Berücksichtigung der Baustoff-Ermüdung bei dynamische [i.e. dynamisch] beanspruchten Baukonstruktionen

Autor(en): **Rausch, Ernst**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **5 (1956)**

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-5977

Ib5

Berücksichtigung der Baustoff-Ermüdung bei dynamische beanspruchten Baukonstruktionen

Fadiga dos materiais nas estruturas submetidas a cargas dinâmicas

Fatigue des matériaux dans les structures soumises à des charges dynamiques

Fatigue of materials in structures under dynamical loading

PROF. DR.-ING. ERNST RAUSCH
Kettwig

Wird eine Baukonstruktion nicht nur durch statische (ständige) Lasten, sondern auch durch dynamische Kräfte (Stösse oder schwingende Kräfte) beansprucht, dann entstehen in einem Querschnitt des untersuchten Bauteiles die Gebrauchsspannungen

σ aus statischer Belastung
σ aus dynamischer Kraft,

eine Gesamtspannung demnach:

(1) $$\sigma = \sigma + \sigma_d \, .$$

Es fragt sich, wie hoch darf σ zugelassen werden ($\sigma_{zul.}$), um die verlangte m — fache Sicherheit gegenüber der Bruchgefahr (bzw. gegen Erreichung der Streckgrenze) zu gewährleisten.

Bei nur statischer Belastung ($\sigma_d = o$) ist

(2) $$\sigma_{s\ zul.} = \frac{\sigma_B}{m} \left(\text{bzw.}\ \frac{\sigma_{St}}{m} \right),$$

worin σ_B die Bruchfestigkeit (bzw. $\sigma_{St.}$ die Streckgrenze) bedeutet. Bei Überlagerung von statischer und dynamischer Beanspruchung ist

(3) $$\sigma_{zul.} < \sigma_{s\ zul.}$$

da die Festigkeit infolge Ermüdung des Baustoffes bei dynamischer (oftmals wiederholter bzw. schwingender) Beanspruchung geringer ist, als die statische Bruchfestigkeit. Die Festigkeit wird umso kleiner, je grösser der Anteil der dynamischen Beanspruchung in der Gesamtspannung ist. Den Verlauf der Festigkeit bei verschiedenem dynamischen Spannungsanteil zeigt das Dauerfestigkeits-Diagramm nach Smith [1, 2], Abb. 1.

In einem Achsenkreuz mit gleichen Masstäben sind hier als Abscissen die statischen Spannungen σ_S und als Ordinaten die Oberspannungen σ_O (grösster Zahlenwert, unabhängig vom Vorzeichen, für eine vorgegebene statische Spannung σ_S, der bei unendlich vielen Wechseln der dynamischen Spannung gerade noch nicht zum Bruch führt) und Unterspannung σ_U (kleinster Zahlenwert, unabhängig vom Vorzeichen, für eine vorgegebene statische Spannung σ_S wie vor) aufgetragen, wodurch sich die obere und untere Begrenzungslinie des Diagramms (Grenzlinien der Oberspannung bzw. der Unterspannung) ergeben. Die unter 45° gezogene Mittellinie des Diagramms enthält, wie die Abscisse, die Werte der statischen Spannungen und halbiert den Ordinatenabschnitt (die Schwingbreite $2\sigma_D$) zwischen den Grenzlinien der Ober- und Unterspannung. Der dynamische Spannungsanteil $\pm\sigma_D$ liegt also zwischen der 45° — Linie und den Grenzlinien der Ober- und Unterspannung. Als Indices wurden — zur Unterscheidung von den Gebrauchsspannungen — grosse Buchstaben verwendet. — Die Ordinate AB (= AO) stellt die (statische) *Bruchfestigkeit* σ_B dar ohne dynamischem Anteil ($\sigma_D = o$); die Ordinate CD die *Schwellfestigkeit*, wobei der statische und dynamische Anteil gleich gross sind ($\sigma_S = \sigma_D$), sodass die Spannung zwischen o und 2 σ_D pendelt; die Ordinaten EO und FO die *Wechselfestigkeit* σ_W, wobei der statische Anteil = Null ist, sodass die Spannung zwischen einem positiven und einem ebensogrossen negativen Grenzwert $\pm\sigma_W$ pendelt. — Im Wechselbereich COH haben Oberspannung σ_O und Unterspannung σ_U verschiedene Vorzeichen, in den Schwellbereichen links von H und rechts von C gleiche Vorzeichen.

Die für die Anstrengung des Baustoffes in der Regel massgebende Oberspannung σ_O hängt vom ruhenden Anteil σ_S/σ_O ab und ist in Abb. 2 als Funktion dieser Verhältniszahl aufgetragen.

Aus der Oberspannung σ_O erhält man die zulässige Spannung $\sigma_{zul.}$ des Gebrauchszustandes durch Division mit der verlangten Sicherheitszahl m der Baukonstruktion ($\sigma_{zul.} = \sigma_O/m$) nach Abb. 3, worin als Abscisse die Verhältniszahl der Gebrauchsspannungen σ_s/σ (statische Spannung zur Gesamtspannung) aufgetragen wurde.

Für den Spannungsnachweis oder für die Querschnittsbemessung eines Bauteils ist demnach die zulässige Spannungsgrenze nicht von

(1) DIN 50100, Dauerschwingversuch, Beuth-Vertrieb, Berlin W 15.
(2) «HÜTTE» des Ingenieurs Taschenbuch. 28. Auflg., I. Bd. S. 846, 861 u. 973, Verlag W. Ernst und Sohn, Berlin 1955.

vornherein bekannt, es muss zuerst die Verhältniszahl σ_s / σ gebildet und aus Abb. 3 die zugehörige zulässige Spannung $\sigma_{zul.}$ entnommen werden, um zu erkennen, ob im Falle des Spannungsnachweises eine Spannungsüberschreitung nicht vorliegt, oder im Falle der Querschnittsbemessung der angenommene Querschnitt ausreicht. — Das ist ein umständlicher Weg.

Bei der nach oben gekrümmten Linie der Oberspannungen ergibt sich eine bemerkenswerte Vereinfachung, wenn man im Diagramm der Abb. 1 die *Linie BDF der Oberspannungen zu Gunsten der Sicherheit*

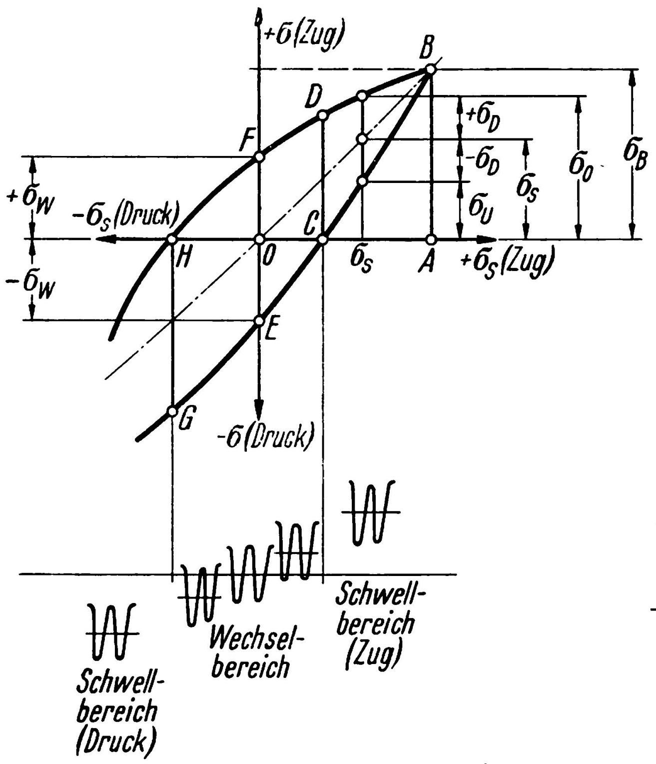

Abb. 1. Dauerfestigkeits-Diagram

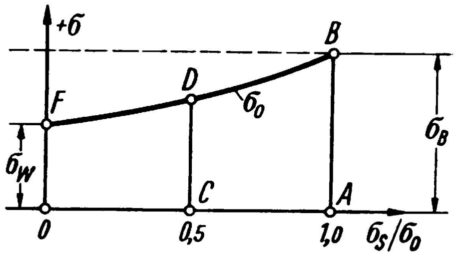

Abb. 2. Abhängigkeit der Oberspannung σ_0 vom ruhenden Anteil σ_S/σ_0

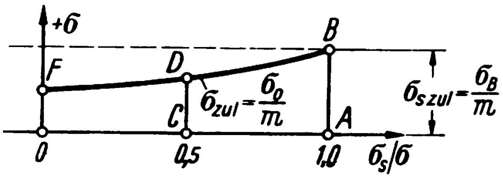

Abb. 3. Abhängigkeit der zulässigen Spannung $\sigma_{zul.}$ vom ruhenden Anteil σ_S/σ

mit einer Geraden BF ersetzt, wie es in Abb. 4 (in grösserem Masstab) geschehen ist. Dieses vereinfachte Diagramm hat die Eigenschaft, dass bei einem beliebigen statischen Spannungsanteil σ_S (Strecke IK) die Spannungs-Differenz $\sigma_B - \sigma_S$ (Strecke KM) zum dynamischen Spannungsanteil σ_D (Strecke KL) in einem konstanten Verhältnis

$$(4) \qquad \mu = \sigma_B / \sigma_W$$

steht, dem Verhältnis der statischen Bruchfestigkeit zur Wechselfestigkeit. Diese Verhältniszahl gibt an, in welchem Masse die statische Bruchfestigkeit grösser ist, als die zur rein dynamischen Beanspruchung gehörige Wechselfestigkeit, sie ist also ein Masstab für die Ermüdung des Baustoffes bei dauernder reiner Schwingungsbeanspruchung und kann daher als *Ermüdungsbeiwert* (oder Wechselfestigkeits-Beiwert) bezeichnet werden ([3, 4, 5]). Wird der dynamische Spannungsanteil σ_D mit diesem Ermüdungsbeiwert vervielfacht und zum statischen Anteil σ_S hinzugezählt, dann erhält man stets die statische Festigkeit σ_B und das *dynamische Spannungsproblem ist damit auf eine statische Aufgabe zurückgeführt.* Der mit dem Ermüdungsbeiwert μ vervielfachte dynamische Spannungsanteil $\mu \cdot \sigma_D$ ist die *statische Ersatzspannung,* die zum statischen Anteil addiert stets die statische Festigkeit ergibt.

Diese Betrachtung kann nun auch auf die Gebrauchsspannungen angewendet werden, indem man die Spannungsordinaten der Abb. 4

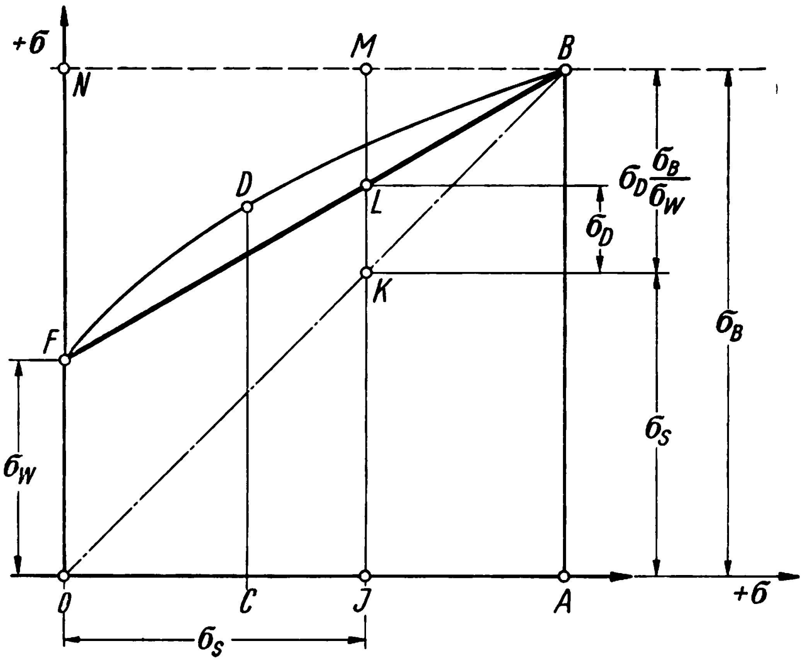

Abb. 4. Linie BDF der Oberspannungen wird — zu Gunsten der Sicherheit — durch eine Gerade BF ersetzt.

mit dem Sicherheitsbeiwert m dividiert. Abb. 5 sind die zulässigen Spannungsgrenzen $\sigma_{s\ zul.} = \sigma_B / m$ aus der statischen Festigkeit σ_B und $\sigma_{w\ zul.} = \sigma_W / m$ aus der Wechselfestigkeit σ_W aufgetragen, die ebenfalls im Verhältnis $\mu = \sigma_B / \sigma_W = \sigma_{s\ zul.} / \sigma_{w\ zul.}$ zueinander stehen. Die Gerade BF stellt die zulässige Grenze der Gebrauchsspannungen $\sigma = \sigma_s + \sigma_d$ dar. Wird der dynamische Anteil mit dem Ermüdungsbeiwert (Wechselfestigkeits-Beiwert) μ vervielfacht, und zum statischen Anteil addiert, so darf die so ermittelte Gesamtspannung $\sigma_s + \mu \cdot \sigma_d$ die statisch zulässige Spannung $\sigma_{s\ zul.}$ (waagerechte Gerade BM) nicht überschreiten. Wir können demnach nicht nur die statische Spannung σ_s, sondern auch die

(3) Rauch: «Berechnung von Maschinenfundamenten...» Bauing. Bd. 11 (1930) S. 226.

(4) Rausch: «Maschinenfundamente und andere dynamische Bauaufgaben» Vertrieb VDI-Verlag, Düsseldorf 1936 bis 1943.

(5) «HÜTTE» des Ingenieurs Taschenbuch 28. Auflg. I. Bd. S. 611 u. 27. Auflg. III. Bd. S. 948, Verlag W. Ernst u. Sohn Berlin 1955, 1951.

mit μ vervielfachte dynamische Spannung $\mu \cdot \sigma_d$ als statische Spannungsgrösse betrachten und mit der so ermittelten Gesamtspannung wie mit einer statischen Spannung rechnen, die unter der statisch zulässigen Spannungsgrenze bleiben muss.

Wir können aber noch einen Schritt weitergehen, indem wir nicht erst den dynamischem Spannungsanteil errechnen, vielmehr die, aus den Erregerkräften auf dynamischem Wege (mit Hilfe eines dynamischen oder Schwingungs-Beiwertes) [3, 4] ermittelte *dynamische Kraftgrösse selbst mit dem Ermüdungsbeiwert μ vervielfachen, und die Spannungsberechnung so durchführen, als würde es sich nurmehr um statische Beanspruchungen handeln.*

Beim Baustoff Stahl verläuft die Oberspannung wegen der Streckgrenze zunächst waagerecht (Abb. 6), die Einschaltung einer Geraden

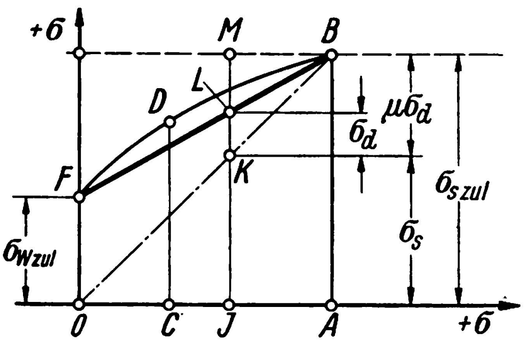

Abb. 5. Anwendung der Vereinfachung auf die Gebrauchsspannungen

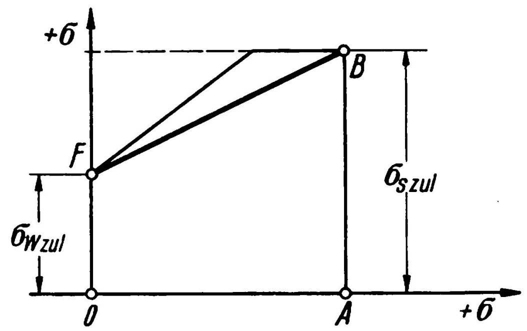

Abb. 6. Anwendung der Vereinfachung beim Baustoff Stahl

ergibt hier im Bereich der geringen dynamischen Anteile (geknickte Stelle der Oberspannungs-Linie) eine erheblichere Abweichung von der versuchsmässig ermittelten Oberspannungslinie.

Da bei diesem Verfahren die Oberspannungen (Linienzug BDF) zwischen den beiden Grenzwerten (Punkte B und F) nicht voll ausgenutzt sind, eignet sich das Verfahren für die Fälle, wo es auf eine restlose Ausnutzung des Baustoffes nicht ankommt, oder wo eine genaue Erfassung der dynamischen Kräfte bzw. Spannungen nicht möglich ist, sodass eine genaue Berechnung ohnehin keinen Sinn hat. Das ist fast bei sämtlichen dynamisch beanspruchten Baukonstruktionen des Hoch- und Tiefbaues, insbesondere bei Maschinenfundamenten der Fall. In anderen Fällen, besonders bei Eisenbahnbrücken wird man auf die durch Versuche ermittelten Diagramme (Abb. 1) oder darauf beruhende Tabellen zurückgreifen [6].

Die Grösse des Ermüdungsbeiwertes kann aus der statischen Festigkeit σ_B und aus der durch Dauerschwingversuch ermittelten Wechselfestigkeit σ_W nach Gl. 4 gewonnen werden. Liegen keine Versuchsergebnisse vor, so rechnet man sicher genug mit $\mu = 3$.

---

[6] Zum Beispiel das γ -Verfahren in den Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE) der deutschen Eisenbahn, vgl. auch: «HÜTTE» des Ingenieurs Taschenburch 27. Auflg. III. Bd. S. 187, Verlag W. Ernst u. Sohn. Berlin 1951.

Der Ermüdungsbeiwert nach Gl. 4 setzt voraus, dass es sich beim dynamischen Anteil σ_d der Gebrauchsspannung um eine dauernde Beanspruchung handelt (theoretisch unendliche Lastspielzahl). Handelt es sich um eine geringere Lastspielzahl (zeitweilig oder ausnahmsweise auftretende dynamische Beanspruchungen), so kann in Gl. 4 statt σ_W ein höherer Wert aus der Wöhlerkurve (1) entnommen werden, sodass in solchen Fällen ein geringerer Ermüdungsbeiwert (z.B. 2 oder 1,5) ausreicht. So kann also durch Benutzung des Ermüdungsbeiwertes auch eine voraussichtlich begrenzte Anzahl der Lastspiele Berücksichtigung finden.

ZUSAMMENFASSUNG

Wenn der Baustoff nicht nur statisch, sondern gleichzeitig auch dynamisch (durch Stösse oder schwingende Kräfte) beansprucht wird, ist seine Festigkeit infolge Ermüdung geringer als die statische Festigkeit. Dementsprechend ist beim Zusammenwirken statischer und dynamischer Beanspruchungen die im Querschnitt eines Bauteiles zulässige höchste Spannung geringer als die statisch zulässige Spannung, ihre Höhe hängt vom Verhältnis des Spannugsanteils der statischen Spannung zur Gesamtspannung ab. Beim Spannungsnachweis oder bei der Querschnittsbemessung ist demnach die zulässige Spannungsgrenze in Abhängigkeit von dieser Verhältniszahl variabel. Je kleiner diese Verhältniszahl ist, umso geringer ist auch die zulässige Spannungsgrenze.

Es ist umständlich, je nach dem Verhältnis der ständigen zur Gesamtspannung verschiedene zulässige Spannungen einhalten zu müssen. Bei gewissen Vernachlässigungen zugunsten der Sicherheit bietet sich ein einfacher Weg zur Vermeidung dieser Schwierigkeit:

Wird der dynamische Spannungsanteil mit einem *Ermüdungsbeiwert* μ vervielfacht (Verhältnis der statischen zur Wechselfestigkeit, auch Wechselfestigkeits-Beiwert genannt) und zum statischen Anteil addiert, so kann bei einem beliebigen Spannungsverhältnis (statischer Anteil zur Gesamtspannung) stets die konstante statisch zulässige Spannung als obere Grenze zugrundegelegt werden. Das dynamische Spannungsproblem ist damit auf eine statische Aufgabe zurückgeführt, der mit einem Ermüdungsbeiwert vervielfachte dynamische Spannungsanteil ist eine statische Ersatzspannung, die ebenso behandelt wird wie eine statische Beanspruchung. Noch einfacher ist es, nicht erst den dynamischen Spannungsanteil, sondern die aus den Erregerkräften auf dynamischem Wege ermittelte dynamische Kraftgrösse selbst mit dem Ermüdunsgsbeiwert zu vervielfachen und die Spannungsberechnung so durchzuführen, als würde es sich nurmher um statische Beanspruchungen handeln. — Man rechnet bei dauernder dynamischer Beanspruchung sicher genug mit $\mu = 3{,}0$ bei zeitweilig oder ausnahmsweise auftretender mit $\mu = 2{,}0$ oder 1,5.

RESUMO

A resistência de um material de construção submetido simultâneamente a cargas estáticas e dinâmicas (choques ou forças alternadas) é menor em virtude da fadiga, do que a sua resistência a cargas estáticas

simples. Por esta razão, a tensão admissível na secção de uma estrutura no caso de uma carga simultâneamente estática e dinâmica, é menor do que a tensão estática admissível, dependendo o seu valor da relação entre a componente estática da tensão e a tensão total. Quando da determinação das tensões ou do dimensionamento das secções, a tensão limite admissível é portanto variável pois depende dessa relação; quanto menor ela fôr, menor será o valor da tensão limite.

Torna-se muito trabalhoso ter que admitir para a tensão limite valores variáveis com a referida relação. Fazendo determinadas simplificações, aliás em benefício da segurança, obtém-se um processo de cálculo que permite evitar esta dificuldade.

Multiplicando a componente dinâmica da tensão por um *coeficiente de fadiga* μ (relação entre a resistência estática e a resistência aos esforços alternados) e juntando-a à componente estática, pode tomar-se para uma dada relação de tensões (componente estática/tensão total), a tensão total como tensão limite superior. O problema dinâmico é assim transformado num problema estático, sendo a tensão dinâmica — multiplicada pelo coeficiente de fadiga — considerada como uma tensão estática suplementar que se pode portanto utilizar como tal nos cálculos. Em vez de calcular as tensões dinâmicas, torna-se ainda mais fácil multiplicar directamente as forças dinâmicas calculadas pelo coeficiente μ, e conduzir o cálculo das tensões como se se tratasse de cargas estáticas. No caso de cargas dinâmicas permanentes pode-se calcular tomando $\mu = 3$, no caso de cargas temporárias ou ocasionais pode-se tomar $\mu = 2$ ou $\mu = 1,5$.

RÉSUMÉ

La résistance d'un matériau de construction à l'action simultanée de charges statiques et dynamiques (chocs ou efforts alternés) est inférieure, en vertu de la fatigue, à sa résistance aux simples charges statiques. Pour cette raison, la contrainte admissible dans la section d'une charpente soumise à des charges statiques et dynamiques simultanées, est inférieure à la contrainte statique admissible, et sa valeur dépend du rapport entre la composante statique de la contrainte et la contrainte totale. Lors du calcul des contraintes ou du dimensionnement des sections, la contrainte limite admissible est donc variable puisqu'elle dépend de ce rapport; plus ce rapport est petit plus la contrainte limite sera faible.

Les calculs sont rendus trés laborieux par le fait d'avoir à admettre pour la contrainte limite des valeurs variables avec rapport. En admettant un certain nombre de simplifications — dans le sens de la sécurité — il est possible d'obtenir un procedé de calcul permettant d'éviter cette difficulté.

En multipliant la composante dynamique de la contrainte par un *coefficient de fatigue* μ (rapport entre la resistance statique et la résistance aux efforts alternés) et en l'additionnant à la composante statique, il est alors possible d'admettre, pour un rapport de contraintes donné (composante statique/contrainte totale) cette contrainte totale comme contrainte limite supérieure. Le problème dynamique est ainsi transformé en problème statique, et la contrainte dynamique, multipliée par le coef-

ficient de fatigue, est alors considerée comme une contrainte statique suplémentaire que l'on peut donc utiliser comme telle dans le calcul. Au lieu de calculer les contraintes dynamiques, il est encore plus simple de multiplier directement les efforts dynamiques calculés par le coefficient μ et de conduire le calcul des contraintes comme s'il s'agissait de charges statiques. Dans le cas de charges dynamiques permanentes, l'on prend $\mu = 3$, dans le cas des charges temporaires ou occasionnelles l'on prend $\mu = 2$ ou $\mu = 1,5$.

SUMMARY

Due to fatigue, the resistance of building materials submitted to the simultaneous action of static and dynamic (impact or alternate) loads is smaller than its resistance under simple static loads. For this reason, the permissible stress in a structure's cross-section in the case of simultaneous static and dynamic loading is smaller than the permissible static stress, and its value depends on the ratio of the static stress component to the total stress. When determining the stresses or the dimensions of the cross-sections, the maximum permissible stress is thus variable depending on that ratio; the smaller the ratio, the smaller the value of the maximum permissible stress.

It is a rather elaborate process to have to take as maximum permissible stress, variable values according to the ratio mentioned above. Assuming a certain amount of simplifying — always on the safe side — it becomes possible to avoid this difficulty by a simple process of calculation.

Multiplying the dynamic component of the stress by a *fatigue coefficient* μ (equal to the static resistance/alternate load resistance ratio) and adding it to the static component, it becomes possible to take, for a given stress ratio (static component/total stress ratio), tlus total stress as the maximum existing stress. The dynamic problem is thus turned into a static one, the dynamic stress — multiplied by the fatigue ratio — being considered as an extra static stress that can thus be handled as such in the calculation. Instead of determining the dynamic stresses, it is easier to directly multiply the calculated dynamic loads by coefficient μ and carry on the calculation of the stresses as in the case of static loads. In the case of permanent dynamic loading, the coefficient should be taken as $\mu = 3$, while in the case of temporary or occasional loading the coefficent may be taken as $\mu = 2$ or $\mu = 1,5$.