

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 82 (1964)
Heft: 34

Artikel: Choix des qualités et des nuances des aciers
Autor: Dubas, Ch.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-67558>

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: 18.01.2026

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

Choix des qualités et des nuances des aciers

DK 624.014.2.002.3

Par Ch. Dubas, ing. civil dipl. E. P. F., Dr. sc. techn., directeur général des Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey SA.

Texte préparé pour les journées d'études organisées par la S. I. A., groupe professionnel des Ingénieurs des ponts et charpentes, les 8 et 9 novembre 1963 à Zurich.

Le but du présent exposé est de montrer tout d'abord que la simple connaissance de la résistance de rupture à la traction statique sur éprouvette, même accompagnée de caractéristiques de pliage et d'endurance, n'est plus suffisante pour l'ingénieur appelé à concevoir des ouvrages métalliques modernes et à en diriger les travaux. Cette notion de résistance de rupture à la traction statique n'a en effet de sens pratique que si elle est liée à la notion absolument essentielle de résistance à la fragilité de l'acier. C'est seulement ainsi que l'on peut déterminer, avec toute la sécurité voulue, la résistance réelle du métal incorporé dans l'ouvrage, sans laquelle les calculs de résistance n'ont point de valeur.

Il sera ensuite montré que l'essai de résilience, c'est-à-dire le choc d'un poids (mouton) sur un barreau entaillé, ou tout essai du même genre, est indispensable en ce qui concerne les ouvrages métalliques importants. Cela ne veut d'ailleurs pas dire que l'on doive multiplier sans discernement le nombre des prélevements et des éprouvettes, ni augmenter sans raison valable la sévérité de l'essai.

En troisième lieu, quelques règles pratiques seront données pour l'utilisation du critère de résilience, en attendant que des règles de conduite, actuellement en préparation, puissent figurer dans les normes de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, ou en annexe à ces normes. Il va d'ailleurs de soi que le problème de la fragilité et des essais de résilience doit être réglé sur le plan européen, où il donne déjà lieu à beaucoup de discussions au sein de plusieurs instances différentes et parfois en opposition. Il en est de même pour les prescriptions les plus importantes de l'art de l'ingénieur.

Finalement on montrera que, les garanties de résilience exigeant des aciers soigneusement élaborés, une simple question de prix conduit la plupart du temps et presque automatiquement à des aciers à haute résistance, lorsqu'il s'agit d'ouvrages très importants comme les ponts.

L'ingénieur qui établit le projet d'un ouvrage en fixe les dimensions d'après ses connaissances et son expérience, de manière que l'ouvrage résiste aux efforts qui peuvent le solliciter, compte tenu des matériaux prévus.

Autrefois, où l'on parlait de l'architecte, seuls le bon sens et l'habitude pouvaient guider le choix des dimensions. Depuis plus d'un siècle, au contraire, le calcul permet de se rendre compte si les dimensions choisies sont suffisantes, satisfaisantes ou surabondantes. On aboutit naturellement au résultat voulu par simple correction ou par approximations successives. En plus, il faut souvent procéder à une comparaison entre des projets très différents, pour savoir lequel est le meilleur, surtout quant au coût. On s'aide naturellement de résultats connus, dont un petit nombre seulement proviennent de mises en équations rigoureuses, notamment pour le choix du système porteur et des sections. Il y a cependant lieu de faire montre d'une grande prudence, soit qu'il s'agisse des corps d'égale résistance¹, qui ne sont pas nécessairement les plus avantageux, soit qu'il s'agisse des systèmes dits gratuits, dans lesquels les fonctions d'un élément supprimé sont en réalité remplies par un autre, et pas toujours de manière plus économique, même s'il s'agit du sol de fondation².

Comme le firent déjà Robert Stephenson et ses collaborateurs pour les ponts de Britannia et de Conway il y a plus d'un siècle, on complète parfois le calcul par des essais sur modèle réduit et par des mesures sur les ouvrages terminés. Quelquefois cependant, en particulier dans les bâtiments, c'est l'architecte au sens moderne du mot qui fixe par avance les dimensions, en ne laissant à l'ingénieur que très peu ou même trop

1) Cf l'article suivant, paru dans le «Bulletin Technique Vevey» de 1961: Le problème de la conduite forcée d'égale résistance, compte tenu des sollicitations dites locales, et sa solution à la Lizerne, pages 1 à 5.

2) Cf l'article suivant, paru dans le «Bulletin Technique de la Suisse Romande» du 19 janvier 1957: Quelques aspects de la construction métallique en Suisse. Avantages trop méconnus de la construction métallique, p. 17.

peu de latitude, c'est-à-dire le choix des sections et à la rigueur du matériau.

Pour juger si les dimensions choisies sont suffisantes, satisfaisantes ou surabondantes, il faut évidemment savoir à quel effort interne un matériau donné est capable de résister dans l'ouvrage auquel il est incorporé. Aussi l'essai des matériaux s'est-il tout naturellement développé en même temps que les calculs de résistance, depuis Louis Navier, le fondateur de la statique appliquée. En matière de calculs comme d'essais, il s'agissait auparavant de science pure, sans application pratique³.

Nous ne voulons pas nous attarder trop longtemps au problème des contraintes effectives qui proviennent des efforts dits extérieurs, imposés dans la règle par des prescriptions. Constatons pourtant que ces efforts peuvent être notablement différents d'un pays à l'autre, sans raison valable. Nous pensons non seulement aux convois-types et aux charges roulantes des ponts-rails et des ponts-routes, mais surtout aux coefficients de majoration dynamique et à l'action du vent. Remarquons encore que les efforts extérieurs de caractère non permanent contiennent en eux une notion d'ampleur, de fréquence et de durée, les efforts les plus violents étant peu fréquents et de faible durée, surtout s'il s'agit de phénomènes naturels comme le vent et les tremblements de terre. Nos normes de charge, qui parlent beaucoup de vent, ne font d'ailleurs nul état des tremblements de terre⁴, bien qu'il faille s'attendre à des secousses telluriques importantes sur l'ensemble du territoire de notre pays et que l'on devrait raisonnablement en tenir compte au moyen d'efforts horizontaux atteignant plusieurs pourcent des charges verticales, notamment pour les bâtiments.

Il y a quelques années la notion de fréquence et de durée des efforts maxima conduisit certains ingénieurs à englober tous les efforts extérieurs dans une notion probabiliste de la sécurité⁵, bien que la notion de ruine probable d'un ouvrage n'ait rien de sympathique et qu'il serait préférable de parler d'un risque de ruine. On envisage aussi d'autres phénomènes de caractère exceptionnel, comme les surcharges trop fortes d'un bâtiment ou le passage de véhicules trop lourds sur un pont, et surtout les tassements anormaux, les glissements de terrain et les affouillements de piles en rivière par suite de pluies exceptionnelles, qui échappent parfois aux prévisions et surtout au calcul précis. A ce sujet il faut bien avouer que la spécialisation actuelle et les mandats partiels font trop souvent perdre à l'auteur d'un projet, en général trop axé sur le calcul, une vue d'ensemble des risques de l'ouvrage qu'il conçoit, pour s'en tenir trop exclusivement aux charges prescrites pour ce calcul. Pourtant il ne sert à rien qu'un pont soit bien calculé, s'il s'effondre par destruction des culées ou des piles et qu'un barrage saute à la suite d'un glissement du sol des rives. Et que dire des tremblements de terre ?

Si nous en venons maintenant aux taux de travail, généralement imposés par les prescriptions, nous constatons qu'ils doivent être fixés en fonction de la résistance des matériaux choisis ou à choisir, le terme de résistance étant à prendre dans son sens le plus général⁶. Il faut en

3) A titre d'exemple, citons les noms de Galilée (1564—1642), de Bernoulli (1654—1705) et d'Euler (1707—1783) pour la partie calculs, ainsi que de P. van Musschenbroek (1692—1761), de Buffon (1707—1788) et de Gauthey (1732—1807) pour la partie essais, bien que ce dernier se soit beaucoup tourné vers les applications pratiques. Nous renvoyons pour plus de détails à l'ouvrage de Hans Straub intitulé «Die Geschichte der Bauingenieurkunst», Verlag Birkhäuser, Basel, 1949, ainsi qu'à l'«History of Strength of Materials» du prof. Stephan P. Timoshenko, McGraw Hill, New York, London, Toronto 1952.

4) Ce passage était prévu bien avant la catastrophe de Skopje.

5) Les théories probabilistes de la sécurité ont été exposées par MM. Marcel Prot, Robert Lévi, M. Cassé, Fernando Vasco Costa, dans la Publication préliminaire et dans le Rapport final du Congrès de Liège 1948 de l'Association internationale des Ponts et Charpentes (AIPC). Depuis lors elles ont fait l'objet de nombreuses publications.

6) On pourrait aussi parler de solidité !

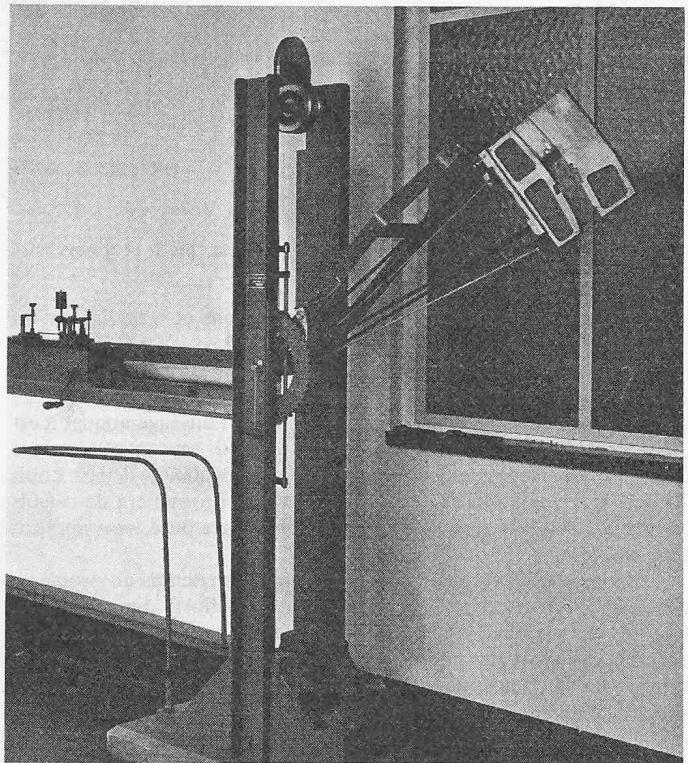


Fig. 1
Mouton pour essais de résilience
Fallhammer für Kerbschlagversuche

effet que l'ouvrage, supposé bien conçu, bien calculé et correctement exécuté, résiste, sans risque de destruction ou de détérioration grave, aux efforts auxquels il sera soumis.

Il s'agit maintenant de bien comprendre le terme de résistance⁶ dans son sens le plus général. Il y a une centaine d'années les ouvrages métalliques étaient formés d'une grande quantité de plats et de profilés de faible section, rarement de tôles de petit format. L'assemblage par rivets donnait une certaine souplesse et permettait une certaine adaptation aux efforts parasites et aux trop fortes sollicitations locales. Il en était de même des câbles de ponts suspendus, nombreux à l'époque. D'autre part la sécurité était très élevée, à cause de l'imprécision des calculs et des imperfections du matériau. L'essai de traction statique sur éprouvette à la rupture jouait donc à bon droit un rôle déterminant pour fixer le taux de fatigue admissible. On demandait néanmoins que le fer, comme on disait alors, soit ductile, d'où la mesure de l'allongement de rupture et de la striction, ainsi que l'essai de pliage. De l'essai de traction on tira plus tard le coefficient de qualité, qui est en Suisse le produit de la résistance à la traction par l'allongement de rupture, ce qui correspond en gros à l'intégrale du diagramme contrainte-allongement, c'est-à-dire au travail de rupture. Surtout à cause des besoins de l'industrie des machines, particulièrement des locomotives à vapeur, il fallut recourir, au milieu du siècle dernier déjà, aux essais d'endurance, personnifiés par Auguste Wöhler (1819-1914). En Suisse d'ailleurs, toutes nos prescriptions, sous l'énergie impulsif du professeur Ros, sont encore basées sur les essais à l'endurance.

Quant à la fragilité du fer, elle était connue depuis fort longtemps. En effet, dans son «Traité du fer» publié en 1734, Schwedenborg signale que «les marchands... faisaient subir aux barres d'acier un essai de fragilité en les jetant avec force sur un coin, ou bien en les posant sur le coin et en frappant dessus avec des masses. Ils appréciaient la qualité

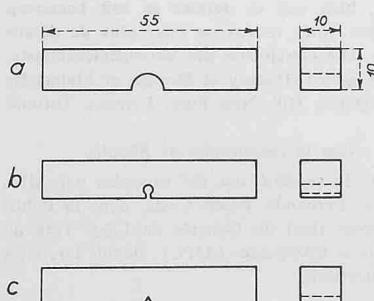


Fig. 2
Éprouvette de résilience
a) avec entaille douce
b) avec entaille moyenne
c) avec entaille vive

Kerbschlagproben
a) mit Flachkerbe
b) mit Rundkerbe
c) mit Scharfkerbe

suivant la cassure à nerf⁷ ou à grain⁸. Cependant, c'est vers 1890 que la question de la fragilité fut mise scientifiquement en lumière par Considère et André Le Châtelier, après avoir remarqué «qu'un même métal peut parfois, suivant les conditions où il est placé, se briser, avec ou sans déformation permanente, c'est-à-dire se comporter comme un métal fragile⁹». Malheureusement l'essai de résilience, bien connu des laboratoires d'essai officiels et fréquemment utilisé par eux, resta jusqu'à ces dernières années lettre morte pour la plupart des aciéries et des laminoirs, qui l'ignoraient ou feignaient de l'ignorer. Leur préférence allait en effet aux procédés d'élaboration et aux traitements thermiques, car le surchauffage du convertisseur, le four Siemens-Martin, le four électrique, le calage à l'aluminium ou au silicium et le recuit de normalisation à 800° C environ justifiaient plus facilement des extras élevés, sans imposer de garanties mécaniques spéciales. Pensons en particulier aux tôles dites «chaudières», qui donneront d'ailleurs satisfaction sans que l'essai de résilience fût imposé dans notre pays, et que l'on utilisa fréquemment pour les conduites forcées.

Il y a une trentaine d'années, la généralisation de la soudure à l'arc électrique entraîna certains revers, comme l'effondrement du pont d'Hasselt dans le canal Albert et la mise hors service du pont-rails du jardin zoologique de Berlin, sans compter la rupture de la conduite forcée du lac Noir dans les Vosges, dans laquelle la soudure n'a probablement joué qu'un rôle secondaire. Ces accidents attirèrent l'attention des ingénieurs, des métallurgistes et des spécialistes de l'essai des matériaux sur l'importance de la fragilité en matière de constructions soudées. Bien qu'on ne vit pas toujours en elle la véritable cause d'accidents restés inexplicables, on n'ignorait d'ailleurs pas auparavant l'existence de la fragilité en matière de constructions rivées. Une des premières recherches de Considère avait déjà été faite sur une cornière fragile.

Suivant les pays, les circonstances de l'accident et les experts, on mit l'accent sur telle ou telle cause de fragilité. En Belgique, où l'exécution des ponts soudés sur le canal Albert laissait d'ailleurs énormément à désirer, le professeur Campus se pencha tout spécialement sur le problème des contraintes résiduelles dues au soudage et à leur élimination. En Allemagne, la question de l'épaisseur des produits à souder joua un rôle déterminant grâce au professeur Kommerell. En Suisse enfin, le professeur Ros mit en garde contre la formation de martenite dure et cassante dans la zone de transition des soudures, d'où l'intérêt du préchauffage et du recuit à 650° C environ pour les aciers fortement carburés, étant bien entendu que le recuit de détente et de revenu ne fait pas disparaître les fissures existantes. Quant au terme de soudabilité, il fit et fait encore couler beaucoup d'encre, les uns pensant à un acier soudable dans n'importe quelles conditions, les autres pensant au contraire à un procédé ou à une électrode permettant de souder n'importe quel acier, même dans les conditions les plus difficiles. Ajoutons à tout cela le nombre et la diversité des essais imaginés pour mettre en lumière la résistance à la fragilité d'un acier, du métal d'apport de l'électrode, d'un cordon de soudure ou d'un assemblage soudé, ainsi que les nombreuses études en cours et les multiples publications paraissant constamment sur la question, et nous aurons une idée de l'importance donnée aujourd'hui à la fragilité.

Il est vrai qu'en contre-partie l'ingénieur non spécialisé pénétrant pour la première fois dans ce domaine risque d'être d'emblée perdu et découragé par tout ce qu'il pourra lire, entendre et voir, ainsi que par les contradictions et les divergences d'opinion qu'il rencontrera sur des points pouvant lui paraître importants. En réalité, on peut dire qu'aujourd'hui l'essai classique de résilience sur barreau entaillé, de 10 mm par 10 mm de section, est admis partout comme le critère essentiel de la résistance à la fragilité d'un échantillon de métal ou de soudure. Au fond cet essai n'est qu'un perfectionnement de celui des marchands de fer dont parlait Schwedenborg.

S'il n'y a plus guère de controverse en ce qui concerne la forme et les dimensions de l'éprouvette, la machine d'essai et la vitesse du mouton lors du choc (fig. 1), il n'en est pas de même de la forme de l'entaille (fig. 2), de la température d'essai et du degré d'écrouissage, qui sont un thème de discussion inépuisable. En effet, on le sait depuis fort long-

7) Le qualificatif nerveux est encore utilisé pour le fer soudé ou puddlé. On le retrouve tout au moins à l'article 11 des «normes concernant le calcul, l'exécution et l'entretien des constructions métalliques», de la Société suisse des ingénieurs et architectes, édition 1956.

8) D'après P. Dejean et S. Gerszonowicz: Etat actuel de l'essai de fragilité. Paris 1934, Dunod, p. 4.

9) Comme note 8), p. 1.

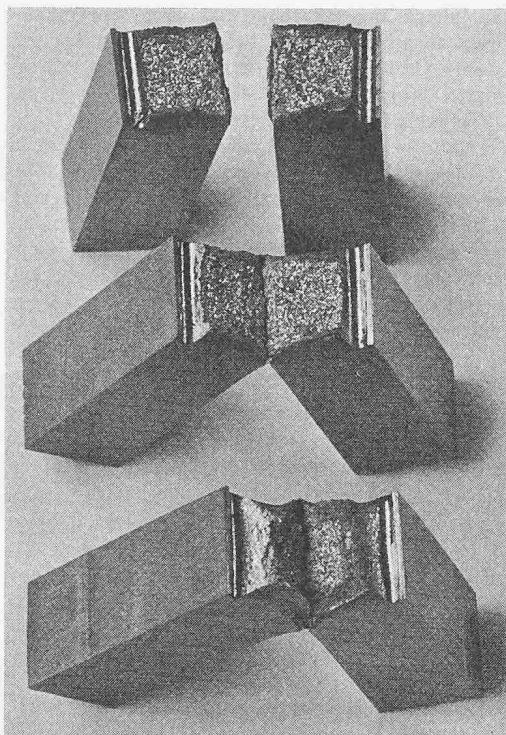


Fig. 5 (à gauche)
Eprouvettes caractéristiques de résilience après cassure
Au-dessus, cassure sèche et brillante, sans striction visible
Au milieu, cassure intermédiaire avec légère striction
Au-dessous, cassure mate très bonne, avec forte striction
Charakteristische Kerbschlagproben nach dem Bruch
Oben: spröder Bruch mit kristalliner Struktur ohne wesentliche Verformung
Mitte: halbspröder Bruch mit geringer Verformung
Unten: zäher Bruch mit großer Verformung

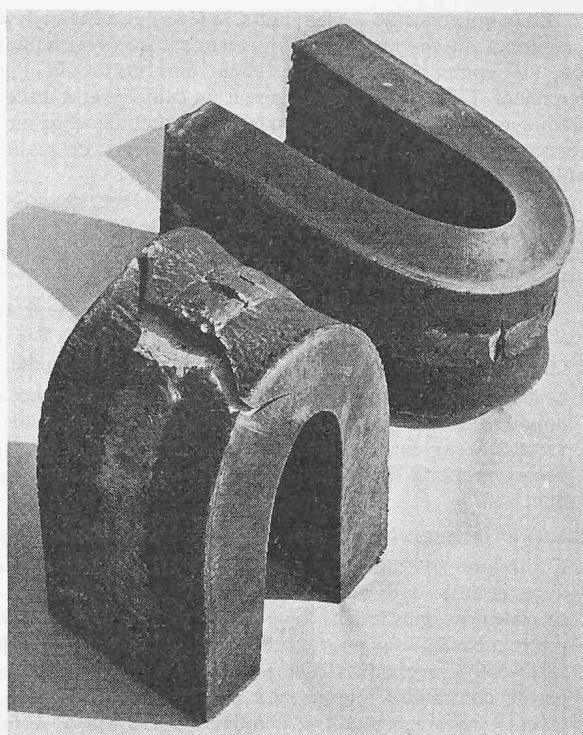
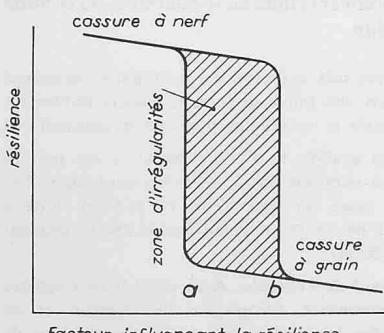


Fig. 6 (à droite)
Essais de pliage Kommerell donnant de bons résultats.
Epaisseur de l'acier 40 mm
Aufschweißbiegeproben (Kommerell-Proben) aus gutem, zähem Material. Blechdicke 40 mm

temps¹⁰ (fig. 3), il suffit de réduire le diamètre du fond de l'entaille, d'abaisser la température ou d'augmenter le degré d'écrouissage pour observer le phénomène suivant: Tout d'abord, la résilience, c'est-à-dire le travail de rupture mesuré par la différence de remontée du pendule, décroît lentement et progressivement, tout en restant de plusieurs kgm par cm² de section du barreau au droit de l'entaille avant essai (fig. 4), et en donnant une cassure à nerf, avec une striction bien visible (fig. 5). Brusquement, parfois sans transition, la résilience tombe ensuite jusqu'à moins d'un kgm par cm², avec une cassure à grain, sans striction visible (fig. 5). Entre les deux, on se trouve dans une zone critique ou de transition, le «Steilabfall» allemand (fig. 3, 4 et 5).

Si tous les aciers possèdent une zone critique, ils n'ont pas tous, et de loin, la même température critique, la même entaille critique, le même degré d'écrouissage critique. Précisons que l'écrouissage ne joue un rôle que si l'on chauffe l'échantillon à 250° C pendant une demi-heure, pour accélérer le processus de vieillissement naturel, qui sans cela exigerait des mois.

10) Voir l'ouvrage très complet de la note 8). Cependant il faut bien reconnaître ici les mérites de M. Henri-M. Schnadt, dont la persévérance depuis une vingtaine d'années a certainement joué un rôle incontestable dans l'introduction pratique du critère de résilience en construction métallique. Un reproche est souvent fait à son vocabulaire, qui n'est d'ailleurs pas indispensable, puisque l'on peut tout aussi bien se servir de termes ou d'expressions plus immédiatement accessibles aux oreilles du non-initié, quoique un peu plus longs.



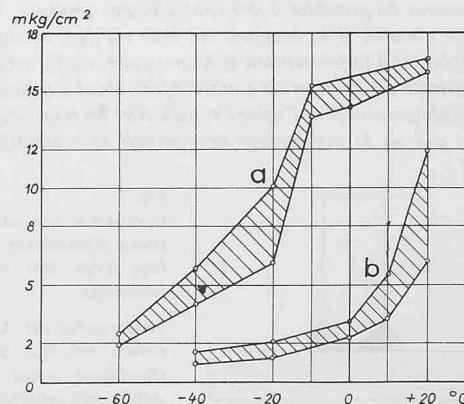
Facteur influençant la résilience

Fig. 3
Courbe caractéristique de résilience d'après P. Dejean et S. Gerszonowicz (1934)

Kerbschlagkurve nach P. Dejean und S. Gerszonowicz (1934)

Fig. 4 (à droite)
Image caractéristique des valeurs de résilience en fonction de la température d'essai
a) à l'état de livraison
b) à l'état vieilli

Steilabfallkurven (Kerbschlagwerte in Abhängigkeit von der Versuchstemperatur)
a) im Lieferzustand
b) nach künstlicher Alterung



En ce qui concerne les lamoins, la sévérité de l'essai de résilience les amènera automatiquement, contre leur gré il est vrai, à une élaboration, une composition chimique et un taux maximum d'impuretés déterminés. Elle les obligera ou non à un calnage et à un traitement thermique. Elle entraînera telle ou telle mise au mille et tel ou tel rebut prévisionnel. Tout cela permettra de fixer un surpris de qualité raisonnable.

Passons maintenant en revue, très rapidement, les critères déterminants pour le choix des aciers et la sévérité de l'essai de résilience, en commençant par les facteurs dépendant de la nature et de l'importance de l'ouvrage considéré ou de ses éléments.

1. Importance des charges et des surcharges. Fréquence probable des charges et des surcharges calculées dans le cours de l'existence de l'ouvrage. Contraintes effectives. Double et triple étreinte.
2. Conséquence d'une rupture en service. Importance des soudures pour la résistance de l'élément considéré et de l'ensemble de l'ouvrage, en cas de défaillance. Les cordons d'angle ou en K sont beaucoup moins dangereux, dans la règle, que les soudures bout à bout.

Quant aux facteurs dépendant de la mise en œuvre, ils sont les suivants :

3. Contraintes internes dues notamment à l'accumulation des soudures et au bridage des pièces lors de l'assemblage et du soudage, spécialement dans le sens longitudinal plus fortement sollicité. Les pièces mises au four pour y subir un recuit de détente et de revenu à 620–650°C, avec refroidissement correct, sont pratiquement exemptes de contraintes internes. Le martelage des soudures, s'il est exécuté très soigneusement, combat efficacement le retrait et fait disparaître les contraintes internes des pièces bridées.
4. Epaisseur des pièces à souder et danger de formations martensitiques, surtout si les mesures destinées à éviter un refroidissement trop rapide n'entrent pas en considération (préchauffage, soudage avec électrodes de fort diamètre et de manière ininterrompue).
5. Sensibilité des électrodes par rapport au métal de base, notamment en ce qui concerne les impuretés et les ségrégations. L'emploi d'électrodes basiques est en général compatible avec des exigences moindres pour l'acier à utiliser.
6. Basse température de service.
7. Basse température de soudage, compte tenu des mesures prises pour combattre le refroidissement trop rapide.
8. Difficultés de soudage pouvant provoquer de petits défauts et des risques d'amorce de fissures. Difficultés de préparation des châfres, en particulier en ce qui concerne le goujage profond avec des électrodes au charbon qui pourraient former sur les lèvres une couche de martensite dure et cassante, ne disparaissant pas complètement au soudage. On tiendra compte dans ce facteur de l'importance des contrôles non destructifs effectués ou prescrits pour les soudures, c'est-à-dire la radio et la gammagraphie en ce qui concerne les défauts proprement dits et les ultra-sons en ce qui concerne les microfissures.
9. Pliage à froid, et, dans une mesure moindre, dressage à froid.

Si l'un des facteurs de mise en œuvre risque à lui seul et avec une probabilité élevée de provoquer une rupture aux conséquences graves, un acier avec une bonne résistance à la fragilité pourra seul entrer en considération. Si chacun des facteurs de mise en œuvre joue un rôle mineur et que leur accumulation n'entraîne pas d'accident aux conséquences graves, on pourra se contenter d'un acier aux caractéristiques moins élevées du point de vue résistance à la fragilité. Si cette résistance n'était pas garantie par le lamoir, il incomberait au maître d'œuvre et au constructeur de procéder à des contrôles par sondage. Ces contrôles doivent être étendus si le lamoir ne leur est pas connu, si des incidents se déclarent à la fabrication et au montage, ou si l'on peut raisonnablement s'attendre à un acier de qualité inférieure. La même manière de procéder est obligatoire pour l'acier en stock chez les marchands ou le constructeur, au cas où la provenance ne pourrait être identifiée à coup sûr. Une

analyse chimique, un billage, une empreinte Baumann, une micrographie, peuvent suffire dans bien des cas, l'essai de résilience étant déterminant s'il y a doute. On remarquera à ce propos que les aciers à faible teneur en carbone, donnant de forts allongements de rupture, peuvent être très fragiles et ne pas supporter la soudure.

Pour les aciers à haute résistance, particulièrement sensibles¹³, le critère de résistance à la fragilité passera avant toute autre considération. L'équivalent carbone peut être utilisé comme guide en ce qui concerne la soudabilité, mais ne saurait constituer à lui seul un test complet.

L'importance des facteurs dont nous venons de parler en matière de résistance à la fragilité conduit à distinguer quatre catégories d'acier, indépendamment du problème de la résistance à la traction statique sur éprouvette de rupture.

1. Qualité inférieure, sans garantie de résistance à la fragilité.
2. Qualité moyenne avec éprouvette de résilience relativement peu sévère, par exemple une entaille de grand diamètre et l'essai à l'ambiante. Le fait de prescrire un vieillissement artificiel ne joue dans la règle pas encore de rôle et ne renforce pas la sévérité de l'essai¹⁴.
3. Qualité supérieure avec éprouvette de résilience usuelle à basse température¹⁵.
4. Qualité spéciale avec divers types de résilience, notamment à entaille vive, avec vieillissement artificiel, en travers, à basse température, certaines exigences pouvant être cumulées.

Ces quatre catégories d'acières donnent lieu aux remarques suivantes:

Tout d'abord on voudra bien observer qu'aujourd'hui les aciers de qualité inférieure peuvent être le produit d'un déclassement et satisfaire tout juste aux exigences de leur classe, alors qu'autrefois, surtout en matière de fragilité, ils étaient fréquemment sans reproche.

En second lieu on observera que, pour les produits épais, il est utile, voire nécessaire, de compléter l'essai de résilience sur barreau par un essai de fragilité global sur toute l'épaisseur du produit: *c'est l'essai de pliage Kommerell avec cordon de soudure longitudinal (fig. 6).*

En troisième lieu on prendra garde au risque d'arrachage des fibres extérieures par des cordons effectués sur la surface à la suite d'un certain feuillettage, surtout s'il s'agit de produits plats (fig. 7). Pour les soudures très importantes et fortement sollicitées, un contrôle complémentaire de la résistance transversale de la pièce est nécessaire. L'emploi d'acier moulé ou forgé peut également entrer en considération. Les caractéristiques mécaniques usuelles ne donnent pas une image correcte du risque d'arrachage en question.

Ceci dit, constatons que les normes allemandes DIN 17 100¹⁶, qui ont été mises en vigueur en novembre 1959 et ont déjà besoin d'une révision, sont actuellement, et de loin, les meilleures qui existent du point de vue de l'utilisateur, ou, si l'on veut parler plus clairement, les plus acceptables. Elles ont été en effet établies d'après le schéma précédent basé sur la fragilité. Pour éviter de pousser la clientèle à une sévérité inconsidérée, coûteuse et inutile, la qualité spéciale est hors normes.

La mise au point des normes allemandes DIN 17 100 exigea de laborieuses négociations entre producteurs et utilisateurs: en fait on doit bien avouer qu'il s'agit d'un compromis entre le point de vue des premiers et les vœux des seconds. C'est d'ailleurs pourquoi les DIN 17 100 contiennent encore des indications sur le procédé d'élaboration, le calnage, le traitement thermique, la composition chimique, les taux d'impureté, la teneur en azote¹⁷. Ces indications sont inutiles pour l'utilisateur, si ce n'est comme premier critère de soudabilité, ou comme justification des surpris de qualité.

¹³⁾ Ce sont les aciers ordinaires très carburés qui sont particulièrement sensibles, mais, pas du tout ou dans une faible mesure, les aciers faiblement alliés, soigneusement élaborés, calmés et traités thermiquement (normalisés).

¹⁴⁾ C'est le cas notamment des qualités St 37-2 et St 42-2 des normes allemandes DIN 17 100 dont il sera question plus loin. Selon paragraphe 2.43 de ces normes, il est prévu un essai sur éprouvette DVM-F en long à 20°C, après allongement rémanent de 10 % et chauffage à 250°C pendant une demi-heure (vieillissement artificiel).

¹⁵⁾ Rayon de 1 mm pour le fond de l'entaille. A ce sujet il faut espérer que les Euronormes de la Communauté européenne du charbon et de l'acier, Haute autorité, Division des problèmes industriels, Commission de coordination de la nomenclature des produits sidérurgiques, remplaceront bientôt les normes nationales en vigueur aujourd'hui dans les différents pays.

¹⁶⁾ Deutsche Industrie-Normen.

¹⁷⁾ Il en est de même des normes des autres pays. En Suisse, qui n'est pas considérée comme un pays producteur, les normes de la S.I.A. prescrivent des teneurs maxima en soufre, phosphore et soufre plus phosphore.

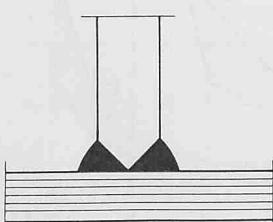


Fig. 7

Epruvette spéciale pour déterminer le risque d'arrachage dû à la soudure sur la face d'une tôle ou d'un plat sujet au feuillettage

Sonderprobe zur Abklärung des Ausreissrisikos bei der Schweißung gegen die Oberfläche eines Bleches oder Flachstahles mit schieferiger Struktur

Les normes allemandes DIN 17 100 prévoient naturellement des nuances basées sur la résistance de rupture à la traction statique, soit les *acières de résistance normale de 37 à 45 kg/mm²*, les *acières mi-durs de 42 à 50 kg/mm²* et les *acières durs de 50 à 60 kg/mm²* ou *52 à 62 kg/mm²*, sans compter les aciers extra-doux utilisés surtout en chaudronnerie et les aciers très durs qui n'entrent guère en considération pour la construction métallique, au moins dans les qualités prévues dans les DIN 17 100. Les valeurs imposées de la résilience, qui ne figurent malheureusement pas dans les tableaux généraux très clairs des DIN 17 100, mais dans un paragraphe spécial sur la fragilité (*Sprödbruchunempfindlichkeit*), varient entre 8 et 5 mkg/cm², comme minimum garanti, ce minimum étant la moyenne de trois éprouvettes, avec écart de l'ordre de 30% pour l'une d'elles. Le paragraphe spécial sur la fragilité fait également mention de l'essai de pliage Kommerell (*Aufschweissbiegeprobe*) pour les fortes épaisseurs. On remarquera tout spécialement que la qualité inférieure n'existe pas pour les aciers durs et que la qualité moyenne ne donne pas de garantie de résilience, d'où les désignations St 37, St 37-2 et St 37-3 pour les aciers de 37 à 45 kg/mm², St 42, St 42-2 et St 42-3 pour les aciers de 42 à 50 kg/mm², St 50-2 (sans garantie de résilience) et St 52-3 pour les aciers durs. Ajoutons que ces désignations simples et pratiques peuvent être complétées, selon les DIN 17 100, par des lettres indiquant le procédé d'élaboration, le calnage, le traitement thermique, ce qui, pour l'utilisateur, est une source de confusion et d'erreurs dont on aurait pu se passer facilement.

D'après les normes allemandes DIN 17 100, *les essais se font dans la règle par coulée*, éventuellement par lot. Cependant il faut absolument le préciser à la commande, en indiquant également comment et par qui se fera la recette aux laminoirs, faute de quoi on risque de ne recevoir qu'un certificat laconique avec l'avis d'expédition des tôles ou des profilés. A ce moment, il sera pratiquement impossible de refuser la marchandise et d'adresser une réclamation utile.

Pour fixer les idées en ce qui concerne l'utilisation des normes allemandes DIN 17 100, disons que *la qualité 1, sans garantie de résilience, peut suffire pour les charpentes simples et pas trop importantes, dans lesquelles la soudure ne joue pas un très grand rôle*. Dans ce cas il existe naturellement un certain risque d'obtenir une qualité insuffisante. Cependant, même en l'absence de contrôles spéciaux à l'arrivée chez le constructeur, la chose est en général décelable *lors d'incidents de fabrication, qu'il faut toujours prendre très au sérieux*¹⁸. *La qualité 2 suffit dans la règle pour les charpentes de bâtiments même très importants, sauf pour certains ouvrages très spéciaux ou certains éléments de jonction fortement sollicités, avec accumulation de soudure, bridage à la mise en œuvre et contraintes bi- ou tri-axiales en service. Quant à la qualité 3, il est parfaitement possible de l'envisager pour les ponts métalliques d'une certaine importance, surtout s'il s'agit de ponts-routes. Cependant, en matière de ponts-rails, d'ouvrages très importants ou d'acières à haute résistance, la qualité spéciale ne peut plus être évitée.* Il s'agit alors d'acières de marque, tous à grain fin, soigneusement élaborés, entièrement calmés et traités thermiquement¹⁹. Même si les résiliences garanties diffèrent quelque peu et si la série complète des essais de réception ne se fait pas sur chaque tôle-mère, ces aciers de marque peuvent être en général considérés comme équivalents. Il n'est d'ailleurs pas exclu que l'on en arrive un jour à une normalisation de ces aciers, dont les prix particulièrement avantageux par suite de la concurrence actuelle sont parfois assez surprenants, si on les compare aux qualités plus courantes, toutes tarifées. Les administrations de chemin de fer, par exemple, désirent introduire et se contenter, en plus de l'essai habituel de traction statique sur éprouvette de rupture, d'un essai de résilience sur échantillon à l'état de livraison, avec une seule et unique entaille très aiguë (Charpy V – notch), la température variant seule suivant le degré de sévérité (ponts-rails ou ponts-routes). Le critère de résilience deviendrait ainsi très simple et presque exclusif comme le souhaitait Le Châtelier, qui écrivait déjà en 1904: «Les essais de traction, de pliage, les conditions de fabrication et de composition chimique n'ont plus qu'un intérêt secondaire, et il ne serait pas impossible, il faut l'espérer, que, dans un avenir plus ou moins éloigné, on les vit disparaître des Cahiers des charges²⁰.

18) C'est là qu'interviennent la conscience professionnelle et la formation des cadres et de la mainœuvre d'un atelier qualifié, ainsi que la sagacité de son service de contrôle et la rapidité de son laboratoire d'essai des matériaux.

19) En disant cela, nous ne désirons pas prescrire une certaine élaboration, le grain fin, le calnage et la normalisation. Nous voulons simplement montrer les mesures que le producteur doit prendre pour obtenir la qualité imposée par la sévérité de l'essai de résilience.

20) Op. cit. à la note 8), p. 2.

En ce qui concerne les normes allemandes DIN 17 100, disons encore qu'il existe en Allemagne des «Recommandations»²¹ pour le choix des aciers, au moyen d'un système de points pouvant être comparé aux notes que l'on donne dans les écoles. On ne peut guère se rallier à un tel système, qui devient trop formel et enlève à l'ingénieur auteur d'un projet le sens de sa responsabilité. Ce système est d'ailleurs à l'opposé des habitudes de nos normes suisses, beaucoup plus libérales.

A propos des normes de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, on remarquera que l'édition de 1935 donnait bien la forme du barreau et les dimensions de l'entaille, mais précisait à l'article 45 que «l'essai de résilience doit renseigner sur la fragilité du métal» «dans certains cas particuliers». Dans l'édition de 1956 au contraire, le coefficient de choc (résilience) est traité sur le même pied que les autres caractéristiques mécaniques. Cependant, pas plus qu'en 1935 (art. 45 et 74), on ne précise si, quand et comment on doit vérifier la valeur prescrite de 8 et 5 mkg/cm² pour le métal de base des constructions soudées (art. 9), ni quelle est l'éprouvette à utiliser, ni quelle est l'étendue des essais (art. 6)²². Il s'ensuit que l'essai de résilience n'est pas encore entré dans les mœurs en Suisse et qu'on s'en souvient surtout après un accident. C'est d'ailleurs là le point essentiel de la révision des «normes concernant le calcul, l'exécution et l'entretien des constructions métalliques», actuellement en cours.

Que devient aujourd'hui la notion usuelle de résistance statique à la traction sur éprouvette de rupture? *Pour les aciers de qualité, on peut dire que l'élaboration plus soignée et les traitements nécessités par la sévérité de l'essai de résilience font perdre aux aciers ordinaires au carbone, de 37 à 45 kg/mm² de résistance, une bonne partie de leur intérêt, au fur et à mesure que croît la sévérité de l'essai.* En effet, malgré la relativité du critère de résistance statique à la rupture sur éprouvette de traction, on ne voit pas pourquoi on dédaignerait les aciers faiblement alliés, qui ne sont pas sensiblement plus chers que les aciers ordinaires au carbone, dès que l'aciérie est obligée de prévoir une élaboration plus soignée, le calnage et le recuit de normalisation. Le seul argument en faveur des aciers doux pourrait être l'allongement de rupture plus grand sur éprouvette de traction, dont la valeur est d'ailleurs contestable. *Ainsi, dès que l'on met la question de la fragilité au premier plan et que l'on renforce la sévérité de l'essai de résilience, on passe tout naturellement, pour une question de prix, des aciers doux sans garantie de résilience ou avec des garanties relativement modestes, vers les aciers plus durs de très bonne qualité.* C'est d'ailleurs le constructeur qui sera dans la plupart des cas le mieux à même de juger quelle est la solution la plus avantageuse, au gré des fluctuations du marché et de chaque cas particulier.

Cette évolution vers la qualité est parfaitement normale pour la construction métallique, qui utilise un matériau noble, très évolué et fortement sollicité. Les salaires de plus en plus élevés dans le monde entier et la préfabrication, qui en était à la base bien avant l'invention du terme, poussent d'ailleurs dans le même sens.

Nous ne voudrions pas terminer cet exposé sans rappeler que l'acier reste toujours de l'acier, qu'il soit incorporé dans un ouvrage métallique, dans un ouvrage en béton armé ou un ouvrage en béton précontraint. Surtout avec les aciers à haute résistance, à l'état naturel ou étirés, les problèmes sont identiques à ceux dont nous venons de parler, ou la fragilité est de toute importance. Avec l'allègement du poids mort et les aciers à très haute résistance, particulièrement sensibles, la plus grande prudence est de rigueur, si l'on veut éviter les accidents.

Constatons encore à ce propos que le béton armé n'a pas amené de révolution dans le domaine de l'essai des matériaux, où la résistance de traction statique sur éprouvette de rupture resta jusqu'à nos jours le baromètre de la solidité de l'acier et du taux de fatigue admissible. Pas plus qu'en construction métallique, le passage tellement prôné de la limite de rupture à la limite élastique ne change la manière de traiter

21) «Vorläufige Empfehlungen zur Wahl der Stahlgütegruppen für geschweißte Stahlbauten», herausgegeben vom Deutschen Ausschuss für Stahlbau, Köln 1960. Ces «Recommandations» ont d'ailleurs été complétées par un catalogue d'exemples pratiques: «Katalog zur Wahl der Stahlgütegruppen für geschweißte Stahlbauten», Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1962.

22) La Suisse n'étant pas un pays sidérurgique, il est logique qu'elle s'en tienne sans innover aux normes des pays producteurs, en ce qui concerne la qualité et la nuance des aciers. Il ne sert en tout cas à rien de posséder des prescriptions que les producteurs ignorent ou feignent d'ignorer. De ce point de vue, on est bien obligé d'avouer que les normes actuelles de la S. I. A. concernant le calcul, l'exécution et l'entretien des constructions métalliques sont plutôt faites pour le contrôle d'un laboratoire officiel après un accident que pour la commande d'un constructeur aux laminoirs.

le problème. Ce passage favorise simplement les aciers à haute résistance, dont la limite élastique est plus proche de la rupture. En fait de fragilité, les crochets d'extrémité des barres d'armatures, autrefois usuels, éliminaient les plus cassantes d'entre elles. Cette mesure était suffisante dans la règle, du fait de la sécurité calculée élevée, du poids mort très important, de l'absence de soudures et de l'utilisation de barres en acier doux, nombreuses et bien réparties dans la masse.

Il resterait un mot à dire de l'incidence de la corrosion sur le choix des aciers. Ce problème ne concerne d'ailleurs pas que la construction métallique, à laquelle les personnes trop peu au courant reprochent des frais d'entretien (prévisionnels) élevés, tout en pensant qu'ils sont insignifiants ou n'en atteignent qu'une fraction pour d'autres matériaux.

Die Wahl der Stahlqualitäten und Stahlgüten

Von P. Preisig, dipl. Ing. ETH, Direktor der Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey SA.

(Deutsche Kurzfassung des vorstehenden Aufsatzes «Choix des qualités et des nuances des aciers» von Ch. Dubas)

DK 624.014.2.002.3

Während Jahrzehnten waren für die Materialauswahl und die Materialprüfung die klassischen Zug- und Biegeversuche massgebend. Diese haben sich in den letzten 40 bis 50 Jahren kaum geändert, während die Stahlbauwerke im gleichen Zeitraum ganz grundlegende Änderungen erfahren haben, und es gilt zu überprüfen, ob die klassischen Versuche allein heute unseren Ansprüchen noch genügen können.

Die früheren genieteten Konstruktionen zeichneten sich durch eine gewisse Nachgiebigkeit ihrer Verbindungen aus und waren dadurch in der Lage, sekundäre Spannungen und lokale Überbeanspruchungen in einem gewissen Masse aufzufangen und auszugleichen. Man verlangte damals vom Material vor allem eine gute Verformbarkeit, d. h. eine grosse Dehnung.

Bei den modernen steifen Schweisskonstruktionen stellen sich die Probleme ganz anders. Hier sind nicht nur die Bruchfestigkeit und die Dehnung des Materials wesentlich, sondern wir haben es mit viel komplexeren Problemen zu tun, vor allem mit jenem der Sprödigkeit.

Den Materialprüfern war das Phänomen der Sprödigkeit zwar schon anfangs unseres Jahrhunderts bekannt, und es bestehen aus der damaligen Zeit interessante Abhandlungen hierüber. Die Konstrukteure hingegen machten sich darüber keine grossen Sorgen und auch die Stahlwerke setzten sich kaum mit der Frage des Sprödbruches auseinander, welche für die damaligen Nietkonstruktionen von untergeordneter Bedeutung war. Für besondere Ansprüche schlugen die Werke allenfalls eine andere Erschmelzungsart (z. B. Siemens-Martin-Stahl) vor oder ein Normalisieren; aber auf den Kern der Sprödbruchfrage traten sie nicht ein, bis es dann in den dreissiger Jahren plötzlich ein jähes Erwachen aus diesem Dämmerschlaf gab, nachdem Brüche an mehreren grossen geschweißten Bauwerken aufgetreten waren (in Deutschland und Belgien). Diese Unfälle verursachten eine lebhafte Diskussion über die Ursachen solcher Brüche und über die Vorkehren, um in Zukunft weitere Schäden zu vermeiden, woraus sich schliesslich eine recht fruchtbare Entwicklung für die Schweisstechnik und die Metallurgie im allgemeinen ergab.

Der Begriff der «Schweissbarkeit» gab seit jeher Anlass zu Auseinandersetzungen. Die einen wünschten sich einen Stahl, der unter allen möglichen Umständen absolut sicher verschweisst werden könnte, andere wiederum sahen das Heil in einer Elektrode, die alle auf dem Markt vorhandenen Stahlsorten einwandfrei zu schweissen gestattete. Bis heute ist noch keine generelle Definition für die Schweissbarkeit gefunden worden und aller Voraussicht nach wird auch kaum je eine aufgestellt werden können. Es gilt vielmehr, für jeden speziellen Fall die richtige Lösung zu finden.

Als Kriterium zur Bestimmung der Sprödbruchsicherheit hat sich heute ziemlich allgemein die Kerbschlagzähigkeit durchgesetzt (Bilder 1, 2, 5). Über die Formen der Prüfstücke sind sich Theoretiker und Praktiker ziemlich einig, doch scheiden sich die Ansichten bei den Fragen der Kerbform, der Prüftemperatur und der möglichen Alterung.

Eine gute Ergänzung zur Kerbschlagprüfung bilden die Aufschweissbiegeproben, bei welchen das Verhalten des Materials beim Biegen eines Prüfstückes mit aufgebrachter Schweissraupe untersucht wird. Spröde Stähle brechen schon bei kleinen Biegewinkeln schlagartig durch, während ein zähes Material sich bis zu Winkeln von 90° und darüber verformen lässt, ohne dass die einzelnen auftretenden Einrisse zum Bruch des ganzen Querschnittes führen (Bild 6).

Le problème de la corrosion est en effet de plus en plus à l'ordre du jour en matière de béton armé et il peut être capital pour le béton précontraint.

Constatons simplement qu'il n'existe pas d'acières spéciaux à des prix abordables, qui n'auraient pas besoin de protection. Quant à certains aciers faiblement alliés, il est exact que nous, ils résistent beaucoup mieux aux fumées industrielles que les aciers ordinaires. Cependant, comme la peinture de protection contre la corrosion atmosphérique est nécessaire, même dans notre pays, on ne voit pas l'avantage de ces aciers spéciaux, surtout en Suisse. Le sablage ou le greناillage et une bonne peinture sont de toute manière très efficaces et moins onéreux qu'on ne le croit trop souvent.

Zur Kerbschlagzähigkeit ist zu sagen, dass als Kriterium nicht der mehr oder weniger hohe Wert der Kerbschlagarbeit als massgebend betrachtet wird, sondern der Temperaturbereich, in welchem der sogenannte Steilabfall auftritt. Wenn man nämlich Prüfstücke des gleichen Materials bei verschiedenen Temperaturen prüft, kann man feststellen, dass bei höheren Temperaturen die Mittelwerte der Kerbschlagzähigkeiten nur wenig variieren, während sie bei sinkender Temperatur ziemlich plötzlich abfallen, wobei gleichzeitig grosse Streuungen um die Mittelwerte auftreten. Bei noch tieferen Temperaturen ergeben sich dann nur noch Mittelwerte in der Grössenordnung von 1 kNm/cm^2 , was bedeutet, dass das Material spröde geworden ist (Bild 5).

Die Sprödbruchsicherheit eines Stahles wird somit nach dem Temperaturbereich beurteilt, in welchem der Steilabfall eintritt, wobei aber die Kerbform festgelegt werden muss. Ganz allgemein führen nämlich schärfere Kerben zu einer Verschiebung des Steilabfalls in einem wesentlich höhern Temperaturbereich; um die Zähigkeit eines Stahles zu definieren, müssen darum Prüftemperatur und Kerbform vereinbart werden.

Die Klassierung der Stahlgüten erfolgt heute mehr und mehr nach dem Kriterium der Lage des Steilabfalls, mit den normalen Gütegruppen 1 bis 3 und einer Sondergruppe, die oft noch in zwei Untergruppen 4 und 5 aufgeteilt wird.

In den gegenwärtig gültigen S.I.A.-Normen ist leider der Begriff der Materialgüte nur unzureichend definiert, sind doch weder Kerbform noch Prüftemperatur vorgeschrieben. Bis zum Erscheinen einer revidierten S.I.A.-Norm wird daher heute auch in der Schweiz weitgehend die Deutsche Norm DIN 17 100 verwendet, deren Gütegruppen nach dem oben erwähnten Prinzip wie folgt festgelegt sind:

Gütegruppe 1: Ohne besondere Anforderungen an die Kerbschlagzähigkeit.

Gütegruppe 2: Mittlere Anforderungen an die Kerbschlagzähigkeit (Probe mit Flachkerbe, gealtert. Prüftemperatur 20°C , $x = 8 \text{ kNm/cm}^2$.)

Gütegruppe 3: Höhere Anforderungen an die Kerbschlagzähigkeit (Probe mit Rundkerbe, Prüftemperatur 0°C , $x = 7 \text{ kNm/cm}^2$).

Nach dieser Norm können für die Gütegruppen 2 und 3 auch Aufschweissbiegeproben verlangt werden.

Die DIN 17 100 definiert verschiedene Stahlsorten, welche sich nach Zugfestigkeit und Güte unterscheiden (Tabelle 1). Für die Verwendung im Stahlbau, und ganz besonders für Brücken, kommen aber lange nicht alle Sorten in Frage. St 33 muss ausgeschlossen werden, da vom Lieferwerk keinerlei Gewährleistung verlangt werden kann. Die Sorten St 60, St 60-2 und St 70-2 sind wegen ihrer hohen Kohlenstoffgehalte (0,4 bis 0,5%) praktisch nicht schweißbar und scheiden daher ebenfalls aus. Die Stähle der Zugfestigkeit 34 bieten kein Interesse, da sie teurer sind als die Stähle der Sorten 37. Von der Verwendung der Sorten St 42, St 42-2, St 42-3, St 50 und St 50-2 mit ihrem relativ hohen Kohlenstoffgehalt von 0,25–0,30% muss wegen ihrer nur bedingten Schweißbarkeit abgeraten werden. Für die praktische Verwendung bleiben somit die Sorten St 37-2, St 37-3 und St 52-3.

Die Zahl der für Schweisskonstruktionen verwendbaren Stahlsorten nach DIN 17 100 ist also bescheiden, doch wird glücklicherweise das Sortiment durch vorläufig nicht normierte Sonderstähle