

Analyse de la résistance au feu des structures en acier et mixtes acier-béton, assistée par ordinateur

J. C. Dotreppe, J. M. Franssen et J. B. Schleich

1. Introduction

L'essai de résistance au feu normalisé suivant la recommandation internationale ISO 834 est resté pendant longtemps la seule procédure admise pour vérifier qu'un élément de structure satisfait aux prescriptions fixées par les règlements ou les autorités compétentes.

Cependant, l'essai normalisé présente un certain nombre d'inconvénients, dont le plus important est certainement les conditions d'extrémité, c'est-à-dire les sollicitations et les déplacements additionnels dus aux liaisons de l'élément avec le reste de la structure. C'est pourquoi il est apparu, depuis déjà de nombreuses années, qu'il était nécessaire de disposer de recommandations et de méthodes analytiques simples pour prévoir le comportement au feu des éléments de structure.

On peut considérer qu'à l'heure actuelle, ce type de méthode est disponible pour pratiquement tous les éléments en acier. Il n'en va pas de même pour les éléments mixtes acier-béton ainsi que pour les éléments en béton armé ou précontraint. Ceci est dû en partie au fait que, pour ces éléments, le concept d'une température de référence unique n'est pas applicable.

Bien que toutes ces méthodes soient extrêmement utiles pour les auteurs de projet, beaucoup de choses restent encore à faire dans le domaine de la résistance au feu des structures. Il n'est que d'examiner le comportement de structures après incendie pour voir que beaucoup de constructions sont mal conçues pour résister à cette action accidentelle. À côté de telles erreurs, on trouve beaucoup d'éléments qui sont surprotégés.

Pour améliorer nos connaissances dans ce domaine, une des possibilités est de réaliser des incendies en vraie grandeur sur des bâtiments existants ou à démolir, mais de tels essais ne sont plus guère envisageables dans la période de récession économique que nous connaissons. Il faut donc se tourner vers d'autres types d'approche, c'est-à-dire vers des méthodes numériques permettant de simuler le comportement réel d'un élément de structure ou d'une structure entière sous l'effet d'un incendie.

C'est pourquoi une recherche appelée REFAO/CAFIR a été introduite par l'ARBED auprès de la CECA. Cette recherche contient un volet théorique et un volet expérimental.

CAD in der Brandschutzbemessung bei Stahl- und Verbundkonstruktionen

1. Einführung

Der Normbrandversuch gemäß ISO 834 wurde weitgehend zur Bestimmung des Feuerwiderstands der Konstruktionselemente verwendet. Trotzdem weist dieses Verfahren in seiner jetzigen Form einige Nachteile, z.B. die Beflammungs- und Einspannbedingungen auf. Der letztere Punkt kann als der Hauptnachteil des Normbrandversuchs angesehen werden, da das Bauwerkverhalten, im hohen Maße von den Einspannbedingungen, bedingt durch die Bauweise, abhängt.

Eine analytische Voraussage des thermischen und strukturellen Verhaltens wurde deshalb immer notwendiger. In den letzten zehn Jahren wurde ein wesentlicher Fortschritt bei der Entwicklung analytischer Methoden zur Berechnung des Bauwerkverhaltens unter Brandbedingungen erzielt. In mehreren Ländern kann heute die praktische Bestimmung des Feuerwiderstands durch einfache Rechenverfahren erfolgen.

Solche Verfahren stehen bereits für fast alle Stahlkonstruktionselemente zur Verfügung; aber sie sind noch nicht bei allen Verbund- und Betonelementen anwendbar, weil das Konzept der kritischen Temperatur nicht auf alle Fälle angewendet werden kann. Tabellen und empirische Beziehungen aufgrund von Versuchen und Erfahrungen müssen deshalb benutzt werden.

Obwohl diese Verfahren für den Konstrukteur sehr nützlich sind, verhält sich das Bauteil innerhalb eines Bauwerks im Brandfall sehr unterschiedlich. Sehr häufig stellt sich der Schutz des Bauteils als übertrieben heraus.

Zur Verbesserung der Voraussage des Feuerwiderstands ist ein leistungsfähiges numerisches Werkzeug, d.h. ein Computercode erforderlich, um das Verhalten tragender Bauteile beim Brand zu simulieren. Diese Art der Analyse ist der einzige Weg zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit der Stahl- und Verbundkonstruktionen.

Deshalb wurde ein als REFAO/CAFIR bezeichnetes Forschungsvorhaben von der ARBED vorgeschlagen und von der EGKS genehmigt, bestehend aus einem experimentellen und einem theoretischen Teil.

Die Versuche werden in verschiedenen europäischen Laboratorien durchgeführt, allerdings wird über den experimentellen Teil in diesem Beitrag nicht berichtet.

Computer aided fire resistance for steel and composite structures

1. Introduction

The standard fire resistance test according to ISO 834 has been used quite intensively to determine the fire resistance of structural elements. Nevertheless in its present form the test procedure has several shortcomings, for instance concerning the heating and restraint characteristics. This last point may be considered as the main weakness of the standard test, since the structural response is highly dependent on the conditions of restraint due to the building system and the end conditions.

Therefore the need for analytical predictions of thermal and structural responses has grown more and more intensively. During the last decade there has been important progress in the development of analytical methods for the calculation of the behaviour of structures under fire conditions. In several countries the practical evaluation of the fire resistance can now be made through simple methods of calculation.

This type of method is already available for almost all steel elements, but it is not yet applicable to all composite and concrete elements. This is due to the fact that the concept of critical temperature cannot be applied to all cases. It is necessary to use tables and empirical relationships based on tests and experience.

Though all these methods are very useful for the designer, the element will probably behave differently in a real structure if a fire occurs. It has been found that very often the protection of this element appears exaggerated.

To improve the prediction of fire resistance, it is necessary to have a very powerful numerical tool, i.e. a computer code able to simulate the real behaviour of the structural element in a fire environment. This type of analysis should lead to an improvement of the competitiveness of steel and composite constructions.

Therefore a research called REFAO/CAFIR has been introduced by ARBED and accepted by the ECSC authorities. This research contains an experimental part and a theoretical one.

The tests will be executed in various European laboratories, but the experimental part of the research will not be discussed in the paper.

The theoretical part is realized in the Department of Bridges and Structural Engineering of the University of Liège. The code is based on a computer

CBLIA 55.3-14.7

acier

die important. On peut raisonnablement fonder l'évaluation du coût d'une mesure de protection sur le principe que ce coût ne doit pas être supérieur à la réduction des dégâts prévisibles. Ce coût devrait de préférence être inférieur à la réduction des dégâts prévus (fig. 7).

Si par exemple la valeur du contenu équivaut à cinq fois celle du bâtiment et que nous évaluons la probabilité de succès de l'installation sprinkler à 90 %, c'est-à-dire $P_s = 0,9$, nous obtenons comme l'indique la figure 7 $S/Bp_0 \approx 5$.

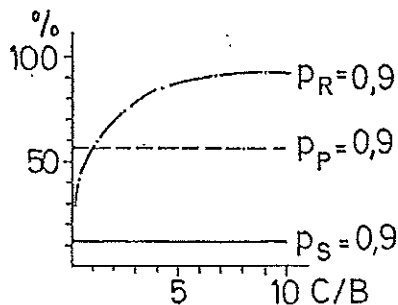
Si la probabilité qu'un incendie important éclate pendant la durée de vie du bâtiment est estimée à 10 %, c'est-à-dire $P_0 = 0,1$, nous obtenons $S \approx 0,5 B$. Le résultat montre que le coût d'une installation sprinkler S peut dans ce cas correspondre à la moitié du coût du bâtiment, sans toutefois excéder la réduction des dégâts prévisibles.

Si la probabilité de succès avec des murs de refend ou avec une résistance au feu est estimée à 70 %, la figure 7 indique qu'on obtient selon la même hypothèse que ci-dessus $P \approx 0,2 B$ et $R \approx 0,05 B$.

5. Conclusion

Grâce à la technique démontrée, il est donc possible d'estimer au moins sommairement la rentabilité de différentes mesures de protection incendie pour des bâtiments industriels.

Des conclusions analogues à celles des études du feu peuvent à nouveau être dégagées. On ne peut par exemple pas prétendre qu'une augmentation de la résistance au feu de la structure portante réduira considérablement les dégâts d'incendie. Le contraire peut, par contre, s'avérer vrai avec des sprinklers et des murs de refend.



6 Perte prévisible avec les mesures de protection incendie 2a, 2b et 2c, par rapport à la perte prévisible en l'absence de toute mesure de protection

Vorausgesehener Verlust bei den Brandschutzmaßnahmen 2a, 2b und 2c, sowie bei Abwesenheit von Brandschutzmaßnahmen

Expected loss for the fire protective measures 2a, 2b and 2c in relation to the expected loss in case of no fire protective measure at all

stahl

lusts. Es ist jedoch klar, daß diese Alternative nicht immer die beste ist. Es müssen auch die Kosten der Schutzmaßnahmen so wie die Wahrscheinlichkeit eines Großbrands berücksichtigt werden. Eine sinnvolle Basis zur Kostenüberprüfung einer Schutzmaßnahme ist die, daß sie nicht mehr als die zu erwartende Verlustverminderung kostet. Vorzugsweise sollten diese Kosten sogar niedriger als die zu erwartende Verlustverminderung liegen (Bild 7).

Wenn z.B. der Wert des Inhalts $5 \times$ dem Wert des Gebäudes entspricht und man die Wahrscheinlichkeit des Erfolgs der Sprinkleranlage mit 90 %, also $p = 0,9$ einschätzt, dann erhält man gemäß Bild 7 $S/Bp_0 \approx 5$.

Wenn die Wahrscheinlichkeit des Ausbruchs eines Großbrands während der Lebensdauer des Gebäudes auf 10 %, also $p_0 = 0,1$ geschätzt wird, dann erhält man $S \approx 0,5 B$.

Dies bedeutet, daß die Kosten einer Sprinkleranlage S hier etwa die Hälfte der Gebäudekosten betragen könnten, ohne die Verminderung des zu erwartenden Verlusts zu übersteigen.

Wenn die Wahrscheinlichkeit des Erfolges des Branddämme oder des Feuerwiderstands auf 70 % geschätzt wird, dann erhält man nach Bild 7 unter der gleichen Annahme wie oben $P \approx 0,2 B$ und $R \approx 0,05 B$.

5. Schlußfolgerung

Das dargelegte Verfahren macht es somit möglich, zumindest Überschlagerrechnungen des Kosten-Nutzenverhältnisses der verschiedenen Schutzmaßnahmen bei Industriegebäuden vorzunehmen.

Auch hier können gleiche Schlüsse aus den Branduntersuchungen gezogen werden. Von einem verbesserten Feuerwiderstand des Tragwerks kann z.B. nicht erwartet werden, daß der durch einen Brand eintretende Verlust wesentlich gemindert wird. Das Gegenteil kann jedoch für Sprinkleranlagen und Branddämme gelten.

steel

be less than the expected loss reduction (Fig. 7).

If for instance the value of contents is 5 times the value of building and we estimate the probability of success of the sprinkler installation to 90 %, that is $p = 0.9$. Figure 7 gives $S/Bp_0 \approx 5$. If the probability that a large fire will occur during the life time of the building is estimated to 10 %, that is $p_0 = 0.1$ we will get $S \approx 0.5 B$.

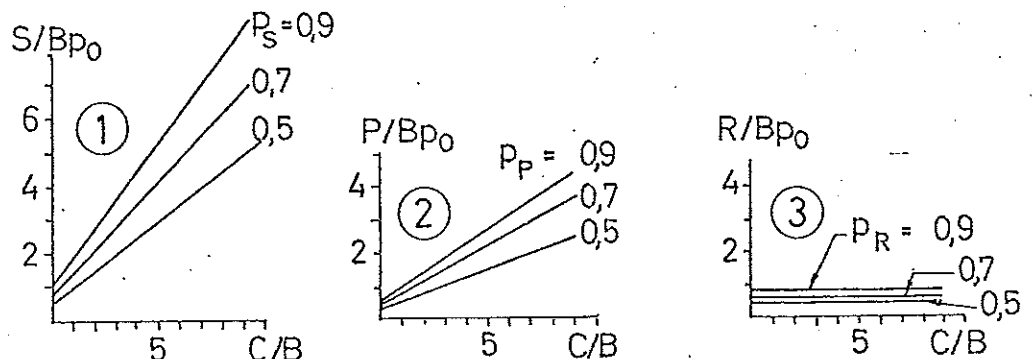
The result implies that the cost of a sprinkler installation S in this case could be about half that of the building cost without exceeding the expected loss reduction.

If the probability of success for the partition or for the fire resistance is estimated to 70 % Figure 7 gives under the same assumption as above $p \approx 0.2 B$ and $R \approx 0.05 B$.

Conclusion

By the demonstrated technique it is thus possible to make at least rough estimations of the cost to benefit of different fire protective measures for industrial buildings.

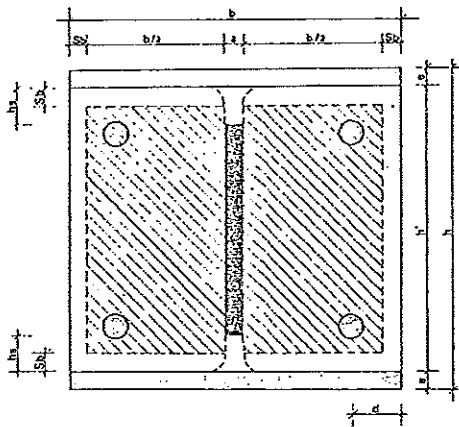
Again similar conclusions can be drawn as from the fire investigations. For instance an increase of the fire resistance of the load bearing structure can not be expected to reduce the fire loss very much. The opposite, however, may be true for sprinklers and partitions.



7 Coût maximal acceptable respectivement pour des sprinklers S, un cloisonnement P et une résistance au feu R, de façon que la dépense ne dépasse pas la valeur de la réduction des dégâts prévus 1 Sprinklers 2 Cloisonnement 3 Résistance

Maximal zul. Kosten einer Sprinkleranlage S, einer Brandblende P bzw. eines Feuerwiderstands R, die die Verminderung des zu erwartenden Verlusts nicht übersteigen 1 Sprinkler 2 Brandwand 3 Feuerwiderstand

The maximum acceptable cost for sprinklers S, for a partition P and for fire resistance R respectively in order that the cost will not exceed the expected loss reduction 1 Sprinkler 2 Partition 3 Resistance



1 Méthode de la « section mixte réduite » pour colonnes AF 30/120

„Geometrisch reduziertes Verbundquerschnitt“-Verfahren für AF 30/120-Stützen

Method of "reduced composite cross section" for AF 30/120 columns

acier

La partie théorique est réalisée dans le Service des Ponts et Charpentes de l'Université de Liège. Le code de calcul est développé à partir d'un programme mis au point dans le cadre d'une thèse d'Agrégation de l'Enseignement Supérieur.

Avec l'aide de ce programme on pourra simuler le comportement au feu des structures en acier protégé et non protégé ainsi que des structures mixtes acier-béton.

2. Développements récents concernant le comportement au feu des structures mixtes

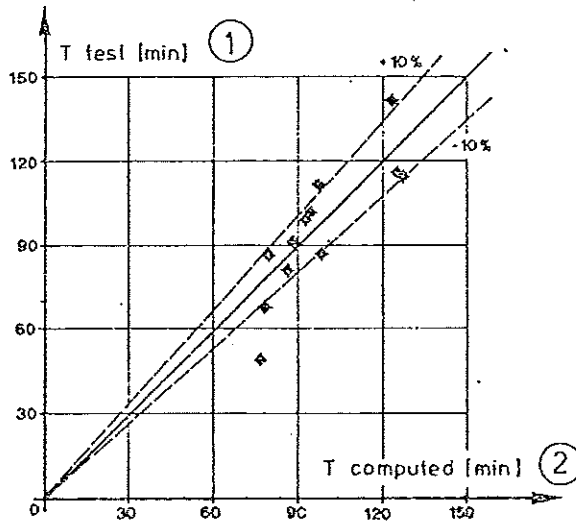
Des progrès considérables ont été effectués récemment dans le domaine de l'étude de la résistance au feu de ce type de structure, en particulier des colonnes. En effet, en ce qui concerne les poutres, un certain nombre d'essais ont déjà été réalisés dans le passé et des méthodes de calcul ont été mises au point à cette occasion.

C'est donc surtout pour les colonnes que les progrès ont été les plus importants au cours de ces dernières années. Des modèles de calcul simplifiés, confrontés à des résultats d'essais, ont pu être développés, ce qui permet aux auteurs de projet de procéder à une analyse rapide des performances des éléments.

Un exemple typique est la méthode dite de la « section mixte réduite » de l'ARBED⁽¹⁾, qui a été développée pour les profils laminés dans lesquels l'espace entre les semelles est rempli de béton (fig. 1).

Il faut souligner que les résistances au feu calculées à partir de cette méthode simplifiée sont en bon accord avec les résultats obtenus lors d'essais au feu (fig. 2).

(¹) J. B. Schleich, E. Lahoda, J. P. Lickes, H. Hutmacher: « Une nouvelle technologie dans la construction en acier résistant au feu », *acier-stahl-steel*, 3/1983.



2 Comparaisons des résultats de résistances au feu obtenus lors d'essais et calculés à partir de la méthode simplifiée, pour colonnes AF 1 Essais 2 Calculés

Vergleich der Feuerwiderstandswerte von AF-Stützen die bei Versuchen gemessen und durch das vereinfachte Rechenverfahren ermittelt wurden 1 Versuch 2 Berechnet

Comparison of fire endurances measured from tests and computed according to the simplified calculation methods, for AF columns

stahl

Der theoretische Teil wird in der Abteilung für Stahlhoch- und Brückenbau der Universität Lüttich durchgeführt. Der Code basiert auf einem Computerprogramm und ist so entwickelt, daß es auf alle Arten geschützter und ungeschützter Stahl- und Verbundkonstruktionen angewendet werden kann.

2. Die jüngsten Entwicklungen hinsichtlich des Verhaltens von Verbundkonstruktionen unter Brandbedingung

Ein wesentlicher Fortschritt konnte kürzlich bei Verbundkonstruktionselementen und ihres Verhaltens unter Brandbedingungen erzielt werden. Verbundträger ebenso wie verschiedene Verbundstützenarten wurden in mehreren Ländern untersucht. Vereinfachte Rechenmodelle, die sich auf die Abmessung tatsächlicher Brandversuche stützen, wurden entwickelt, damit Architekten und Ingenieure eine schnelle Berechnung von Verbundstützen ausführen können. Auch wenn diese Verfahren auf bestimmte Anwendungsfelder entsprechend den Versuchen begrenzt sind, erlauben sie jetzt schon eine praxisnahe Bemessung unter vielen Bedingungen.

Ein typisches Beispiel dieser Abmessung von Brandversuchen ist der „reduzierte Verbundquerschnitt“ nach dem ARBED-Verfahren⁽¹⁾. Dieses Verfahren wurde für die sogen. AF-Stützen, d.h. Walzprofile, zwischen den Flanschen mit Beton ausgefüllt — entwickelt (Bild 1). Es muß darauf hingewiesen werden, daß die gemessene und die nach dem vereinfachten Rechenverfahren ermittelte Branddauer gut übereinstimmen (Bild 2). Außerdem wurden ein Katalog

(¹) Garantierter Feuerwiderstand im Stahlbau, eine neue Technologie, *acier-stahl-steel*, 3/1983.

steel

program. It must be developed in such a way that it can be applied to all types of protected and unprotected steel and composite (steel-concrete) structures.

2. Recent developments concerning the behaviour of composite structures under fire conditions

Considerable progress has been achieved recently in the field of composite construction elements and their individual behaviour under fire conditions. Composite beams as well as different composite column types have been tested in several countries. Simplified calculation models, based on real fire test calibration, have been developed enabling architects and engineers to perform a quick analysis of composite columns for instance. Even if these methods are limited to given application fields depending on tests, they however permit right now a practical design in many situations.

A very typical example of these fire test calibrations is the "reduced composite cross section" method of ARBED⁽¹⁾. This method has been developed for the so-called AF-columns, i.e. rolled profiles, concreted between the flanges (Fig. 1). It should be underlined that the fire endurances measured and those computed according to this simplified calculation method are in good agreement (Fig. 2). Besides a catalogue and diagrams for AF 30/120 columns based on rolled H-profiles have been established. These most practical de-

(¹) A new technology in fireproof steel construction, *acier-stahl-steel*, 3/1983.

acier

En outre, un catalogue et des abaques ont pu être établis pour les colonnes AF 30/120 réalisées à partir de profils laminés de la série H. Il s'agit d'un outil de dimensionnement très pratique qui donne immédiatement la section mixte adéquate (c'est-à-dire le profil laminé, le béton et les armatures additionnelles) en fonction de la charge axiale, de la longueur de la colonne et de la résistance au feu demandée (fig. 3).

Cependant, il faut admettre que des problèmes apparaissent dès que l'on sort du champ d'application couvert par les essais. Ainsi, il devient très difficile d'obtenir la réponse adéquate pour des colonnes très longues ou très minces ou pour analyser certains types particuliers de sections mixtes (fig. 4).

Un autre problème important est le diagramme d'interaction moment-effort normal des colonnes mixtes (fig. 5), pour lequel des solutions existent à température ambiante, alors qu'aux températures élevées aucune méthode n'est actuellement disponible et, par conséquent, l'approche basée sur le modèle simplifié n'est pas appropriée.

En outre, il faut signaler que la méthode simplifiée ne donne aucune indication sur les contraintes thermiques élevées qui apparaissent sur la section droite de l'élément et qui sont dues au gradient thermique important que l'on observe toujours lorsqu'on se trouve en présence de sections de béton assez massives (fig. 6).

Toutes ces raisons expliquent l'intérêt de disposer d'un outil de simulation performant, permettant de réaliser une analyse thermique et mécanique sans aucune restriction quant à la géométrie des sections, le système de construction, la combinaison des charges, l'évaluation des températures au cours de l'incendie, etc.

stahl

und Nomogramme für AF 30/120-Verbundstützen erstellt. Aus diesem praxisnahen Bemessungshilfswerkzeug ist der geeignete Verbundquerschnitt (begleitend I-Profil, Beton und Bewehrungsstäbe) in Abhängigkeit von der Axiallast, die Länge der Stütze und die vorgeschriebene Zeit der Beflammung zu entnehmen (Bild 3).

Trotz des sehr hohen praktischen Wertes dieser vereinfachten Rechenmodelle muß die Tatsache beachtet werden, daß Probleme auftreten, sobald sich die tatsächlichen Umstände außerhalb des durch Versuche erfaßten Anwendungsgebiets befinden. Deshalb ist es schwer, die geeignete Lösung bei sehr langen oder schlanken Stützen zu finden oder besondere Arten von Verbundquerschnitten zu berechnen (Bild 4). Ein weiteres wichtiges Problem ist die M/N-Interaktionsbeziehung von Verbundstützen (Bild 5), für die Lösungen bei Umgebungstemperaturen zur Verfügung stehen. Dagegen steht keine Lösung für die Interaktionsbeziehung bei hohen Temperaturen zur Verfügung, wobei der Weg des vereinfachten Modells ungeeignet ist.

Außerdem ist darauf hinzuweisen, daß die vereinfachten Rechenmodelle nicht die Einflüsse der Eigenspannungen infolge des Temperaturfelds eines Verbundquerschnitts erfassen. Das unter Brandbedingungen in einem Verbundquerschnitt entstehende, sehr unterschiedliche Temperaturfeld führt aber zu starken Eigenspannungen (Bild 6); was die Tragfähigkeit beeinflusst.

Deshalb ist ein numerisches Modell erforderlich, um die genaue Bestimmung eines thermischen und mechanischen Systems ohne Einschränkungen in bezug auf die geometrische Gestalt der Querschnitte, die konstruktive Durchbildung, die Lastkombinationen usw. zu ermöglichen.

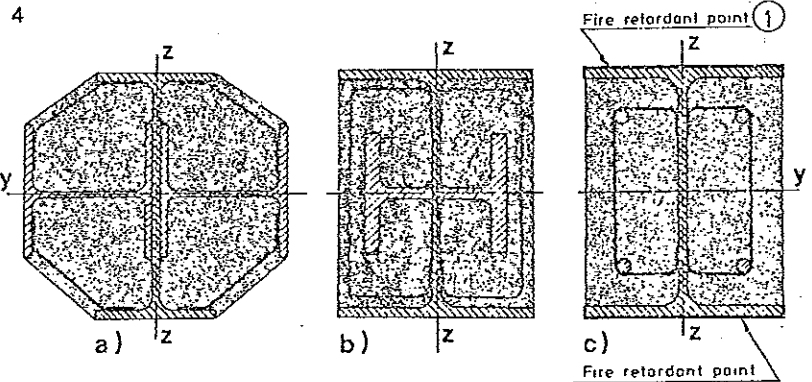
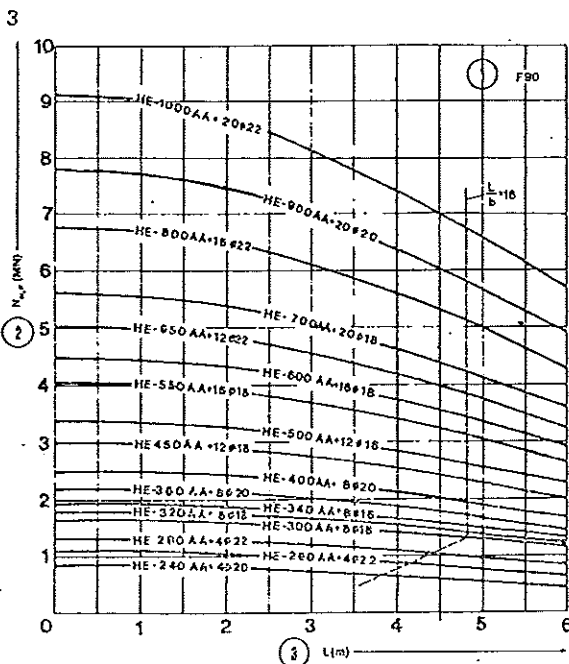
steel

sign tools give immediately the adequate composite section (including rolled H-shape, concrete and reinforcing bars) in function of the axial load, the column length and the required time of fire exposure (Fig. 3) (1).

In spite of the undoubtedly very high practical value of these simplified calculation models, it must be recognized, however, that problems arise as soon as the real situation is outside the application field covered by tests. So it will be difficult to find the adequate answer for very long or slender columns under fire conditions or to analyze special types of composite cross sections (Fig. 4). Another important problem is the M/N interaction behaviour of composite columns (Fig. 5) for which solutions are given at ambient temperature. No answer is available for this interaction behaviour at high temperature, in which case of course the simplified mode approach is unsuited. Besides it should be noted that the simplified calculation models do not cover the effects of the internal thermal stress field of a composite cross section. However the highly differential temperature field, created under fire conditions in a composite cross section, leads to strong internal stresses (Fig. 6) which undoubtedly affects the load bearing capacity.

For these reasons a numerical model is needed in order to allow an exact thermal and mechanical system analysis without any restrictions as to the geometry of the cross-sections, the building structural system, the load combinations, etc.

(1) J. B. Schleich: "Fire safety design of composite columns", Report presented at the International Conference, Luxembourg, April 11 and 12, 1984.

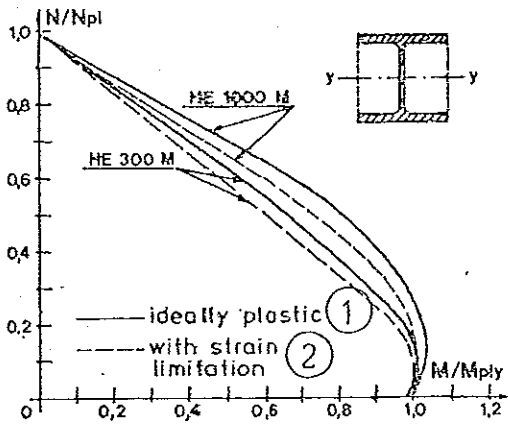


3 Charges critiques de ruine des profils HEAA après 90 min d'exposition au feu ISO ($\sigma_c = 235 \text{ N/mm}^2$; $\sigma_s = 45 \text{ N/mm}^2$) 1 Résistance au feu 2 Charge critique de ruine, 3 Longueur de colonne

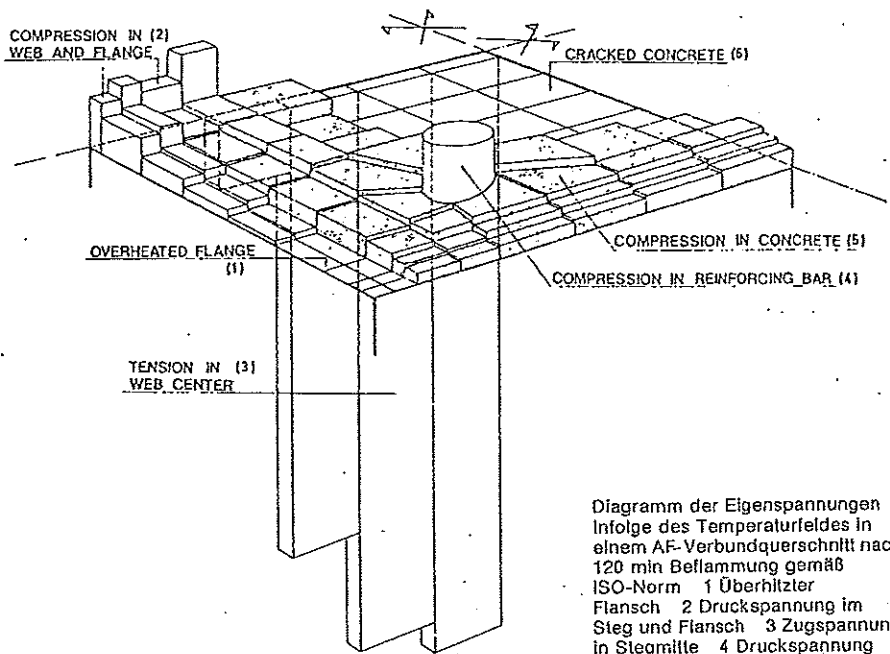
Bruchlast der HEAA-Profile nach 90 min genormter Brandbeanspruchung
1 Feuerklasse 2 Bruchlast 3 Stützenlänge

Ultimate buckling loads of HEAA sections after 90 min of exposure to ISO fire
1 Fire class 2 Ultimate buckling load 3 Column length

4 Types particuliers de profils mixtes capables de reprendre les charges axiales et les moments fléchissants selon les axes yy ou/et zz 1 Peinture intumescente
Besondere Arten von Verbundquerschnitten zur Aufnahme der Axiallasten und Biegemomenten gemäß den yy- oder/und den zz-Achsen 1 Feuerhemmender Anstrich
Special types of composite cross sections able to support axial loads and bending moments according to yy or/and zz axes.



5 Diagramme d'interaction M/N des colonnes mixtes AF à température ambiante 1 idéalment plastique 2 Avec limitation des déformations
 M/N-Interaktionsdiagramm von AF-Verbundstützen bei Umgebungstemperatur 1 Ideal plastisch 2 Mit Dehnungsbesmung
 M/N interaction diagram for AF composite columns at ambient temperature



6 Schéma de contraintes internes dues au champ thermique dans une coupe transversale mixte AF après 120 min d'un feu correspondant à la norme ISO
 1 Semelle surchauffée 2 Compression dans âme et semelle 3 Traction au centre d'âme 4 Compression dans barre d'armature 5 Compression dans béton 6 Béton fissuré

Diagramm der Eigenspannungen infolge des Temperaturfeldes in einem AF-Verbundquerschnitt nach 120 min Beflammung gemäß ISO-Norm 1 Überhitzter Flansch 2 Druckspannung im Steg und Flansch 3 Zugspannung im Stegmittle 4 Druckspannung im Bewehrungsstab 5 Druckspannung im Beton 6 Riß im Beton
 Internal stress diagram due to the temperature field in a composite AF section, after 120 min of ISO fire

acier

3. Méthodes numériques utilisées pour réaliser une telle simulation

3.1. Connaissances de base pour analyse théorique

Il faut tout d'abord analyser la structure avant la naissance de l'incendie sous l'effet des charges extérieures. Si ce calcul est particulièrement simple pour les poutres en acier où le matériau est élastique linéaire, il n'en va pas de même dans le cas des structures mixtes et en particulier des colonnes mixtes, où il faut tenir compte de non-linéarités matérielles et géométriques. Dès lors, un procédé général d'analyse pas-à-pas est utilisé pour effectuer ce calcul. Pour étudier la structure pendant le développement de l'incendie, deux problèmes distincts doivent être résolus :

- un problème thermique consistant à évaluer la distribution de la température dans l'élément;
- un problème mécanique consistant à déterminer le comportement structurel de l'élément sous l'effet de cet accroissement de température jusqu'au moment où l'on atteint la ruine.

Pour pouvoir résoudre ce problème analytiquement, il est nécessaire de disposer de données sur les propriétés thermiques et mécaniques aux températures élevées des matériaux utilisés (du béton et de l'acier).

En ce qui concerne les propriétés thermiques, ou plutôt thermophysiques, elles peuvent se déduire de l'équation de conduction de la chaleur.

stahl

3. Numerisches Verfahren zur Analyse von Stahl- und Verbundkonstruktionen unter Brandbedingungen

3.1. Grundkenntnisse für die theoretische Analyse

Vor der Entwicklung des Brandes wird das Element der äußeren Belastung ausgesetzt. Deshalb muß das strukturelle Verhalten des Elements bei Umgebungstemperaturen unter statischen Lasten bestimmt werden. Das ist bei Stahlträgern einfach, bei denen angenommen wird, daß das Material linear-elastisch ist.

Bei Verbund- oder Betonkonstruktionen ist das Problem komplizierter, da die Spannungs-Dehnungs-Merkmale des Betons nicht mehr linear-elastisch sind. Deshalb wird eine Iterationsberechnung unter Berücksichtigung der Nicht-Linearität von Material und äußerer Gestalt angewendet.

Zur Tragwerksuntersuchung während der Entwicklung des Brandes müssen zwei unterschiedliche Aufgaben gelöst werden:

- eine thermische Aufgabe zur Bestimmung der Temperaturverteilung in dem Element, und
- eine mechanische Aufgabe, die aus der Bestimmung des strukturellen Verhaltens infolge des hier oben berechneten Temperaturanstiegs besteht.

Zur analytischen Lösung dieser Aufgabe müssen zunächst Daten über die thermischen und die mechanischen Eigenschaften des Stahls und des Be-

steel

3. Numerical procedure for the analysis of steel and composite structures under fire conditions

3.1. Basic knowledge for the theoretical analysis

Before the development of the fire the element is submitted to external loads. Therefore the structural behaviour of the element at ambient temperature under static loads must be analyzed. This is rather simple for steel beams where the material is assumed to be perfectly linear elastic.

For composite structures the problem is much more complicated since the stress-strain characteristics of concrete are no longer linear elastic. Therefore a step-by-step analysis taking into account material and geometrical non linearities is used as a general procedure for this first part.

To analyze the structure during the development of the fire two distinct problems must be solved:

- a thermal problem consisting in the evaluation of the temperature distribution in the element;
- a mechanical problem consisting in the evaluation of the structural behaviour due to the temperature increase calculated hereabove.

To solve these problems analytically it is necessary to collect data about thermal and mechanical properties of the materials used, i.e. steel and concrete. Furthermore, due to the high temperatures reached, the variations of temperature affect significantly the pro-

Les propriétés thermophysiques à considérer sont la conductivité thermique λ , la chaleur massique c , la masse volumique ρ , la diffusivité thermique $a = \lambda/c\rho$, auxquels il faut ajouter la dilatation thermique α .

En ce qui concerne les propriétés mécaniques, les méthodes de calcul simplifiées pour l'évaluation de la résistance au feu ne nécessitent la connaissance que des caractéristiques classiques: la résistance à la traction et à la compression, la limite d'élasticité et le module d'élasticité.

Dans un procédé numérique pas-à-pas tel que celui-ci, ces caractéristiques ne sont pas suffisantes et il est nécessaire d'avoir des données sur la relation contrainte-déformation instantanée, la déformation de rupture, le fluage, le retrait et la relaxation.

Les résultats expérimentaux font apparaître que le fluage et la relaxation aux températures élevées de l'acier et du béton ont une influence non négligeable. Ceci est surtout vrai pour les éléments où la compression a un effet déterminant comme les colonnes, alors que pour les éléments où la flexion est prépondérante, comme les poutres et les planchers, le fluage n'influence guère le mécanisme de rupture et la résistance au feu. Des modèles pour le fluage et la relaxation de l'acier et du béton ont été proposés et ce type de modèle va être introduit incessamment dans le programme.

3.2. Distribution de la température dans l'élément

Le premier problème à résoudre est la modélisation de l'environnement créé par l'incendie. La variation de la température extérieure sera généralement celle prévue par la courbe ISO, mais il n'y a aucune difficulté à introduire dans le programme d'autres courbes température-temps.

Un autre problème important concerne les échanges thermiques, c'est-à-dire le flux de chaleur transmis à l'élément. Ce flux est généralement exprimé comme la somme d'un terme convectif et radiatif.

3.3. Analyse de la structure sous températures croissantes

On utilise ici la méthode des éléments finis. Dans cette méthode, une structure conventionnelle est considérée comme un assemblage d'éléments connectés et un nombre discret de points appelés nœuds (fig. 7).

Lorsque les déplacements sont connus en tous les points de l'élément, on peut alors déterminer les déformations et les contraintes.

Par suite des non-linéarités matérielles et géométriques, il est essentiel d'utiliser

tons gesammelt werden. Außerdem werden die Eigenschaften dieser Baustoffe infolge der erreichten hohen Temperaturen wesentlich durch die Temperaturunterschiede beeinflusst, was in dem numerischen Modell berücksichtigt werden muß.

Das Wärmeverhalten, d.h. die Wärmeleitfähigkeit λ , die Wärmekapazität c , die Temperaturleitfähigkeit $a = \lambda/c\rho$ und die Wärmedehnung werden hier nicht besprochen.

Was die mechanischen Eigenschaften anbetrifft, so erfordern die vereinfachten Verfahren zur Berechnung der Branddauer nur die Bestimmung der herkömmlichen Merkmale, d.h. der Zug- und Druckfestigkeit, der Fließspannung und des E-Moduls. Bei dem Iterationsverfahren sind diese Merkmale aber nicht ausreichend, und die Kenntnisse über Spannungs-Dehnungs-Beziehung, Kriechverhalten und Relaxation sind erforderlich.

Experimentelle Untersuchungen zeigen, daß das Wärmekriechen und die Relaxation von Beton und Stahl einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß haben. Dies betrifft hauptsächlich solche Elemente, bei denen Druck eine kennzeichnende Wirkung ausübt, z.B. Stützen, während bei Elementen, wie bei Trägern und Platten, bei denen die Biegung bestimmend ist, nachgewiesen wurde, daß das Kriechen den Mechanismus des Versagens und die Branddauer nicht wesentlich beeinflusst.

Modelle des Kriechens und der Relaxation wurden für beide Baustoffe vorgeschlagen, die schon in naher Zukunft in das Programm eingeführt werden sollten.

3.2. Temperaturverteilung in dem Element

Die erste zu lösende Aufgabe besteht in der Modellierung der durch den Brand geschaffenen Umgebung. Die Veränderung der Außentemperatur ist gewöhnlich durch die ISO 834-Kurve gegeben; andere Gleichungen können natürlich auch in das Programm eingeführt werden.

Ein anderes wichtiges Problem ist die Ermittlung der Dichte des auf das Element übertragenen Wärmeflusses. Sie wird gewöhnlich in einen Konvektions- und einen Abstrahlungsteil unterteilt.

3.3. Lösungsstrategie bei der thermo-mechanischen Untersuchung der Konstruktion

Bei der Methode der finiten Elemente wird ein übliches Bauwerk als ein Zusammenbau von Konstruktionselementen angesehen, die an einer diskreten Zahl von Knotenpunkten miteinander verbunden sind (Bild 7).

Wenn die Verschiebungen an allen Punkten bekannt sind, können die Dehnungen an jedem beliebigen Punkt bestimmt werden.

Bei Anwendung der geeigneten Baustoffeigenschaften kann man die Span-

erties of these materials and this must be taken into account in the numerical model.

The thermal properties, i.e. the thermal conductivity λ , the heat capacity c , the density ρ , the thermal diffusivity $a = \lambda/c\rho$ and the thermal strains will not be discussed here.

Concerning mechanical properties simplified methods for the evaluation of the fire endurance require only the determination of the classical characteristics, i.e. ultimate strength in tension and compression, yielding stress and modulus of elasticity. In a step-by-step numerical procedure these characteristics are not sufficient and information concerning the instantaneous stress-strain relation, creep and relaxation are necessary.

Experimental investigations show that thermal creep and relaxation of concrete and steel have a non negligible influence. This is mainly true for elements where compression has a significant effect like columns, while in elements where bending is determinant like in beams and slabs it has been proved that creep does not influence very much the failure mechanism and the fire endurance.

Creep and relaxation models have been proposed for both materials. These types of models should be introduced in the program in the near future. Up to now these effects are taken into account by adopting "smooth" stress-strain diagrams for concrete and steel.

3.2. Temperature distribution in the element

The first problem to be solved is the modelling of the environment created by a fire. The variation of external temperature is usually given by the standard temperature-time curve defined in ISO 834, but other types of equations can of course be introduced in the program.

The density of heat flow transmitted to the element is a problem quite involved. Usually it is divided in a convection part and a radiation part.

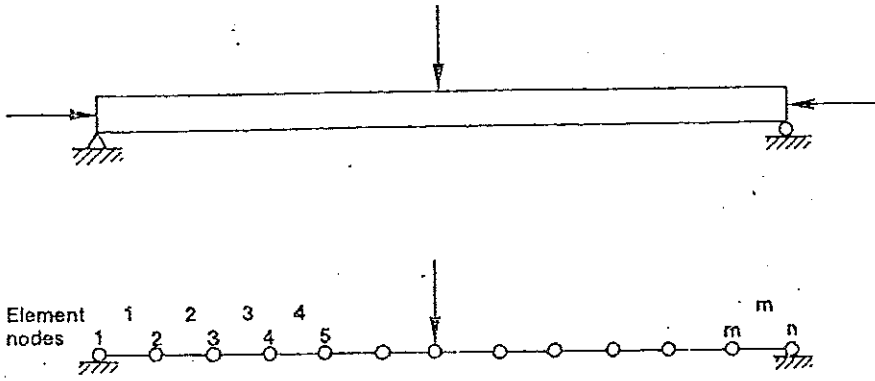
3.3. Solution strategy for the thermomechanical analysis of the structure

In the finite element method a conventional engineering structure is considered as an assemblage of structural elements interconnected at a discrete number of nodal points (Fig. 7).

If the force-displacement relationships for the individual elements are known it is possible to derive the properties and study the behaviour of the assembled structure.

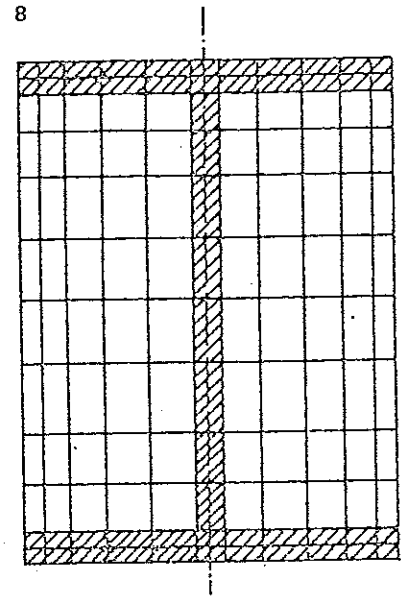
With displacements known at all points within the element the strains at any point can be determined.

Because of material and geometrical non-linearities, an iterative approach



7 Discrétisation de l'élément structurel 1 Nœuds de l'élément
 Diskretisieren des strukturellen Elements 1 Knoten des Elements
 Discretization of the structural element

8 Discrétisation de la section transversale d'un élément mixte
 Diskretisieren des Querschnitts eines Verbundelements
 Discretization of the cross section of a composite element



acier

une procédure pas-à-pas. C'est pourquoi, avant le début de l'incendie, les charges sont appliquées à la structure de manière incrémentielle. Lorsque la température extérieure s'accroît, on considère des incréments de temps correspondant à des incréments de température extérieure.

Le problème à résoudre est dit à déformations initiales. En effet, les matériaux sont soumis à des déformations initiales dues aux changements de température et aux effets du fluage. Pour obtenir les déformations totales, il faut ajouter à ces déformations initiales celles dues aux contraintes.

Les forces hors équilibre doivent être redistribuées à travers la structure de manière à restaurer l'équilibre.

D'autre part, les relations contrainte-déformation dans les matériaux sont non linéaires et variables en fonction de la température. De plus, il faut tenir compte du changement de géométrie de la structure. La matrice de rigidité de la structure doit donc être constamment actualisée.

Ceci donne naissance à un procédé itératif connu sous le nom de méthode de Newton-Raphson.

Une des originalités du programme réside dans la discrétisation de la section droite qui est subdivisée en mailles rectangulaires (fig. 8). Cette discrétisation est choisie de façon à être la même que celle utilisée dans l'analyse thermique. Ainsi, les températures, déformations, contraintes peuvent varier d'une maille à l'autre.

4. Comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux d'une poutre mixte

Afin de démontrer la précision des résultats numériques obtenus par le programme, on a procédé à l'analyse d'une poutre mixte et les résultats théoriques ont été comparés avec les résultats des essais réalisés à l'Université de Braunschweig.

stahl

nungen als Funktion der Dehnung berechnen.

Bei der stofflichen und geometrischen Nichtlinearität ist ein iterativer Lösungsweg wichtig. Vor Ausbruch eines Brandes werden die Lasten schrittweise aufgebracht, und bei Außentemperaturanstieg wird die Zeit inkremental unterteilt.

Die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen in den Baustoffen sind nicht-linear; außerdem verändern sie sich mit der Temperatur. Da auch große Verschiebungen berücksichtigt werden sollen, muß bei der Entwicklung des Brandes die Steifigkeitsmatrix bei jedem Schritt der Lasterhöhung und der Zeit realistisch dargestellt werden.

Zusammen mit der realistischen Darstellung der Steifigkeitsmatrix führt dies zur Anwendung des Newton-Raphson-Verfahrens.

Die hauptsächlichste Neuigkeit dieses Programms ist die Diskretisierung des Querschnitts, der in Teilscheiben zur Bildung von rechteckigen Maschen unterteilt wird (Bild 8). Die Diskretisierung des Querschnitts wurde gewählt, damit dieser der gleiche wie bei der thermischen Analyse ist. Deshalb können sich die Temperaturen, Dehnungen und Spannungen von einer Teilscheibe zur anderen ändern.

4. Vergleich der theoretischen mit den experimentellen Ergebnissen bei einem Verbundträger

Zum Nachweis der Genauigkeit der numerischen Ergebnisse, die bei dem beschriebenen Verfahren erzielt werden können, wurde an der Technischen Universität Braunschweig ein Verbundträger mit T-Querschnitt untersucht und

steel

is essential. Before fire occurs the loads are applied step-by-step and when the external temperature increases the time is divided into time increments. Stress-strain relations in the materials are non-linear and moreover they vary with temperature. Since it is also desired to take large displacements into account the stiffness matrix has to be actualized at each step of the loading and at each time increment during the development of the fire.

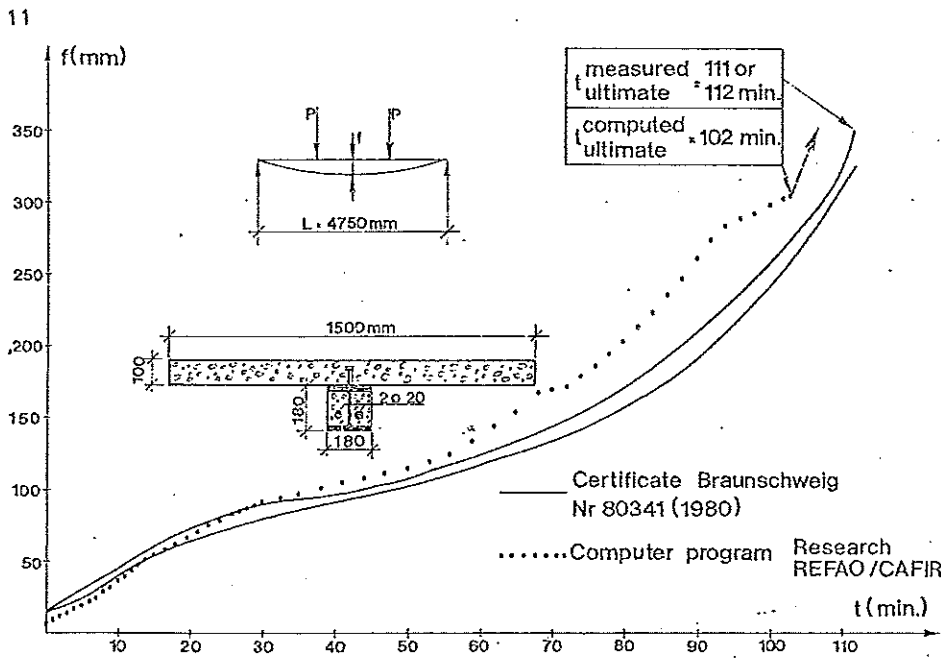
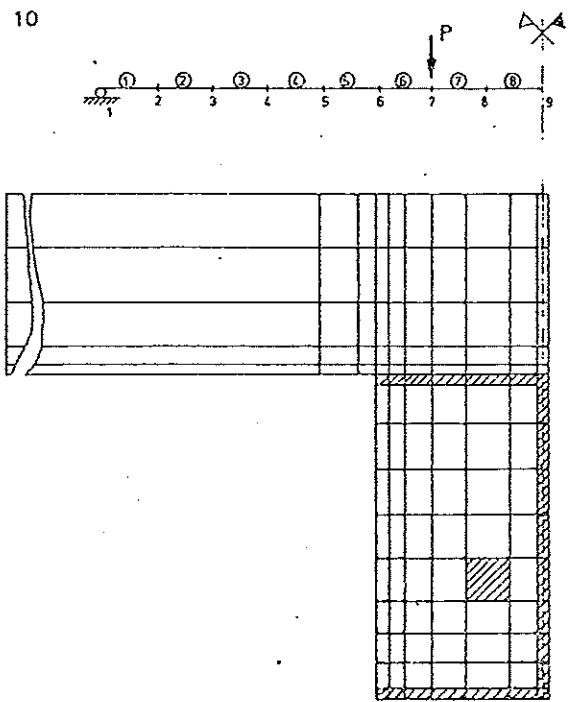
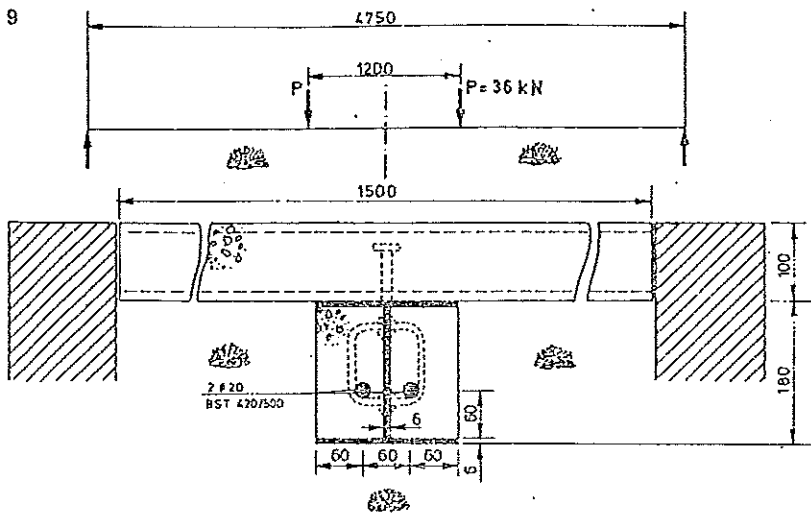
In the problem to be solved the materials are subjected to initial strains due to temperature changes and to creep effects; at the present time creep effects are not yet taken into account in the model. Thus the stresses will be caused by the difference between the total strains derived from the nodal displacements and the initial strains.

At every stage, the difference between the internal forces and the applied loads is determined at all nodes of the structure. These unbalanced residual forces are then redistributed throughout the structure to restore equilibrium. This combined with the actualization of the stiffness matrix gives rise to the Newton-Raphson process.

The main originality of this program lies in the discretization of the cross section, which is divided into subslices forming a rectangular mesh (Fig. 8). The discretization of the cross section is chosen in order to be the same as in the thermal analysis. Therefore the temperatures, strains and stresses can vary from one subslice to another.

4. Comparison between theoretical and experimental results for a composite beam

To demonstrate the accuracy of the numerical results which can be obtained from the described procedure, a composite T beam has been analyzed and the theoretical results compared with test results obtained at the Technical University of Braunschweig.

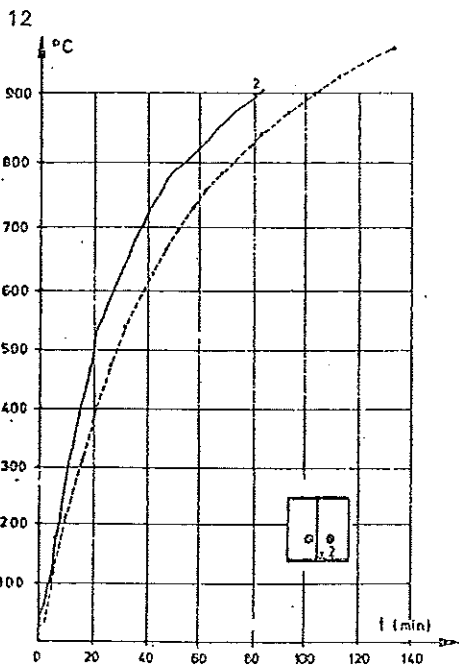


9 Système de chargement et d'échauffement
Belastungs- und Beflammungssystem
Loading and heating system

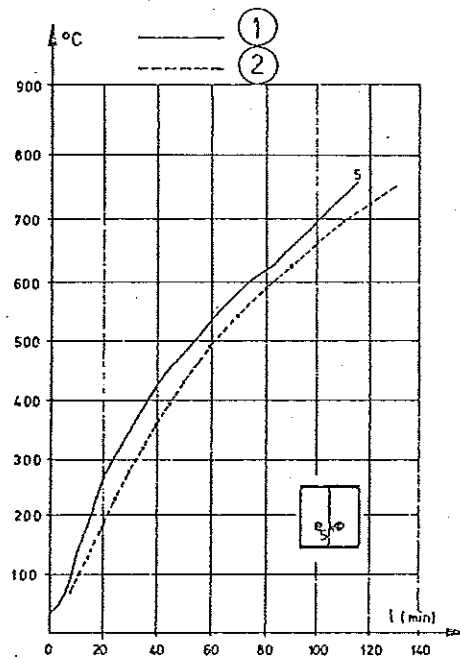
10 Division d'élément et de section
Unterteilung des Elements und des Querschnitts
Element and section division

11 Courbe de déformation
Durchbiegungskurve
Deflection curve

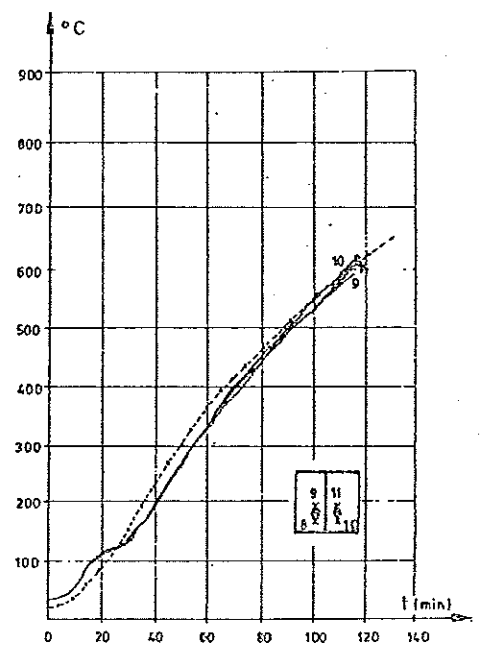
12 Courbes de température 1 Essais
2 Programmes
Temperaturkurven 1 Versuch 2 Programm
Temperature curves 1 Test 2 Program



a)



b)



c)

acier

Le système de mise en charge et la disposition de la poutre sur le four sont indiqués sur la figure 9. La poutre est chargée et chauffée de manière symétrique. Le programme thermique est appliqué conformément à la courbe ISO R 834. Les dimensions de la section transversale et la disposition des armatures sont aussi indiquées sur la figure 9.

Par suite de la symétrie, on ne considère qu'une demi-poutre et une moitié de section transversale. Comme on peut le voir, la demi-poutre est divisée en 8 éléments finis (fig. 10).

La figure 12a montre l'augmentation de température à la jonction entre l'âme et la semelle inférieure. La figure 12b donne l'accroissement de température sur l'âme à hauteur des armatures longitudinales.

Enfin, la figure 12c donne l'augmentation de température au droit des armatures longitudinales.

Dans les trois cas, on obtient une bonne concordance entre résultats théoriques et expérimentaux.

Dans une poutre mixte sur deux appuis simples soumise à un essai au feu, les gradients thermiques importants qui apparaissent sur la section droite produisent des déformations importantes de l'élément même au début de l'essai, alors que les propriétés mécaniques des matériaux demeurent inchangées.

La figure 11 montre que la procédure numérique peut simuler ce comportement.

5. Conclusions

En conclusion, on a présenté ici une méthode numérique pour l'analyse du comportement au feu des structures en acier et mixtes.

Jusqu'ici, on a obtenu une bonne concordance entre résultats théoriques et expérimentaux, mais certains paramètres doivent encore être calibrés, notamment à l'aide des résultats de la recherche expérimentale mis au point ou améliorés.

Le développement de cet outil de simulation doit conduire à une meilleure compréhension du comportement au feu des structures en acier et mixtes et à une amélioration de l'évaluation de leur résistance au feu.

On se propose d'analyser l'influence de différents facteurs tels que le type d'incendie, les effets du second ordre, la relaxation, le bridage et la dilatation thermique.

Avec tous ces éléments, on souhaite montrer que, très souvent, la protection de ce type de structure pourrait être réduite dans bien des cas et que les structures en acier et mixtes soumises au feu ont un meilleur comportement que celui admis jusqu'à présent.

stahl

die theoretischen Ergebnisse mit den experimentellen verglichen.

Das Belastungs- und Beflammungssystem zeigt Bild 9. Dabei wird der Träger symmetrisch belastet und erwärmt. Das thermische Programm kam entsprechend der ISO R 834-Kurve zur Anwendung. Die Querschnittabmessungen und die Anordnung der Bewehrung zeigt das Bild 9. Infolge der Symmetrie brauchte nur eine Hälfte des Querschnitts bei der Einleitung in Teilschleiben in Betracht gezogen zu werden, und nur eine Hälfte der Länge des Trägers wurde in 8 finite Elemente unterteilt (Bild 10).

Die Bilder 12a und b zeigen den Temperaturanstieg in dem Stahlprofil. Eine gute Übereinstimmung besteht zwischen den theoretisch und den experimentell ermittelten Ergebnissen. Die Genauigkeit der numerischen Ergebnisse des Temperaturanstiegs in den Bewehrungsstäben ist sehr gut (Bild 12c).

Bei einem einfach aufgelagerten, dem Brandversuch ausgesetzten Verbundträger entstehen durch den steilen Anstieg des Temperaturgradienten schon bei Beginn des Versuchs große elastische Durchbiegungen, wenn die Steifigkeitseigenschaften des Materials noch unverändert bleiben. Bild 11 zeigt, daß das numerische Verfahren dieses Verhalten simulieren kann.

5. Schlußfolgerungen

Ein numerisches Verfahren zur Bestimmung des strukturellen Verhaltens von Stahl- und Verbundkonstruktionen unter Brandbedingungen wurde vorgestellt. Die theoretisch und experimentell ermittelten Werte eines Verbundträgers wurden miteinander verglichen, wobei eine gute Übereinstimmung dieser Ergebnisse miteinander festzustellen war. Einige Kennwerte müssen aber noch genau festgelegt werden, und einige Umwandlungen sind noch vorzunehmen, um Näherungen gewährleisten zu können, wenn die Konstruktion anstehenden Temperaturen ausgesetzt ist.

Die Entwicklung dieses numerischen Werkzeugs führt zur Verbesserung der Voraussage des Feuerwiderstands und zu einer besseren Kenntnis des Verhaltens von Stahl- und Verbundkonstruktionen unter Brandbedingungen. Der Einfluß mehrerer Faktoren, wie der tatsächlicher Brände, besonderer Brandbedingungen, Einwirkungen 2. Ordnung, des Kriech- und Relaxationsverhaltens, wärmebedingter Einspannungen und elastischer Durchbiegungen ist noch zu untersuchen. Mit der Kenntnis des Einflusses dieser Faktoren soll nachgewiesen werden, daß der Brandschutz dieser Elemente in vielen Fällen vermindert werden kann, oder daß sich eine gegebene Stahl- oder Verbundkonstruktion unter tatsächlichen Brandbedingungen besser verhält als man bisher angenommen hat.

steel

The loading and heating system is presented in Figure 9. The beam is loaded and heated symmetrically. The thermal program is applied according to the ISO R 834 Recommendations. The dimensions of the cross section and the reinforcement arrangement are indicated in Figure 9. Because of the symmetry only one half of the cross section has to be considered for the division in subslices and only one half of the length of the beam is subdivided in 8 finite elements (see Fig. 10).

Figures 12a and b show the temperature increase in the steel profile. There is a good agreement between theoretical and experimental results, though the resultant emissivity factor of steel seems to have been chosen a little low. The accuracy of the numerical results is very good for the temperature increase in the reinforcing bars (Fig. 12c).

In a simply supported composite beam submitted to a fire test, the steep thermal gradient on the cross section produces large deflections even at the beginning of the test when the stiffness properties of the materials remain unchanged. Figure 11 shows that the numerical procedure can simulate this behaviour (taking into account the underestimation of the emissivity factor).

5. Conclusions

A numerical procedure for the analysis of the structural behaviour of steel and composite structures under fire conditions has been presented. It is based on finite element method using beam elements with subdivision of the cross section in a rectangular mesh. The structure submitted to increasing temperatures is analyzed step-by-step using the Newton-Raphson process. A comparison between theoretical and experimental results has been made for a composite beam. There is a good agreement between theoretical and experimental results, but some parameters have still to be calibrated and some transformations have still to be made in order to ensure convergence when the structure is submitted to increasing temperatures.

The development of this numerical tool will lead to an improvement of the prediction of fire resistance and to a better understanding of the behaviour of steel and composite constructions under fire conditions. It is intended to analyze the influence of several factors such as real fires and special fire conditions, second order effects, creep and relaxation, thermal restraint and deflections. With this knowledge it is planned to show that very often the protection of these types of elements could be reduced, or that a given steel or composite structure behaves better under real fire conditions than assumed up to now.