La sécurité par la ductilité

Autor(en): **Opatz, Hans-Joachim**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Tracés : bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **128 (2002)**

Heft 06

PDF erstellt am: **01.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-80267

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

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

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Hans-Joachim Opatz,
ingénieur diplômé (TU)
Stahl Gerlafingen AG
CH - 4563 Gerlafingen

Fig. 1 : Schéma typique de tension-allongement

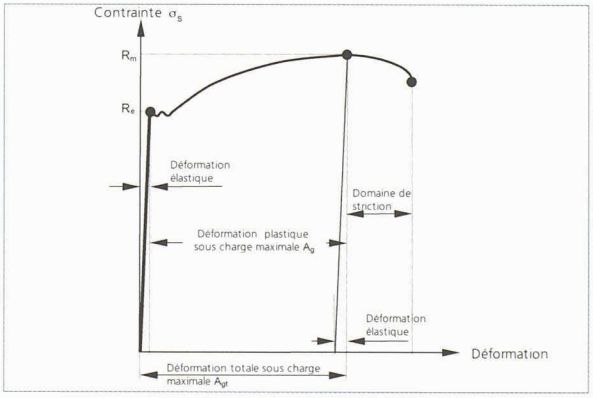
La sécurité par la **ductilité**[1]

Les nouvelles normes applicables aux ouvrages en béton armé (*Eurocodes* 2 et 8) confèrent à la ductilité des aciers d'armature une importance déterminante et les EPF ont effectué une multitude d'essais dans ce domaine. Quant aux tremblements de terre destructeurs survenus en Turquie et à Taiwan en 1999, ils ont donné une actualité toute particulière à cette problématique et à son application aux données propres à la Suisse. Le but du présent article vise à déterminer la classification des aciers d'armature disponibles en Suisse et à évaluer les efforts entrepris par les fabricants en vue d'une meilleure ductilité.

Alors que les normes appliquées jusqu'à présent se basaient souvent sur le procédé d'élasticité linéaire, on appliquera également à l'avenir des méthodes non linéaires ou la théorie de la plasticité. La ductilité (c'est-à-dire la capacité de déformation de l'acier sans endommagement ou formation de fissures) devient ainsi un critère de dimensionnement décisif. Cela est également intéressant compte tenu des aspects sismiques mentionnés dans l'introduction.

La capacité de déformation plastique constitue la base essentielle d'une construction sûre. Lorsque l'armature est correctement conçue, toute déficience du béton armé se manifeste par l'apparition de larges fissures et par des fléchissements importants de la structure. En cas de contraintes brusques, un maximum d'énergie doit pouvoir être absorbé par la capacité de déformation plastique de l'armature. Les valeurs caractéristiques déterminantes sont, à cet égard, le rapport entre la résistance à la traction et la limite d'allongement R_m/R_e (f_t/f_y) ainsi que l'allongement sous charge maximale A_{gt} (ε_u). Les deux valeurs sont déterminées lors d'un essai de traction (fig. 1).

Si la norme actuellement applicable aux structures en béton - soit la SIA 162 - contient elle aussi des exigences en matière de ductilité, celles-ci n'entrent pas dans le dimensionnement. Le tableau I illustre les exigences correspondantes basées sur les projets de normes actuels. Le registre des aciers d'armature conformes à la norme SIA 162 reprend depuis quelque temps les aciers d'armature admis sur le marché suisse selon la classification *Eurocode* 2.



1

VALEURS DE DUCTILITÉ DANS LES NORMES EUROPÉENNES

Norme	Classe de ductilité	R_e fyk [N/mm²]	R_m/R_e (ft/fy) [-]	A_{gt} _uk [%]
Eurocode 2	N	-	1,05	2,5
	H	-	1,08	5
Eurocode 8	M	-	1,15-1,35*	6
	H	-	1,20-1,35*	9
prEN 10080	A (B500B)	500	1,05	2,5
	B (B500B)	500	1,08	5
	C (B450C)	450	1,15-1,35	7,5

* Valeurs moyennes

I

Fabrication et propriétés des aciers d'armature actuels

Acier d'armature en barres

Lors de la fabrication de barres d'armature, le procédé qui s'est imposé au cours des années quatre-vingt est le trempage dès la sortie du laminoir (procédé *Thermex* ou *Tempcore*). Directement après le laminage, l'acier est à la température

[1] La version allemande de cet article a paru dans *Schweizer Ingenieur und Architekt*, N° 35/2000, sous le titre « Sicherheit durch Duktilität»

d'austénitisation nécessaire pour le traitement thermique. Après la dernière passe de laminage, la barre incandescente traverse un parcours de refroidissement avec une action refroidissante dosée de telle manière que sa couche extérieure est transformée en martensite (durcissement). Après le parcours de refroidissement, le noyau est encore si chaud que la couche extérieure refroidie est à nouveau revenue (durcir + revenir = tremper). Les propriétés peuvent être influencées par la composition de l'acier (alliage) et l'intensité du refroidissement. Avec une limite d'allongement nominale de 500 N/mm^2, on atteint des valeurs pour R_m/R_e de 1,12 à 1,26 et pour A_{gt} de 7 à 12%. Les valeurs de ductilité indiquées dans cet article sont des valeurs typiques pour les lignes de production respectives, mais il ne s'agit pas de valeurs caractéristiques ou de valeurs de calcul. Pour une limite d'allongement nominale de 450 N/mm^2, on obtient des valeurs de ductilité meilleures encore.

L'acier d'armature présente deux séries de nervures agencées en sens opposés (en arêtes de poisson, signe distinctif pour la classe de ductilité B500B). Une des deux rangées de nervures peut avoir des inclinaisons alternées.

Acier d'armature en couronnes

La fabrication d'acier d'armature en couronnes bénéficie d'un intérêt croissant grâce à l'usinage économique sur des installations automatiques de dressage et de cintrage, la tendance allant clairement vers des qualités plus ductiles laminées à chaud. L'acier d'armature en couronnes est fabriqué en diverses qualités et selon différents procédés.

Couronnes d'acier d'armature nervuré à froid (KR)

Le matériau initial est le fil laminé lisse dont la section est réduite par laminage à froid. Les nervures sont également appliquées par laminage à froid au cours de la dernière passe.

II

PROCÉDÉS DE FABRICATION UTILISÉS POUR L'ACIER D'ARMATURE LAMINÉ À CHAUD EN COURONNES (VR)

Fabricant (2000)	Produit	Diamètre	Procédé
Stahl Gerlafingen	topar-Rs et topar-Rc topar-Rs et topar-Rc topar-Rc	6 + 16 8 - 14 8 - 14	M V R
Ferriere Nord	Pittini RS 500	8 - 14	V
Badische Stahlwerke	BIRI-S BSW-Super-Ring	6 - 10 6 - 14	R R
SAM Montereau SAM Neuves Maisons	Nersam 500 S Nersam 500 S Super Nersam 500 S	8 - 14 8 - 16 8 - 16	V V R
Alfa Acciai	ALFIL 500 SR	6 - 14	R

La diminution de section en tant que mesure de l'écrouissage à froid se situe entre 12 et 25%. Avec une limite d'étirage nominale de 500 N/mm^2, on obtient les valeurs de ductilité suivantes: R_m/R_e de 1,05 à 1,09 et A_{gt} de 3 à 7%. L'obtention des valeurs caractéristiques exigées par les normes (90% des valeurs d'essai sont supérieures avec une probabilité de 90%) est déjà problématique pour la classe de ductilité inférieure, d'autant plus que les propriétés sont encore modifiées par le dressage. Bien que les couronnes d'acier nervuré à froid soient très appréciées pour l'usinage en raison de la constance des mesures et du façonnage facile, elles perdront de leur importance à l'avenir parce que la norme EC2 contient des restrictions d'application pour cette classe de ductilité.

L'acier d'armature *KR* (acier nervuré à froid en couronnes) se reconnaît aux trois rangées de nervures qui, à l'avenir, seront disposées dans la même direction (disposition hélicoïdale) distinguant la classe de ductilité B 500A.

Couronnes d'acier d'armature laminé à chaud (WR)

L'acier à béton *WR* présente deux ou quatre rangées de nervures qui identifient la classe de ductilité B500B et sont disposées en sens opposés (en arêtes de poisson), comme pour les barres d'armature. Comme procédés de fabrication, on utilise la trempe à la sortie du laminage à chaud (*V*), le micro-alliage (*M*) et l'étirage (*R*). Le tableau II reprend les fabricants cités dans le registre des aciers d'armature conformes à la norme avec leurs produits et leurs procédés de fabrication.

Trempe à la sortie du laminage à chaud (V)

On applique ici le même procédé que pour la fabrication de barres d'armature. En raison des vitesses de laminage supérieures, la technique de refroidissement est cependant plus exigeante et le parcours de refroidissement plus long, de sorte que seul un petit nombre de fabricants appliquent ce procédé. Les propriétés font l'objet d'une modification importante à la suite du dressage nécessitant des forces différentes sur des machines à rotor ou à rouleaux et en raison du processus de vieillissement qui en résulte (effet Bauschinger). Elles doivent être réglées à l'aide de valeurs par défaut correspondantes, de telle manière que les exigences de la norme soient satisfaites par le produit fini (après le dressage de l'acier en couronne). Pour une limite d'étirage nominale de 500 N/mm^2, on obtient les valeurs de ductilité suivantes: R_m/R_e de 1,08 à 1,20 et A_{gt} de 8 à 12%.

Micro-alliage (M)

Dans le cas du micro-alliage (teneurs d'alliage allant jusqu'à 0,12%), l'augmentation de la résistance est obtenue par

III

VALEURS DE DUCTILITÉ POUR LES TREILLIS EN ACIER D'ARMATURE NERVURÉ À FROID				
	R_m/R_e	R_e A_{gt}	Classe de ductilité EC 2	prEN 10080
S 550	1,03-1,07	2 à 6 %	-	-
S 500	1,05-1,09	3 à 7% (idem KR)	N	B500A

formation de grains fins et trempe par précipitation (carbonitride). Comme additif, le vanadium s'est imposé face au niobium et au titane. La part des durcisseurs classiques, carbone et manganèse, peut ainsi être maintenue à un niveau suffisamment bas pour garantir la soudabilité. Le micro-alliage est relativement cher et n'est par conséquent que rarement utilisé. La modification des propriétés par le dressage mécanique est moins importante. Les valeurs de ductilité pour une limite d'étirage nominale de 500 N/mm^2 se situent entre 1,18 et 1,32 pour R_m/R_e et entre 10 et 14% pour A_{gt}.

Dressage (R)

Le procédé le plus répandu pour la fabrication d'acier d'armature en couronnes est le dressage. Le matériau initial est un fil nervuré qui, par rebobinage continu sur un bloc de traction et un appareil de retenue, subit une faible déformation à froid par rapport à l'application de nervures à froid (diminution de section ou degré d'étirage de 3 à 6%). Les valeurs mécaniques sont contrôlables par la composition de l'acier et le degré d'étirage. Tout comme pour les couronnes trempées, les propriétés sont encore fortement modifiées par le dressage mécanique lors de la mise en œuvre. Les barres dressées atteignent pour une limite d'étirage nominale de 500 N/mm^2 les valeurs de ductilité suivantes: R_m/R_e de 1,10 à 1,22 et A_{gt} de 5 à 9%.

Treillis

Jusqu'en 1999, on ne pouvait trouver en Suisse que des treillis d'armature soudés avec une limite d'étirage nominale de 550 N/mm^2 (norme SIA 162: S 550, façonné à froid, soudé en réseau). Pour pouvoir prendre en compte les efforts en vue d'obtenir une meilleure ductilité, on a créé la possibilité d'utiliser également des treillis d'armature avec une nuance d'acier S 500 (limite d'étirage nominale de 500 N/mm^2) avec ductilité attestée selon EC 2 et qui sont déjà employés en Suisse.

Treillis en acier nervuré à froid

La fabrication du fil pour treillis a lieu selon le même procédé que pour l'acier d'armature nervuré à froid en couronnes (*KR*). Par la suite, les fils sont soit dressés et coupés à la longueur requise, soit directement dressés à partir de la bobine et ensuite soudés sur des machines spéciales en treillis plats (soudage par points), on obtient ainsi les valeurs de ductilité reprises au tableau III.

Treillis en acier laminé à chaud (WM)

Dans ce cas, on utilise comme matériau initial l'acier d'armature laminé à chaud en couronnes (*WR*). Selon le produit de départ utilisé, on obtient les valeurs de ductilité citées ci-dessus. Les treillis en acier laminé à chaud de cette qualité sont déjà fabriqués et commercialisés en Suisse.

Propriétés des aciers d'armature utilisés précédemment

On entend parfois dire que les aciers d'armature utilisés précédemment présentaient de meilleures caractéristiques de ductilité. Depuis le milieu des années cinquante jusqu'au début des années quatre-vingt, on a en effet fabriqué des aciers d'armature avec une limite d'étirage garantie située entre 450 et 500 N/mm^2, de sorte que les comparaisons ne se justifient que si elles portent sur cette période. Et il faut faire la distinction entre aciers autotrempants (*NH*) et tordus à froid. Pour les premiers (*Box*, *Box-Ultra*, *Baro*), on exploitait l'effet d'augmentation de la résistance des additifs que sont le carbone et le manganèse, si bien que leurs propriétés de ductilité étaient effectivement excellentes (R_m/R_e entre 1,25 et 1,55; les valeurs pour A_{gt} devaient se situer entre 10 et 14%). Ces aciers n'étaient toutefois pas soudables. Quant aux produits tordus à froid (*Caron*, *Roll-S*, *Torstahl 50*), ils étaient obtenus en tordant des barres longues et leurs valeurs de ductilité étaient inférieures à celles des barres actuelles (R_m/R_e entre 1,08 et 1,16; A_{gt} entre 6 et 10%).

Résumé

Les aciers d'armature commercialisés actuellement démontrent que les fabricants ont clairement tenu compte des nouvelles exigences: ils sont en mesure de fabriquer et de proposer à des prix raisonnables des produits d'une ductilité conforme aux normes. Ils contribuent ainsi à une sécurité accrue de nos structures en béton armé.

Bibliographie

[1] ENV 1992, Eurocode 2: «Calcul et mesure des structures en béton armé et béton précontraint». Correspond à la norme SIA V 162.001

[2] ENV 1998-1-1 à 3, Eurocode 8: «Conception d'ouvrages résistant aux tremblements de terre». Correspond à la norme SIA V 160.811 à 813

[3] prEN 10 080 partie 1 à 6: «Acier pour béton armé - Acier à béton soudable». Projet, juillet 1999

[4] SN (norme suisse) norme SIA 162: «Constructions en béton». 1989

[5] Oelhafen U.: «Betonstahl und Duktilität». *Schweizer Ingenieur und Architekt*, N° 29, p. 581-585, 1997

[6] Bachmann H.: «Tragwiderstand und Duktilität bei Stoss- und Erdbebeneinwirkung». *Beton- und Stahlbetonbau* 8/9, 1997

[7] Bachmann H., Wenk T.: «Ungenügende Duktilität beim Bewehrungsstahl». *Schweizer Ingenieur und Architekt* N° 29, p. 544-551, 1998

[8] Schwarzkopf M.: «Hochduktiler Betonstahl kommt! Betonfertigteile» Betonwerkstein 4, 1998

[9] Bachmann H.: «Duktiler Bewehrungsstahl - unentbehrlich für Stahlbetontragwerke». *Beton- und Stahlbetonbau* 4, p. 206-218, 2000

[10] Russwurm D.: «Betonstähle für den Stahlbetonbau: Eigenschaften und Verwendung». Bauverlag GmbH, Wiesbaden et Berlin 1993