zwischenergebnis Einfluss auf den Auswertungsprozess haben. Es ist nun durchaus denkbar, dass der entwerfende Ingenieur, mit der entsprechenden Software ausgestattet, die Auswertung der Versuchsergebnisse an seinem Arbeitsort selbst durchführt. Das Labor liefert ihn nur mit einem die Information über die Versuchsergebnisse enthaltenden Datenband. Dadurch wird die geographische Distanz zwischen Labor und Ingenieur bedeutungslos.

Dieses Zukunftsbild der Modellstatik, an dessen Realisierung heute intensiv gearbeitet wird, baut auf den Fortschritten der elektronischen Messtechnik und den Möglichkeiten der Computertechnik. Wo früher mühsam tausend Messwerte registriert und ausgewertet wurden, werden heute spielend Hunderttausende von Daten erfasst und verarbeitet. Traditionelle Messtechniken, welche sich für die Computereingabe nicht eignen, werden daher entsprechend abgewertet. Vor allem eignen sich für die Aufnahme von Messwerten die direkten mechanisch elektrischen Wandler, wie Widerstandsmessstreifen, induktive und kapazitive Geber. Alle mit diesen Geräten ausgeführten Messverfahren, auch bei ihrem Einsatz in grosser Zahl, weisen oft eine stark empfundene Unzulänglichkeit auf: Sie erfassen immer nur eine begrenzte Anzahl örtlicher Effekte. Elektrische Messverfahren, welche imstande wären z.B. ein Dehnungsfeld als Kontinuum zu erfassen, existieren meines Wissens nicht. Verfahren, welche, abgesehen von Beschränkungen anderer Natur, diese Bedingung erfüllen (z.B. Fotoelastizität, Moiré-Verfahren), eignen sich hingegen vorerst nicht zur Computereingabe. Hier liegt ein zentrales Problem für die weitere Entwicklung der Modellstatik.

Neben diesen versuchstechnischen Aspekten besteht für die weitere Perfektion der Hybridstatik ein weites Arbeitsfeld auf rein theoretischem Gebiet. Eine Systematik der Modellauswertung besteht nur in Ansätzen. Es stellt sich die Aufgabe, durch analytische Verknüpfung einzelner Messwerte auf die den Ingenieur vor allem interessierenden Schnittkräfte zu schliessen. Welche Messkombinationen führen optimal zur sicheren Bestimmung von Schnittkräften?

Wo am Modell dürfen diese Messungen vorgenommen werden, ohne zu Fehldeutungen zu führen? Durch den Einsatz des Computers sind auch hier grössere Freiheiten erlaubt, da der Arbeitsaufwand für die analytische Auswertungsarbeit kaum mehr als Kriterium für die Zulässigkeit eines Verfahrens ins Gewicht fällt.

Wandel in der baustatischen Betrachtungsweise

Im vorigen Abschnitt wurde aufgezeigt, dass die neuen Mittel

der elektronischen Messtechnik in Verbindung mit dem Computer als Prozessrechner erlauben, bei Steigerung von Zuverlässigkeit und Messgenauigkeit in eine neue Größenordnung von Geschwindigkeit der Erfassung und Menge der Information über das statische Verhalten von Versuchskörpern vorzudringen.

Die neuen Möglichkeiten, welche sich der Hybridstatik eröffnen, beschränken sich jedoch nicht auf die Quantität der zur Weiterverarbeitung zur Verfügung stehenden Information selbst. Die beschriebenen technischen Voraussetzungen eröffnen vielmehr Wege der Analysis für baustatische Berechnungen, welche bisher wohl bekannt, aber mangels geeigneter analytischer Methoden nie in der Praxis eingesetzt werden konnten.

Wir stehen heute erst am Beginn der Entwicklung dieser neuen, auf Hybridsystemen beruhenden baustatischen Berechnungsverfahren. An einem Beispiel, angewendet auf linear-elastische Probleme, kann jedoch der Grundgedanke aufgezeigt werden.

Sämtliche analytische Methoden der Baustatik, einschliesslich die Finiten Elemente, verfolgen das Ziel, durch Zusammensetzen der untersuchten Tragwerke aus bekannten, definierten Elementen, eine Lösung für das elastische Verhalten und für die Schnittkräfte der gesamten Struktur als Kontinuum zu finden. Für jeden Lastfall muss eine neue Lösung gefunden werden. Zustandsflächen sind ebenso Lösungen wie Einflussflächen. Müsste eine beschränkte Anzahl von Zustandsflächen über Einflussflächen gewonnen werden so würde dies die Kenntnis von einer unvergleichlich viel grösseren Anzahl von Lösungen voraussetzen. Dieser Weg wird bei zwei- und dreidimensionalen Problemen daher nicht beschritten, da er zu aufwendig und damit unrealistisch erscheint.

In der modernen Modellstatik, wo die Erfassung einer beliebigen Anzahl von Messungen kein Kopfzerbrechen mehr bereitet, erweist sich nun gerade dieser "Umweg", gesamthaft gesehen, als der direkteste Weg. Jede Messung ist schon eine Lösung für das Tragverhalten des Bauwerkes als Kontinuum. Zudem lässt sich die Erzeugung

von beliebig vielen Einheitslastfällen, angreifend an beliebig vielen Stellen, weit leichter automatisieren als die Erzeugung einer beschränkten Anzahl von Lastgruppen. Man wird daher die Versuchstechnik der Hybridstatik auf dem Gebiet der linear-elastischen Probleme darauf ausrichten, eine möglichst grosse Menge von Einflussfunktionen zu erzeugen. Dem Ingenieur fällt damit eine ungewohnt aussagekräftige Lösungsmenge über sein Problem in den Schoss, mit welcher er seine Probleme weit eleganter formulieren kann wie bis anhin.

Die speziellen Lösungen seines Problems können dann immer in der folgenden, für das zweidimensionale Problem angeschriebenen Form gewonnen werden:

$$E^P (u_0, v_0) = \int_F L^Q (x, y) \cdot e^{PQ} (u_0, v_0, x, y) dx dy$$

Ein Effekt E^P (eine Schnittkraft, eine Spannung, eine Verschiebung etc.) an der Stelle u_0, v_0 ist gleich dem Integral über dem Produkt aus der Ursache L^Q (eine Lastverteilung, Momentenverteilung, Verschiebung etc.) und der experimentell gefundenen Einflussfunktion e . Je nach der Anzahl N der untersuchten Stellen und derjenigen der Beanspruchsarten P und der Belastungsarten Q müssen also $N \cdot P \cdot Q$ Einflussflächen gewonnen werden. Eine moderne Hybridanlage erzeugt hundert bis tausend Einflussflächen mit je Hunderten von Einzelwerten pro Stunde. Es wird also unabhängig vom Schwierigkeitsgrad der gestellten Aufgaben, in kurzer Zeit, eine auch in der reinen Computerstatistik ungekannte Resultatmenge erzeugt.

Die weitere Arbeit des Computers beschränkt sich nun ausschliesslich auf die Manipulation der in Form von Matrizen vorhandenen Einflussfunktionen. Die Simulation der Wirkung irgendwelcher Lastfälle wird zum Spiel. Einfachste Computeroperationen führen zu den gewünschten Ergebnissen. Der Berechnung einer beliebigen Anzahl von Lastfällen steht nichts entgegen. Die Programmierung von beliebigen Verkehrslastfällen, die Berechnung von Grenzwerten, die Entwicklung von Optimierungsprogrammen für die Vorspannung (deren Wirkung selbstverständlich auch über Einflussfunktionen gewonnen wird), sind Aufga-

gaben, welche aufgrund der bekannten Funktionen weit leichter lösbar sind, zudem ist der Lösungsweg computergerechter als die üblichen Methoden der analytischen Baustatik.

Aus leicht einzusehenden Gründen sind der Menge der Daten, welche der Computer auf die beschriebene Weise zu manipulieren imstande ist, praktisch keine Grenzen gesetzt. Der Hauptgrund liegt darin, dass die notwendigen Matrizenoperationen keine grossen Inversionen erfordern. Daher können die an sich relativ kleinen Matrizen immer sequentiell aus dem Massenspeicher (z.B. Magnetband) über den Kernspeicher geführt werden. Ein Kleincomputer wird, wenn er Zugriff zu Einflussfunktionen hat, zu einem für den entwerfenden Ingenieur weit mächtigeren Instrument als heutige Grosscomputeranlagen. Der zeitliche und Kostenaufwand für die Lösung von baustatischen Problemen mit der Hybridstatik bleibt so auch bei den schwierigsten Aufgaben in vernünftigen Grenzen.

Rückblickend sei eine mehr philosophische Bemerkung gestattet:

Unsere Baukonstruktionen sind Bestandteil unserer physikalischen und damit der analogen Umwelt. Dasselbe gilt für unsere Experimente, seien dies nun Modellversuche oder andere Untersuchungen, auf deren Anschauung wir unsere theoretischen Vorstellungen über die Baustoffe und das Tragverhalten erarbeiten.

Unsere analytischen Modellvorstellungen, welche nie die physikalische Wirklichkeit selbst darstellen und deshalb immer nur mehr oder weniger brauchbare Näherungen sein können, erfüllen dann ihren Zweck, wenn sie allgemeinere Aussagen über einen Problemkreis gestatten. Die Analytik dient dem Ueberblick. Hier liegt ihre Berechtigung.

Vergleicht man nun auf dem linear-elastischen Gebiet die Methode der Finiten Elemente mit der Technik der Hybridstatik, so muss man den an sich überraschenden Schluss ziehen, dass die aus dem Analogon gewonnenen Ergebnisse dem entwerfenden Ingenieur allgemeinere Aussagen für die Bemessung in die Hand gibt als der ana-

lytische, rein abstrakte Weg, mit all seinen nicht ganz übersehbaren Unsicherheiten. Weshalb denn das Kontinuum zuerst mit viel Geduld in grobe Elemente zerteilen, um es dann mühsam wieder einigermassen zusammenzuflicken?

Zusammenfassung

Durch Einsatz der modernen elektrischen Messtechnik und des Computers als Steuerorgan des Versuchsablaufes wie auch als Datenverarbeitungsmaschine wird das bisher bekannte Gesicht der Modellstatik grundlegend gewandelt. Das Modell wird zum reinen Analogon, welches technisch gegenüber früher weitgehend vereinfacht, in Symbiose mit dem Computer, ein mächtiges, weit eleganteres Werkzeug für die Bemessung zu werden verspricht. Wir bezeichnen diese integrierten Systeme zur Bemessung als Hybridstatik.

Summary

Taking advantage of the recent development of electric measuring techniques and the computer, performing as a process control machine and data processing unit, the familiar aspect of structural models will be essentially transformed. The model, being now physically simplified, serves only as an analogue input and, in symbiosis with the computer, promises to become a very powerful and elegant tool for structural design. We call these integrated systems hybridanalysis of models.

Résumé

Profitant du développement de la technique des mesures électriques et de l'emploi de l'ordinateur, utilisé aussi bien comme machine cibernetique qu'informatique, l'apparence habituelle de l'essai sur modèle est soumise à une transformation fondamentale. Le modèle, dont l'aspect physique est considérablement simplifié, sert de pure entrée d'analogie et promet de devenir, en symbiose avec l'ordinateur, un instrument de dimensionnement extrêmement puissant et élégant. Nous appelons ces nouveaux systèmes intégrés pour l'investigation de structures, analyse hybride de modèles.

Leere Seite
Blank page
Page vide