

DOCUMENTATION TECHNIQUE – JANVIER 2022

Combar[®], armature composite en fibres de verre.

Un matériau composite à base de fibres de verre et de résine comme alternative innovante et avantageuse lorsque les armatures en acier atteignent leurs limites.

Ce guide technique ne s'applique pas pour des projets en Allemagne, aux Pays-Bas et au Canada. Pour des applications dans ces pays, merci de se référer aux informations techniques locales pour Schöck Combar®.

Les valeurs de dimensionnement et les recommandations fournies dans ce guide technique représentent le meilleur de nos connaissances au moment de la publication. Elles sont basées sur nos certifications internationales (Allemagne, Pays-Bas) et nos rapports de conformité (ISIS Canada, CSA S807, ACI440.3R) ainsi que sur les résultats de nos essais et recherches approfondis. Elles sont destinées à fournir au planificateur et à l'ingénieur une meilleure compréhension de Schöck Combar®. Les informations fournies dans ce guide technique ne dégagent en aucun cas l'ingénieur de ses devoirs et responsabilités. Ce guide technique ne peut remplacer les règles et règlements d'ingénierie communément acceptés.



Table des matières

| | Page |
|---|---------|
| Fibre composite renforcée | 4 |
| Aperçu des différents modèles | 5 |
| Description du produit | 6 |
| Fiche technique du produit | 7 |
| Combar® barres pliées et étriers | 8 - 9 |
| Barres avec têtes d'extrémité | 10 - 11 |
| Goujons | 12 |
| Certifications et rapports d'essais | 13 |
| Stockage, transport et usinage | 14 |
| Applications | 15 |
| Durabilité, valeur caractéristique de résistance à la traction | 16 - 17 |
| Comportement d'adhérence | 18 - 19 |
| Résistance à la traction et module d'élasticité | 20 |
| Ouverture de fissure | 21 - 22 |
| Déformation | 23 |
| Comportement thermique | 24 |
| Résistance au feu | 25 |
| Concept de dimensionnement | 26 - 29 |
| Tableau 1 : Table des valeurs de dimensionnement aux ELU | 30 - 31 |
| Tableau 2 : Renforcement pour nuances de béton spécifiques (C25/30) | 32 |
| Graphique 1 : Renforcement minimum pour une valeur donnée de w_{zul} | 33 |
| Graphique 2 : Renforcement anti-fissuration pour $M_{Ed} + N_{Ed}$ (C 25/30; $d/h = 0,10$) | 34 |
| Tableau 3 : Renforcement requis pour une déformation de $L/250$ | 35 |
| Tableau 4.a : Courbe d'élasticité des barres Combar® | 36 |
| Tableau 4.b : Déformation élastique des barres Combar® | 37 |
| Caractéristiques | 38 - 39 |

Fibre composite renforcée

Schöck Combar® (armature composite) appartient à la classe des matériaux composites. Les fibres composites sont combinées avec d'autres matériaux pour obtenir des propriétés améliorées et des effets synergiques. Les propriétés du matériau résultant peuvent être personnalisées en choisissant des fibres spécifiques, en ajustant leur orientation et en variant les additifs et liants.

L'un des composites les plus connus est le polymère renforcé de fibre de verre (GFRP). Il est utilisé dans de nombreux champs d'application, comme l'électronique et la construction navale, pour produire des éléments légers, hautement résistants et durables.

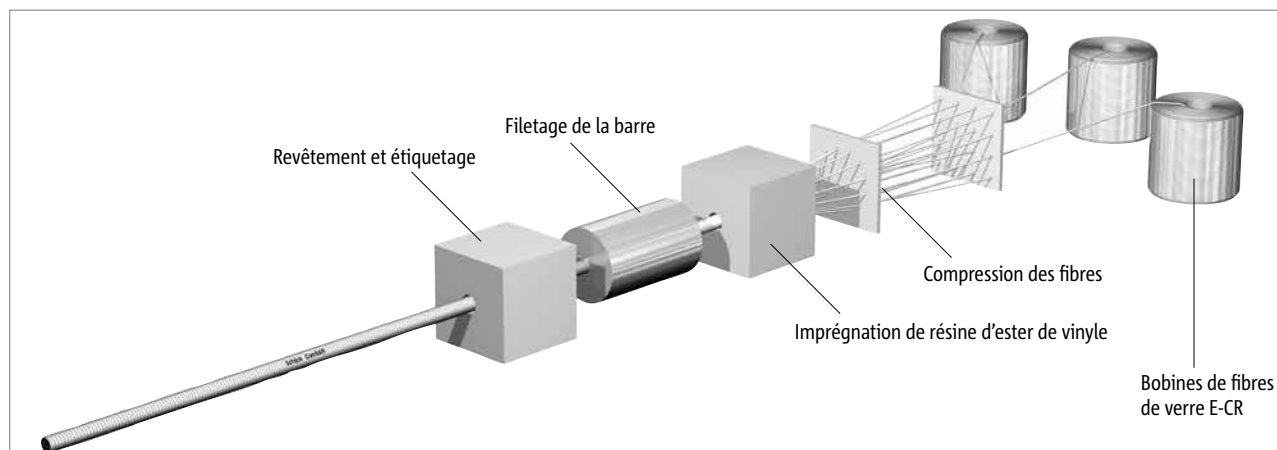
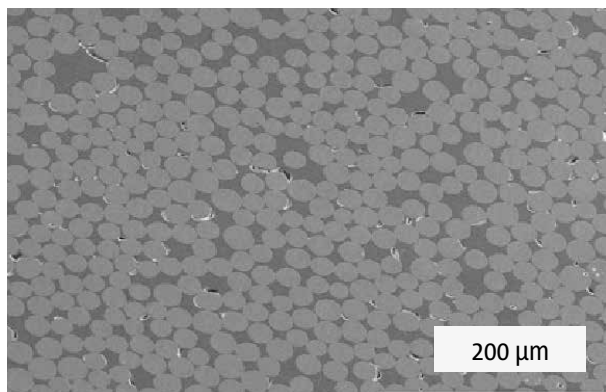
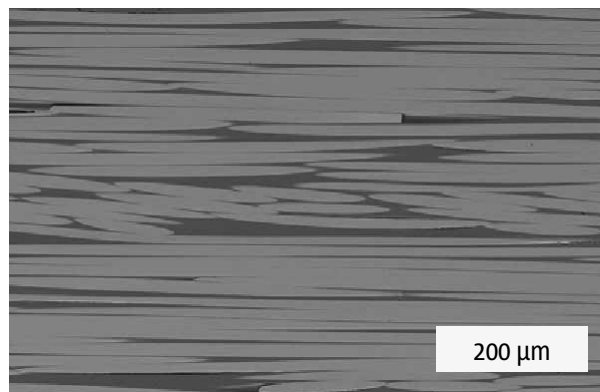


Schéma du processus de "Pultrusion"

L'armature composite Schöck Combar® offre une toute nouvelle gamme d'applications dans le génie civil et la construction d'éléments de grande hauteur, dès lors que le renforcement impose une haute résistance, l'absence d'acier, une haute durabilité, une résistance à la corrosion et une usinabilité facile. Cette barre d'armature consiste en une multitude de fibres continues, orientées dans la direction de la charge, chacune avec un diamètre d'environ 20µm. Elles sont liées dans une matrice de résine. Le processus de production unique garantit l'imprégnation complète des fibres de verre et un durcissement extrêmement élevé.



Coupe transversale d'une barre Schöck Combar®






Coupe longitudinale d'une barre Schöck Combar®

Les fibres fournissent la résistance longitudinale et la rigidité du matériau. La matrice de résine tient les fibres en place, distribue la charge et protège les fibres contre les possibles agressions.

La géométrie unique des nervures et le fait qu'elles soient réalisées dans la barre déjà durcie, garantissent les propriétés d'adhérences qui sont identiques à celles d'une armature en acier. Des charges importantes peuvent être transférées du béton dans la barre Combar®.

Les propriétés caractéristiques du matériau Schöck Combar® résultent de l'orientation uni-directionnelle des fibres : haute résistance axiale à la traction, faible résistance à la traction et à la compression perpendiculaire des fibres. L'analogie aux matériaux de construction naturels en bois décrit le mieux les propriétés anisotropes du matériau Schöck Combar®. Schöck Combar® est certifiée en Allemagne et aux Pays-Bas. La compatibilité des barres droites de 12, 16 et 32 mm avec le code ACI 440.3R est certifiée. La compatibilité des barres droites de 8, 12 et 16 mm ainsi que les barres façonnées de 12, 16 et 20 mm a été certifiée au regard des standards CSA S807-10.

Aperçu des différents modèles

| | | | |
|---|---|---|---|
|  | Barre droite¹⁾ Ø 8 mm Ø 12 mm Ø 16 mm Ø 20 mm Ø 25 mm Ø 32 mm Autres diamètres sur demande | Longueurs standards 10 m 11.8 m 11.8 m 11.8 m 14.5 m 14.5 m Autres longueurs sur demande | <ul style="list-style-type: none"> ■ Comme renforcement support de charge de traction d'éléments en béton |
|  | Barre avec tête d'ancrage Ø 12 mm Ø 16 mm Ø 20 mm Ø 25 mm Ø 32 mm | Longueurs standards 0.25 à 4.0 m | <ul style="list-style-type: none"> ■ Ancrage d'extrémité ■ Comme armature de cisaillement |
|  | Étrier/barre pliée Ø 12 mm Ø 16 mm Ø 20 mm | Longueurs standards de 0,5 m à 6,5 m, jusqu'à 1,95 m x 1,35 m et les tailles spéciales jusqu'à 2 m x 3,2 m | <ul style="list-style-type: none"> ■ Comme cadre d'armature ■ Comme renfort en bord de dalle, console, etc. ■ Comme armature de cisaillement |

¹⁾ Diamètre du noyau porteur en mm

Délais de livraison

Les délais de livraison sont disponibles sur demande (+33 3 88 20 92 28).

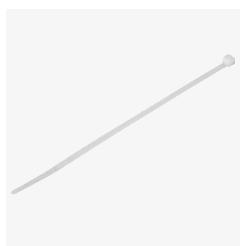
Accessoires

Pour les applications où le renforcement ne doit pas contenir d'éléments métalliques, Schöck propose des écarteurs en plastique (treillis tubulaire) et des clips en plastique pour la connexion des barres Combar® en angle droit. Sinon, les barres Combar® peuvent être liées entre elles en utilisant des attaches câbles en plastique.

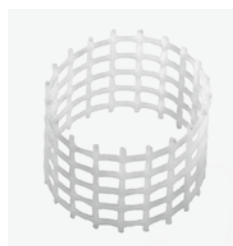
Enfin, Schöck a développé des colliers de serrage spéciaux en acier pour la liaison des barres Schöck Combar® avec les barres en acier d'un diamètre supérieur à 32 mm.



Clips



colliers de serrage plastique



Ecarteur



Serre câbles métallique

Description du produit

Schöck Combar® a été conçu en tant qu'armature interne d'éléments en béton. Les propriétés mécaniques et d'adhérence sont comparables à celles d'une armature en acier. Les propriétés du matériau ont été testées sous des charges statiques prédominantes dans un climat central européen. Schöck Combar® a été certifié pour une durée de vie de 100 ans.

Jusqu'à la rupture, le comportement des barres Schöck Combar® est linéairement élastique. La rupture est fragile. Pour tous les diamètres des barres, la contrainte de traction est atteinte bien au-delà des 1000 N/mm². Le module d'élasticité du Combar® étant relativement faible, la défaillance d'ouvrage en béton armé intégrant des Combar® est précédée d'importante déformation et de grandes ouvertures de fissures. Si l'ouvrage est déchargé, la déformation revient quasiment au niveau avant chargement.

Les barres Combar® ne peuvent pas être durablement déformées ou pliées sur site. La barre déformée, après l'avoir relâchée, revient toujours dans sa position d'origine. Les barres de petits diamètres peuvent être pliées élastiquement (sections circulaires de tunnels). Les barres façonnées et les étriers sont préfabriqués en usine, livrés pliés et prêts à poser sur le chantier.

Caractéristiques du matériau

Champs d'application

- Haute résistance à la corrosion => Parkings ouverts, parkings souterrains, tabliers de ponts et glissières, trottoirs, éléments de façade minces, renforcements côtiers, constructions hydrauliques
- Haute résistance chimique => Dallages industriels, silos industriels, stations d'épuration, bâtiments agricoles
- Non-conducteur d'électricité => Fondations et armatures pour les postes électriques, zones d'aiguillage et de signalisation pour les voies ferrées, environnement à champ électrique élevé
- Non-magnétique => Équipements électroniques sensibles aux champs magnétiques (Nanotechnologie, IRM, Microscope Electronique en Transmission)
- Facilement usinable => Parois moulées pour la réalisation de tunnels, ancrage de coffrages, déconstructions pré-planifiées
- Très faible conductivité thermique => Économies d'énergie en évitant les ponts thermiques, Schöck Isolink®

| Propriétés* | Armature en acier B500 | Armature en acier inoxydable | Schöck Combar® |
|--|----------------------------|------------------------------|---|
| Résistance ultime à la traction f_{tk} (N/mm ²) | 550 | 550 | > 1000 (voir page 16) |
| Valeur caractéristique de résistance à la traction f_{yk} (N/mm ²) | 500 | 500 | pas de plastification |
| Valeur de calcul de résistance à la traction f_{yd} (N/mm ²) | 435 | 435 | 445 (voir pages 17 et 20) |
| Allongement aux ELU | 2.18 ‰ | 2.72 ‰ | 7.4 ‰ |
| Module d'élasticité en traction (N/mm ²) | 200,000 | 160,000 | 60,000 |
| Valeur de résistance d'adhérence f_{bd} | selon EC 2 | selon EC 2 | voir page 26 |
| Enrobage (min.) | selon EC 2 | $d_s + 10$ mm | $d_r + 10$ mm |
| Densité γ (g/cm ³) | 7.85 | 7.85 | 2.2 |
| Conductivité thermique (W/mK) | 60 | 15 | 0,7 (axial) 0,5 (radial) |
| Coefficient de dilatation thermique (1/K) | $0.8 - 1.2 \times 10^{-5}$ | $0.8 - 1.6 \times 10^{-5}$ | 0.6×10^{-5} (axial) 2.2×10^{-5} (radial) |
| Résistivité électrique ($\mu\Omega\text{cm}$) | $1 - 2 \times 10^5$ | 7.2×10^5 | > 10^{12} |
| Magnétisme | oui | très peu | non |

* valeurs selon l'EC 2

Fiche technique du produit

Tailles, dimensions et poids de la barre

| Barre Combar® | Diamètre désigné (ACI / CSA) | Diamètre du noyau (mm) | Diamètre extérieur (mm) | Surface de calcul (mm ²) ¹⁾ | Poids par mètre linéaire (kg/m) |
|---------------|------------------------------|------------------------|-------------------------|--|---------------------------------|
| ∅ 8 | M8 | 8 | 9 | 50.3 | 0.13 |
| ∅ 12 | M13 | 12 | 13.5 | 113 | 0.29 |
| ∅ 16 | M15 | 16 | 18 | 201 | 0.52 |
| ∅ 20 | M20 | 20 | 22 | 314 | 0.79 |
| ∅ 25 | M25 | 25 | 27 | 491 | 1.21 |
| ∅ 32 | M32 | 32 | 34 | 804 | 1.94 |

¹⁾ Définition de la surface de calcul :

Le procédé de fabrication des barres Combar® est la pultrusion. Les nervures sont usinées dans la barre durcie. Par conséquent, les nervures ne contribuent pas au support de charge ou à la résistance à la traction. Pour déterminer la section transversale parfaitement ronde de la barre Combar®, le diamètre extérieur est mesuré en utilisant un pied à coulisse. La profondeur des nervures est soustraite deux fois de cette valeur pour déterminer le diamètre central. Les méthodes pour déterminer l'aire de la section transversale des barres FRP selon CSA S806, ISIS Canada et ACI440 ne sont pas applicables pour les barres Combar® car elles ont été développées pour des barres sablées ou des barres avec une surface déformée.

Propriétés du matériau des barres droites

| Propriétés | Symbole ¹⁾ | Valeurs | Remarques |
|---|-----------------------|---|---|
| Valeur caractéristique de résistance à la traction à court terme | f_{Rk0} | > 1000 N/mm ² | |
| Valeur caractéristique de résistance à la traction à long terme | f_{Rk} | 580 N/mm ² | voir pages 17 et 20 |
| Facteur de sécurité du matériau | γ_f | 1.3 | |
| Valeur de calcul de résistance à la traction à long terme ²⁾ | f_{td} | 445 N/mm ² | |
| Module d'élasticité en traction | E_f | 60,000 N/mm ² | voir page 20 |
| Allongement aux ELU ²⁾ | $\epsilon_{f, ULS}$ | 7.4 ‰ | (at $f = 445$ N/mm ²) |
| Valeur de calcul de la contrainte d'adhérence (bonne condition d'adhérence) | f_{bd} | 2.03 (N/mm ²) 2.33 (N/mm ²) 2.45 (N/mm ²) | C20/25 C30/37 C40/50 |
| Résistance transversale ³⁾ | τ | 150 N/mm ² | pas pour la conception des goujons ! |
| Enrobage | c_v | $d_f + 10$ mm $d_f + 5$ mm (préfa) | toutes classes d'exposition |
| Densité | γ | 2.2 (g/cm ³) | |
| Conductivité thermique | λ | < 0.7 W/mK axial 0.5 W/mK radial | |
| Coefficient de dilatation thermique | α | 0.6×10^{-5} 1/K (axial) 2.2×10^{-5} 1/K (radial) | béton : $0.5 - 1.5 \times 10^{-5}$ 1/K |
| Température critique | – | 400°C | voir page 25 |
| Conductivité électrique | – | > 10^{12} $\mu\Omega\text{cm}$ | |
| Résistance chimique | – | excellent | |
| Conductivité électromagnétique | – | aucune | |
| Propriétés environnementales | – | Z0 | selon LAGA (Allemagne) |
| Valeurs carac. pour 1000 heures de résistance (40 °C) ⁴⁾ | $f_{Rk, 1000h}$ | 950 N/mm ² | tous diamètres de barre |
| Échelle logarithmique ⁴⁾ | R10 | < 15% | à 40°C; par décennie log. |

¹⁾ symboles selon EC-2 / fib

²⁾ à 40°C (100 ans); pour les structures déterminées statiquement, pour les structures indéterminées : $f_{td} = 370$ N/mm², $\epsilon_{f, ULS} = 0.61$ ‰

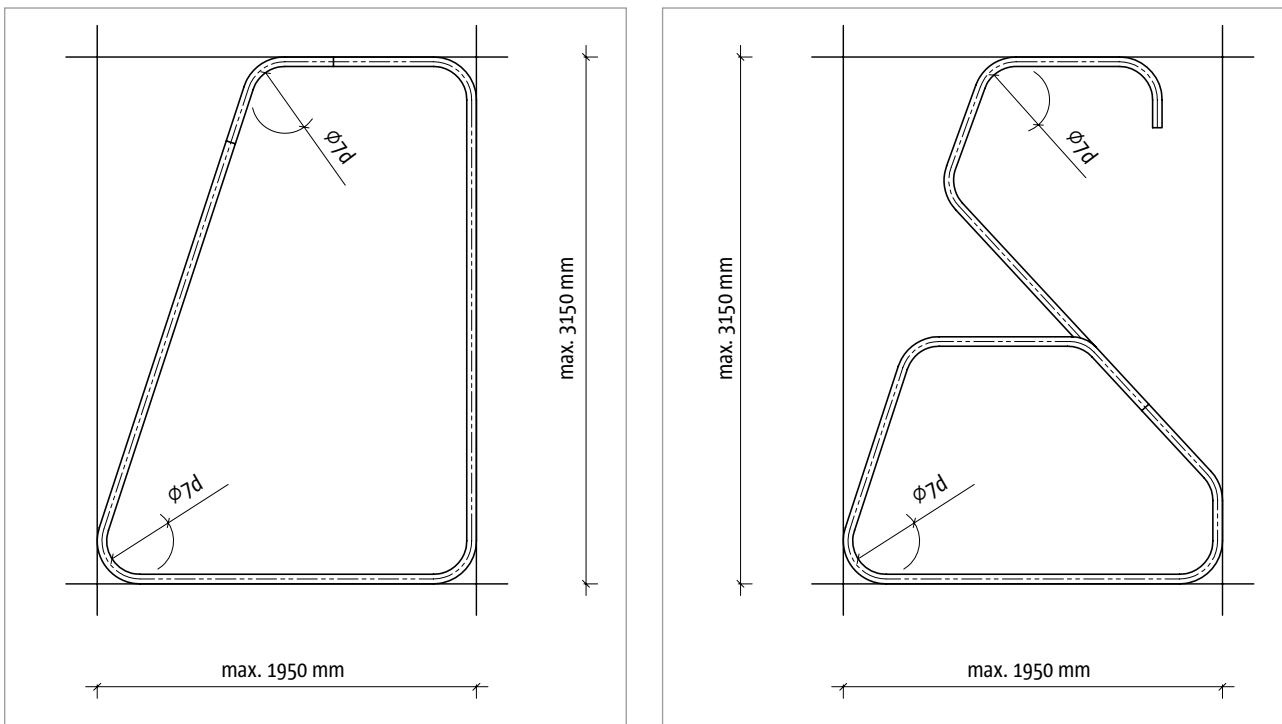
³⁾ valeurs en tests selon ACI / CSA, pas pour la conception de goujons de cisaillement !

⁴⁾ Pour déterminer la résistance à la traction à long terme selon le bulletin fib 40 (voir pages 17-18)

Combar® barres pliées et étriers

Les barres pliées et les étriers Combar® sont produits en courbant les fibres de verre imprégnées de résine d'ester de vinyle et en les recouvrant d'une fine couche de polypropylène. Ensuite, ces barres brutes sont traitées thermiquement. Cette procédure permet une teneur élevée en fibres et un alignement quasi parfait de celles-ci dans la portion pliée des barres, permettant une haute résistance et un module d'élasticité similaire à celui des barres droites Combar®.

Les barres façonnées Combar® peuvent être produites dans toutes les formes 2D (par exemple en forme de z et de chapeau). Les barres en 3D comme les spirales peuvent être produites sur demande. Le plus petit diamètre de cintrage est égal à sept fois le diamètre nominal de la barre. Les barres façonnées Combar® sont durcies à la forme voulue avec des dimensions maximales de 1.95 x 1.35 m, et pour les étriers de tailles spéciales jusqu'à 1.95 x 3.15 m.



Tailles, dimensions et poids des barres pliées

| Diamètre nominal (mm) | Diamètre du noyau (mm) | Diamètre extérieur (mm) | Section transversale nominale (mm ²) | Poids (kg/m) | Taille min. du mandrin 7 d _b (mm) | Longueur min./max. des barres (m) |
|-----------------------|------------------------|-------------------------|--|--------------|--|-----------------------------------|
| ∅ 12 | 11.6 | 15.5 | 106 | 0.30 | 84 | 0.5 m / 6.5 m |
| ∅ 16 | 15.6 | 19.8 | 191 | 0.49 | 112 | |
| ∅ 20 | 19.1 | 23.8 | 287 | 0.71 | 140 | |

Combar® barres pliées et étriers

Contenu en fibre, ratio de durcissement

Le contenu en fibres des barres façonnées Combar® (tous diamètres) est environ de 65% (du poids incluant les nervures).

Résistance à la traction, module d'élasticité, durabilité

Le module d'élasticité des barres pliées Combar® est de 50 GPa. Le facteur de sécurité partiel est de 1.3 (certification Combar® allemande).

La résistance à la traction à long terme des barres pliées Combar® a été déterminée selon le modèle de durabilité spécifié dans l'approbation allemande des barres droites Combar®. La résistance à la traction est déterminée pour des charges soutenues et une durée de vie de 100 ans à une température effective de 40°C dans un béton hautement alcalin. (Merci de vous référer aux pages 16-17).

| Diamètre nominal (mm) | Résistance à la traction ultime* f_{tu} | | Valeur caractéristique*** f_{fk} | Valeur de conception*** f_{fd} | Module d'élasticité E_f^{**} |
|-----------------------|--|-----------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| ∅ 12 | 1000 N/mm ² | 600 N/mm ² | 250 N/mm ² | 192 N/mm ² | 50.000 N/mm ² |
| ∅ 16 | 950 N/mm ² | 600 N/mm ² | | | |
| ∅ 20 | 600 N/mm ² | 600 N/mm ² | | | |

* valeur plus importante pour section droite, plus faible dans section pliée

** valeur moyenne du module d'élasticité

*** basée sur le diamètre nominal

Propriétés d'adhérence

Les valeurs maximales de contrainte d'adhérence f_{fbu} dans la portion droite des barres et dans les zones pliées (barre avec ancrage d'extrémité) sont (longueur d'ancrage 5 et 10 fois le diamètre de la barre dans un béton C20/25) :

| Diamètre nominal | Section droite | Courbe |
|------------------|----------------------|----------------------|
| ∅ 12, 16 | 8 N/mm ² | 10 N/mm ² |
| ∅ 20 | 10 N/mm ² | 12 N/mm ² |

Pour tous les diamètres de barres (barres pliées) et, indépendamment de la résistance du béton, la valeur de calcul de la contrainte d'adhérence s'établit à

$$f_{fbd} = 2.3 \text{ N/mm}^2$$

Dans de mauvaises conditions d'adhérence cette valeur doit être réduite à 1.6 N/mm² en conformité avec l'EC 2.

Température critique

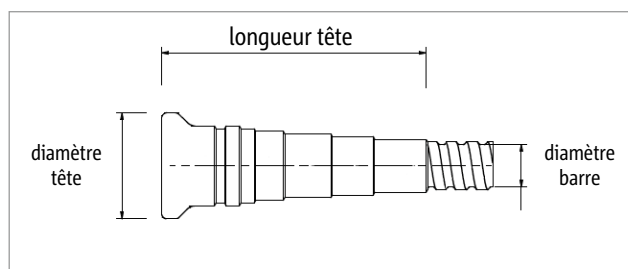
La température critique des barres pliées Combar® est d'environ 120°C.

Barres avec têtes d'extrémité

Les barres Combar® avec têtes d'extrémité sont utilisées pour réduire la longueur d'ancrage des barres droites ou comme armature de cisaillement dans les parois moulées et pieux forés (double tête d'extrémité).

Les têtes d'extrémité de la barre Combar® sont faites de béton polymère. Elles sont coulées aux extrémités des barres Combar® droites. La géométrie spéciale des têtes d'extrémité assure des forces de séparation minimales au droit de la tête. Ainsi, les têtes d'extrémité peuvent être installées très près de la surface du béton. L'enrobage axial de béton n'est pas nécessaire, de même pour les barres droites Combar®.

Le comportement et la durabilité à long terme sont régis par le comportement de la barre. Les tests d'arrachement à long terme ont été effectués sur des barres avec têtes d'extrémité coulées dans des cubes de béton hautement alcalin. Les barres ont été exposées à des contraintes constantes jusqu'à défaillance. Les cubes de béton ont été chauffés à 60°C et saturés avec de l'eau pendant toute la durée des tests. Le temps jusqu'à la défaillance pour des barres avec têtes d'extrémité a été établi en utilisant les résultats d'un nombre important de tests à différents niveaux de charge. Les valeurs caractéristiques de la longueur d'ancrage des têtes d'extrémité ont été déterminées pour des applications avec une température effective maximale de 40°C (pour les projets en Amérique de Nord et Europe centrale). Cette procédure correspond largement au concept de durabilité spécifié dans la certification allemande des barres droites Combar®. Se référer aux pages 16 et 17 pour plus de détails sur le concept de durabilité.



Dimensions, force d'ancrage des tête d'extrémité

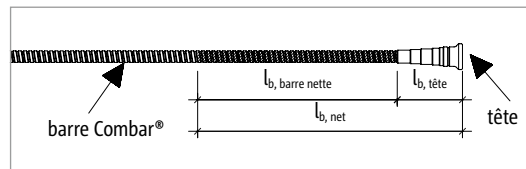
| Diamètre barre (mm) | Longueur tête (mm) | Diamètre tête (mm) | Longueur de barre min. (d _{hb}) en mm | Longueur de barre max. | F _{tête,k} court terme (kN) | F _{tête,k} long terme (kN) |
|---------------------|--------------------|--------------------|---|------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| ∅ 12 | 60 | 30 | 160 | 4.0 m | 50 | 31 |
| ∅ 16 | 100 | 40 | 240 | | 100 | 68 |
| ∅ 20 | 100 | 45 | 240 | | 125 | 85 |
| ∅ 25 | 100 | 50 | 240 | | 156 | 106 |
| ∅ 32 | 100 | 64 | 240 | | 200 | 136 |

Barres avec têtes d'extrémité

La longueur d'ancrage requise des barres droites Combar® peut être réduite en installant une barre avec têtes d'extrémité. Si la force d'ancrage requise est supérieure à $F_{tête}$, la force restante doit être ancrée par la portion droite. Par conséquent, $l_{b,net}$ est déterminé en ajoutant la longueur de la tête $l_{b,tête}$ et la longueur d'ancrage de la barre $l_{b,barre\ nette}$.

$$F_d = F_{tête, d} + F_{barre, d}$$

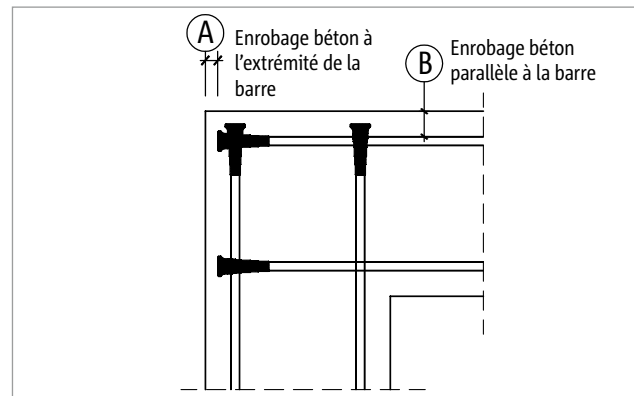
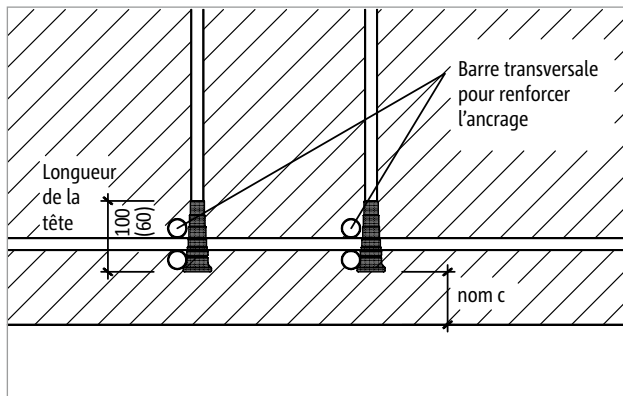
$$l_{b, net} = l_{b,tête} + l_{b, barre\ nette}$$



Les têtes d'extrémité des barres double tête Combar® utilisées comme armatures de cisaillement ou de poinçonnement ont besoin d'être complètement ancrées par renforcement longitudinal/transversal pour se conformer à un système traction/compression.

La charge est transférée sur la longueur complète de la tête. Au moins une barre d'armature transversale doit être installée perpendiculairement à la tête d'ancrage près de son extrémité. Cela permet à la tête d'être pleinement ancrée. Pour le dimensionnement d'un ferrailage de cisaillement, seule la force ancrée par le renforcement longitudinal ou une barre transversale additionnelle (voir figure ci-dessous) peut être considérée.

Les barres Combar® avec têtes d'extrémité peuvent être placées directement sur le coffrage (enrobage béton $A \leq 0$ mm). L'enrobage parallèle aux barres Combar® avec têtes d'extrémité ne doit pas être inférieur à 50 mm (enrobage béton B).



Goujons

Les barres Combar® avec et sans nervures peuvent être utilisées comme goujons de cisaillement pour connecter les éléments en béton attenants (dalles d'autoroutes, éléments précontraints, etc.).

Des essais ont été réalisés sur des goujons Combar® moulés dans des éléments en béton pour déterminer leur capacité de charge en cisaillement. Il a été démontré que la capacité de charge portante admissible par les goujons est limitée par leur résistance inter-laminaire en cisaillement. Une fois dépassée, des fissures longitudinales surviennent dans le goujon le long de son axe, menant à une réduction de la longueur effective du goujon. Il peut en résulter une rupture du béton au bord de la section.

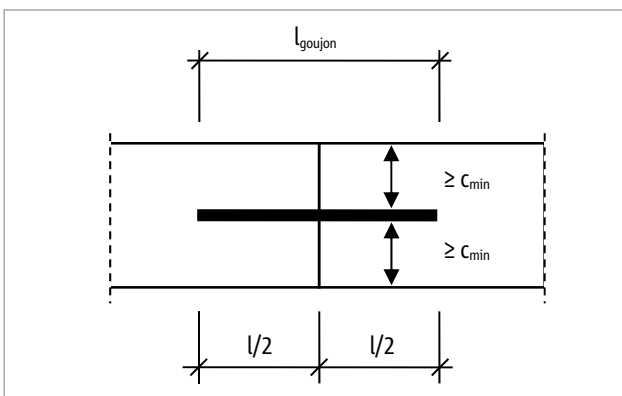
Les valeurs de conception (long terme) pour les goujons Combar® ont été déterminées par des essais de durabilité réalisés à 60°C dans un béton hautement alcalin avec une résistance à la compression de 35 MPa. Ce concept de vérification correspond au concept de durabilité spécifié dans les dernières approbations de certains Combar® et le guide de la Fédération Internationale du Béton (fib Bulletin 40).

Valeurs de conception des goujons Combar® (barres lisses)

| df, diamètre goujon [mm] | Af, aire de section transversale du goujon [mm ²] | V _d valeur de résistance au cisaillement [kN] | l _{goujon, min.} longueur minimum [mm] | c _{min} enrobage de béton min.* [mm] | Longueurs standards [mm] |
|--------------------------|---|--|---|---|--------------------------|
| 18.0 | 254 | 5.1 | 200 | 144 | 300 |
| 22.0 | 380 | 7.6 | 2 x 110 = 220 | 176 | 400 |
| 27.0 | 573 | 11.4 | 2 x 150 = 300 | 216 | 450 |
| 34.0 | 908 | 18.2 | 2 x 175 = 350 | 272 | 450 |

* Valeurs selon le guide allemand des goujons acier (DAfStb 460), les valeurs inférieures doivent être vérifiées.

Détail d'installation



Certifications et rapports d'essais

Certifications internationales

| Organisation, pays | Titre | Date d'émission |
|---|--|-----------------------------|
| DIBt, Berlin, Allemagne | General construction authority permit Schöck Isolink® (Zul.-Nr. Z-21.8-1894) | Nov. 2009 étendu Nov. 2024 |
| DIBt, Berlin, Allemagne | General construction authority permit Schöck Combar® glass fibre reinforced polymer rebar (Zul.-Nr.: Z-1.6-238) | Jui. 2019 étendu Janv. 2024 |
| KOMO, KIWA, Pays-Bas | Combar® glass fibre reinforcement in concrete \varnothing 8, 12, 16 mm (K49001/01) | Fev. 2009 |
| Université de Toronto, Canada | Compliance of 16 mm Combar® GFRP bars with ISIS Canada Certification Specifications | Oct. 2007 Nov. 2010 |
| Université de Syracuse, USA | Evaluation and Certification of GFRP bars Combar®; Tests with Respect to the Requirements of the ACI 440.R3-04 Report (12, 16 and 32 mm) | Juillet 2006 |
| Institut Bauen und Umwelt e.V., Berlin, Allemagne | Environmental Product Declaration Combar® : EPD-SBG-20200240-IBA1-FR | Mars 2021 étendu Avril 2026 |

Rapports d'essais et avis d'experts

Les barres Combar® ont été largement testées par des experts indépendants à travers le monde et au sein du laboratoire interne de Schöck conjointement avec les certifications en Allemagne, aux Pays-Bas et au Canada. La majorité de ces tests ont été menés au sein du laboratoire Schöck, qui est spécifiquement certifié pour les effectuer. Ces tests ont été supervisés par des experts indépendants.

Les rapports et opinions d'experts sélectionnés en anglais sur les tests de matériau et les propriétés mécaniques du Combar® sont listés ci-dessous.

| Propriétés du matériau | Titre du rapport | Auteur |
|-----------------------------|--|---|
| Santé humaine et sécurité | Continuous Filament Glass Fibre and Human Health | European Glass Fibre Producers Association, APFE |
| Impact environnemental | Categorisation of GFRP bars Combar® into the group Z0 | Chemical Lab Dr. Vogt, Karlsruhe, Germany |
| Résistance à la traction | Report on mechanical testing of GFRP rebars (8, 12, 16 mm) | Arab Center for Engineering Studies, Doha, Qatar |
| Performance au feu | Combar® bond fire performance | Danish Technological Institute, Taastrup, Denmark |
| Dépendance à la température | Determination of temperature-dependent tensile strengths of Combar® reinforcement bars | Materials Testing Institute Braunschweig, Germany |
| Durabilité | Durability and creep-rupture tests performed on straight GFRP bars with standard coating d = 16 mm | Schöck Bauteile GmbH (certification tests) |

Stockage, transport et usinage

Stockage et transport

Schöck Combar® doit être couvert et stocké dans un environnement sec, en particulier pour le stockage de longues périodes. Dans un test spécial, le Combar® a été exposé à la lumière directe pendant 8 semaines. Les barres ont montré une décoloration, qui n'affectait en rien les propriétés mécaniques.

Pour éviter d'endommager les nervures, le matériel ne doit pas être traîné sur le sol. Il ne doit pas non plus être soumis à des efforts abrasifs.

Quand soulevé par une grue, la déformation des barres Combar® est similaire à celle des barres en acier. Une poutre transversale et du matériel de levage approprié doit être utilisé.

Usinage

L'usinage de Schöck Combar® est bien plus facile que l'usinage d'une armature en acier. Les barres Combar® ne doivent pas être coupées avec des coupe-boulons ou des cisailles, puisque les fibres de verre s'effiloquent quand le matériau est coupé. En revanche, elles peuvent être coupées avec une scie à métaux ou une meuleuse d'angle.

Les bavures aux extrémités de la barre peuvent être retirées à l'aide d'une lime ou d'une râpe.

Pliage

En raison du comportement linéaire élastique du matériau, Combar® ne peut pas être plié sur site. Les barres déformées reprennent leur forme initiale.

Les barres Combar® de petit diamètre peuvent être pliées aussi longtemps qu'elles sont fixées jusqu'à ce que le béton durcisse. La contrainte induite pas le cintrage doit être prise en compte en tant qu'action permanente. Voir tableau 5b. La contrainte totale ne doit pas dépasser la valeur admissible.

Les étriers Combar® personnalisés et les barres pliées sont préfabriqués en usine.

Technologie de connexion

Les cages d'armatures réalisées en barres Schöck Combar® sont idéalement assemblées avec une fixation ordinaire ou un fil de fer gainé.

Pour des constructions sans acier des attaches câbles peuvent être utilisés.

Des clips en plastique pour connecter les barres Combar® sont disponibles pour les connexions de barres 8 mm à 8 mm et 12 mm à 12 mm.

Des colliers de serrage peuvent être utilisés pour connecter les barres Schöck Combar® aux barres de renforcement en acier.

Applications

Rapports de référence sur
www.schoeck.com/fr

Application

Bénéfices

Bâtiments et sols industriels

- Renforcement non métallique :
- Pas de courants d'induction dans l'armature
 - Pas de perturbation des systèmes de transports



Structures de parking et garages

- Renforcement non-corrosif :
- Pas de revêtement de fissures requis
 - Enrobage béton réduit, dalles fines



Ponts, trottoirs, corniches, parapets, digues, bordures

- Renforcement non-corrosif :
- Pas de dommages liés au sel de déglçage
 - Durée de vie rallongée



Voies ferrées

- Renforcement non métallique :
- Pas de perturbation des systèmes de signalisation
 - Pas de courants d'induction dans le renforcement près des commutateurs (bobines d'induction)



Structures maritimes

- Renforcement non-corrosif :
- Pas de corrosion liée à l'eau de mer
 - Durée de vie rallongée



Éléments préfabriqués et panneaux de façades

- Renforcement non-corrosif :
- Enrobage béton minimal suffisant
 - Épaisseur minimale



Bâtiments de recherche et constructions saines/sensibles

- Renforcement non métallique :
- Pas de création ou de perturbation de champs magnétiques



Rénovation

- Faible module d'élasticité et haute stabilité dimensionnelle :
- Faibles contraintes près des points d'ancrage dues aux variations de température



Génie civil et infrastructure

- Renforcement facilement usinable :
- Peut être directement traversé par le tunnelier
 - Réduction significative des coûts de constructions



Durabilité

Les codes internationaux en vigueur et les guides sur les renforcements FRP et le dimensionnement de structures en béton renforcées avec FRP requièrent des tests de durabilités sur la base d'une approche de résistance résiduelle (CSA, ACI, etc.). Les barres sont vieillies soit sous charge ou à une charge relativement faible ($\leq 0.3\%$) dans une solution alcaline pour des périodes de temps spécifiques. Leur résistance à la traction résiduelle est testée et comparée à leur résistance initiale.

Cette approche a été développée à une période où les armatures FRP étaient principalement utilisées comme renforcement de fissuration ou secondaire et les niveaux de contraintes dans les barres étaient relativement faibles. Les nouvelles générations de barres FRP, comme Schöck Combar®, sont capables de subir des contraintes bien supérieures. Leurs propriétés d'adhérence sont pratiquement identiques à celles d'un renforcement acier. Cependant, à la différence de l'acier, la résistance à long terme des FRP diminue avec le temps. La contrainte de traction permanente des FRP est une fonction des conditions environnementales dominantes (température moyenne, amplitude des changements de température, niveau d'humidité).

Pour permettre une utilisation économique de ces barres, un autre concept de sécurité doit être appliqué. Ce concept est nécessaire pour dériver les valeurs de dimensionnement de résistance à la traction pour tout environnement spécifique et toute durée de vie spécifique du design. L'objectif central du concept est de garantir le même niveau de sécurité pour tout dimensionnement d'éléments en béton renforcés avec FRP, tout en permettant une structure efficace et économique.

La résistance à long terme ainsi que la durabilité chimique pour une durée de vie de 100 ans a été prouvée durant le processus de certification en Allemagne et aux Pays-Bas, et pour les tests de conformité aux standards Canadien.

Une charge permanente a été appliquée dans un béton humide avec un haut niveau alcalin jusqu'à rupture et les tests ont été réalisés à température ambiante, à 40°C et 60°C.

La durée jusqu'à rupture a été enregistrée pour tous les échantillons. En fonction de la charge, de la température, des périodes entre 50 et 6500 heures ont été mesurées. Il y avait un échantillon montrant une rupture après 45000 heures à température ambiante.

En se basant sur plus 80 essais uniques, les graphiques suivants (courbe moyenne ainsi que 5% centile) ont été calculés par des méthodes de statistiques standards pour chacune des 3 températures (23°C, 40°C et 60°C). La gamme d'extrapolation de la courbe de 40°C a été validée, en montrant un comportement linéaire à 60°C.

La valeur caractéristique de la résistance à long terme a été calculée pour 100 ans de durée de vie et 40°C. Cette valeur doit être utilisée pour toute application extérieure et intérieure, dans un climat central européen, de façon identique pour chaque diamètre. Les diamètres 8, 16 et 25 mm ont par conséquent été testés.

Pour de plus grandes différences dans des conditions d'exposition concernant la température ou la durée de vie, différentes valeurs peuvent être représentées du diagramme. Un processus environnemental détaillé de dimensionnement est décrit dans le FIB Bulletin 40 « FRP reinforcement in R/C structures ».

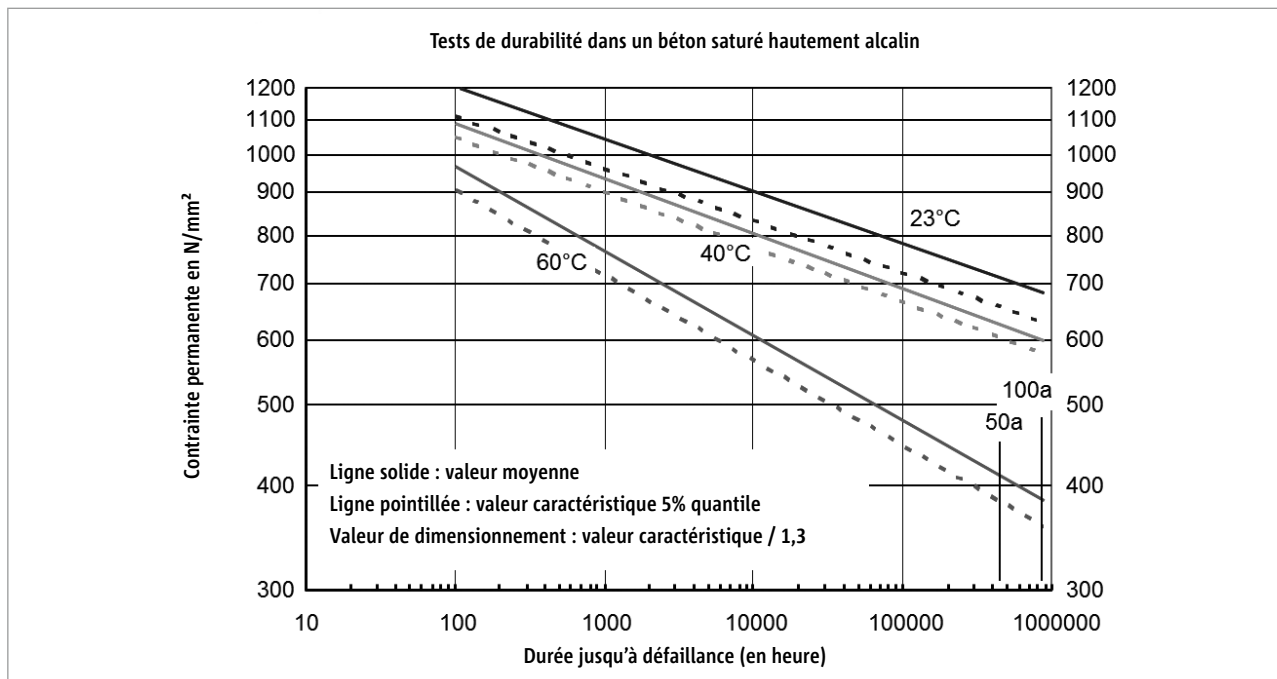
La valeur de dimensionnement de résistance à long terme est déterminée de façon analogue à celle des armatures en acier en divisant par le facteur partiel du matériau. Le facteur partiel de Combar® est $\gamma_f = 1,3$.

La valeur de dimensionnement de la résistance à la traction en état limite ultime (ELU) $f_{fd} = 445 \text{ N/mm}^2$. L'enrobage béton n'a aucune incidence sur la durabilité du Combar®.

L'enrobage de béton de l'EC 2 pour une exposition de classe XC 1 peut être utilisé pour Combar® dans toutes les classes d'exposition.

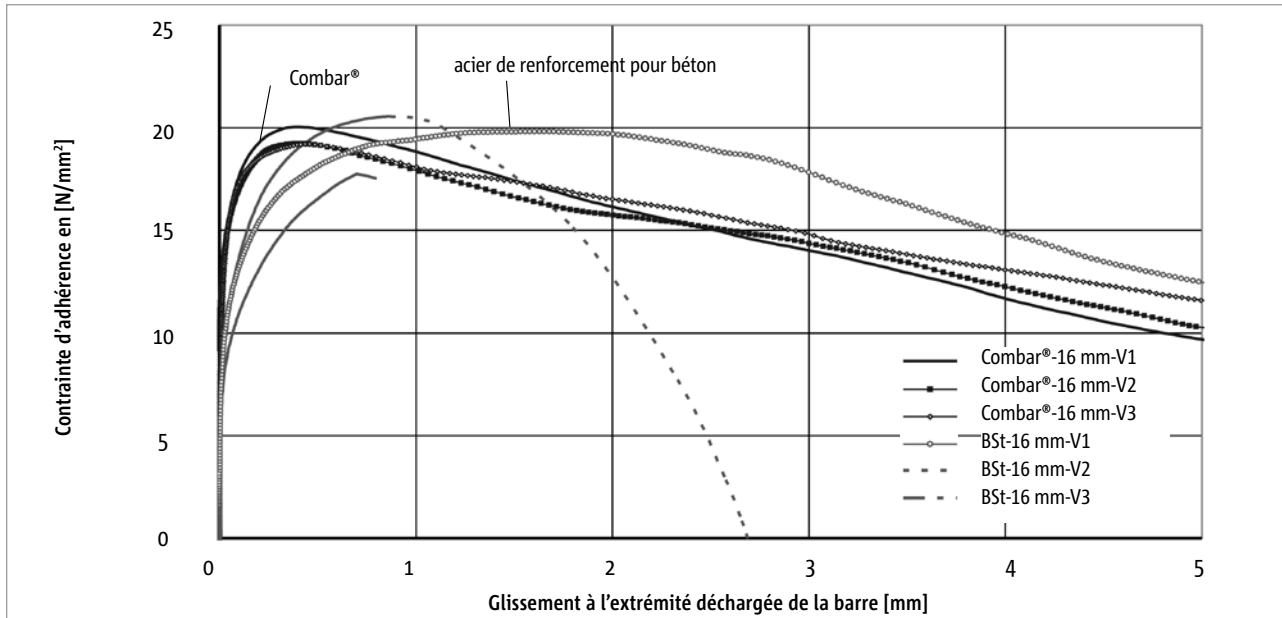
Les valeurs minimales correspondantes sont $d_s + 10 \text{ mm}$ ou $d_s + 5 \text{ mm}$ pour les éléments préfabriqués. Ces valeurs assurent un comportement d'adhérence suffisant à la barre.

Durabilité



Comportement d'adhérence (court terme)

Les tests d'arrachement centraux ont été réalisés sur un tube de béton de 150 mm, selon les recommandations du RILEM RC 6. Le déplacement à l'extrémité déchargée de la barre a été déterminé en fonction de la charge. La résistance de compression du béton était $> 40 \text{ N/mm}^2$.



Les résultats des séries de tests sont :

- Le mode de rupture est, comme avec l'acier, l'extraction des nervures en béton du bloc. Les nervures de l'armature sont majoritairement intactes.
- Comme c'est le cas pour un renforcement acier, une plus grande adhérence est observée dans un béton de meilleur qualité.
- Pas de différences majeures observées entre Schöck Combar® et une barre en acier concernant le glissement de l'extrémité de la barre à vide. La contrainte d'adhérence maximale a été enregistrée à un glissement entre 0,2 et 0,8 mm.
- Même si la contrainte d'adhérence des barres Combar® est meilleure pour la même valeur de glissement, les forces de séparation du bloc béton sont plus faibles que celles pour des armatures en acier.
- Des tests d'adhérence supplémentaires ont montré que, dans un béton de qualité normale, le comportement d'adhérence du Combar® est contrôlé par la résistance des nervures en béton et, dans un béton à haute résistance ($> 60 \text{ MPa}$), par la résistance du filetage du Combar®.



Le profil de surface particulier des barres Schöck Combar® assure une adhérence optimale entre le béton et l'armature.

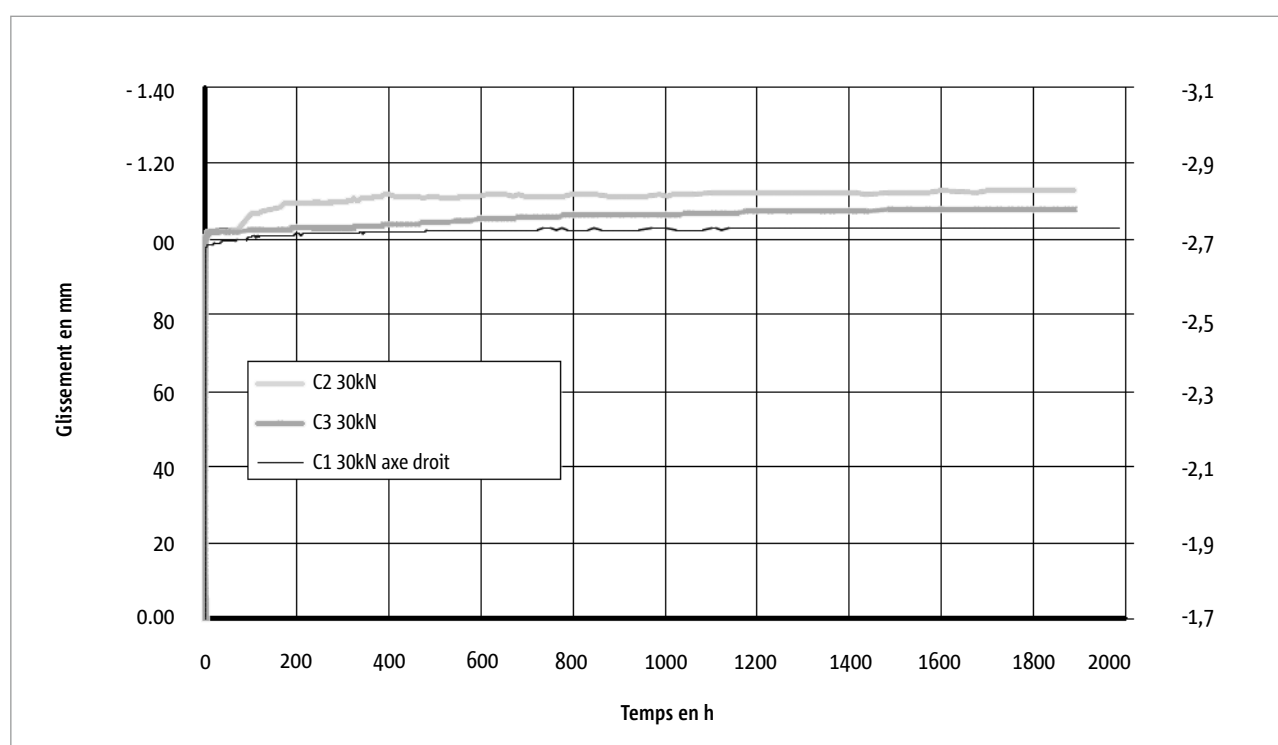
Comportement d'adhérence (long terme)

Pour déterminer le comportement à long terme et le comportement au fluage de l'adhérence des barres Combar®, plusieurs séries de tests d'adhérence ont été réalisées selon les recommandations RC6 du RILEM. L'objectif était d'obtenir le comportement d'adhérence des barres Combar® sur 100 ans de durée de vie sur les bases d'essais accélérés à long terme dans d'extrêmes conditions.

Fluage-adhérence après préchargement

Pour évaluer le comportement de fluage des barres Combar® dans des éléments en béton pré-chargés, les barres Combar® ont été coulées au centre de cubes en béton de 150 mm. La longueur d'ancrage était 5 barres d'un diamètre $l_{b,net} = 5 d_f$. Les barres ont tout d'abord été chargées jusqu'à un glissement total à l'extrémité chargée entre 1 et 3 mm.

Ensuite, une charge permanente un peu plus faible a été appliquée aux barres. Pour la durée entière de cette seconde étape, les cubes de béton ont été chauffés à 60°C et maintenus complètement saturés en eau. Lors d'une contrainte d'adhérence de 7,5 MPa (30 kN), le glissement a été inférieur à 0,2 mm.



Fluage-adhérence après préchargement à $f_b = 7.5$ MPa; 60°C, béton à saturation constante

Fluage-adhérence sans préchargement

Sans préchargement, des contraintes d'adhérence de 8 MPa pourraient être soutenues pendant 5000 heures (60°C, 10 ds longueur d'ancrage).

Conclusions

- La résistance d'adhérence à long terme (100 ans de durée de vie) est dans la moyenne de la valeur requise à court terme de 8,0 MPa (CSA S807 standard Canada).
- Le glissement d'adhérence peut être négligé en charge de service.

Résistance à la traction et module d'élasticité (barres droites)

En contraste par rapport à l'acier, Schöck Combar® se comporte de façon élastique linéaire jusqu'à la rupture. Il n'y a pas de plastification observée. Le module d'élasticité des barres droites est au-dessus de 60000 N/mm². La valeur moyenne de résistance à la traction à court terme mesurée sur des barres Combar® nues est comprise entre 1000 N/mm² (barres 32 mm) et bien au-dessus de 1500 N/mm² (barres 8 mm). Ces valeurs sont hautement influencées par la configuration de chaque test de résistance. Pour une conception structurelle, seule la résistance à long terme est pertinente. Les valeurs de résistance à court terme ne peuvent pas être extrapolées.

| Diamètre barre [mm] | Valeur moyenne f_{fk} [N/mm ²] |
|---------------------|--|
| ∅ 8 | 1500 |
| ∅ 12 | 1350 |
| ∅ 16 | > 1200 |
| ∅ 20 | > 1150 |
| ∅ 25 | > 1100 |
| ∅ 32 | > 1000 |

Valeurs des tests de conformité de l'Université de Toronto

Pour déterminer la résistance à la traction et la relation contrainte-déformation, les deux extrémités des barres Schöck Combar® sont collées dans des coupleurs. La charge est appliquée à environ 1 kN/sec. Le diagramme ci-dessous montre le test de traction pour une barre de diamètre 16 mm.

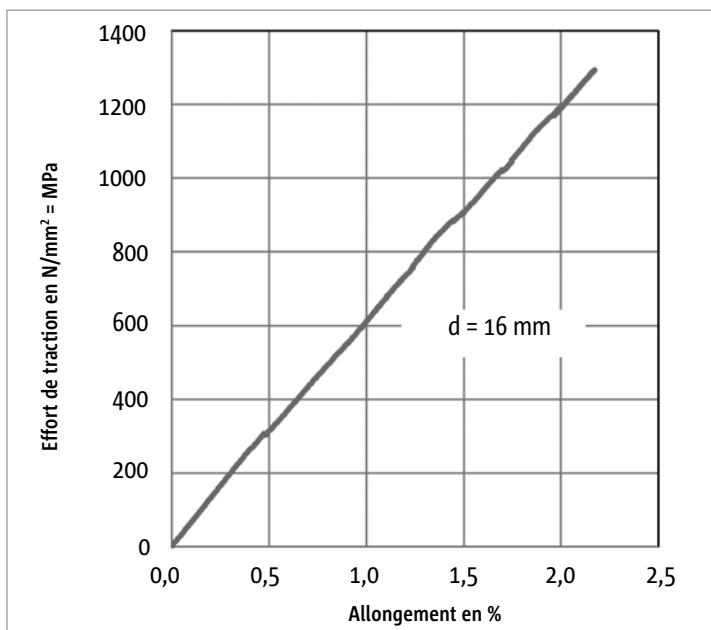
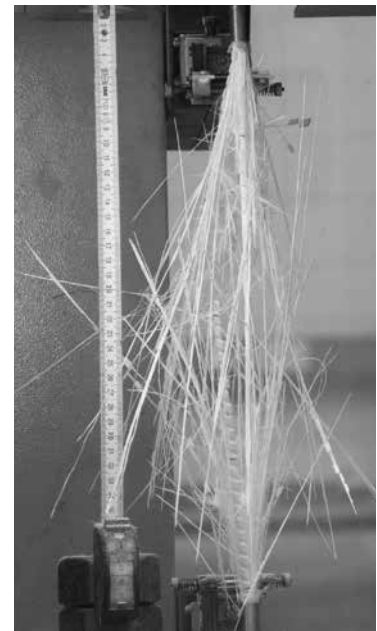


Diagramme contrainte-déformation



Barre déchiquetée

La rupture est fragile. Elle se produit dans la portion libre de l'échantillon test, quand la résistance à la traction du matériau est dépassée. Les fibres de la zone de rupture s'ouvrent à l'image d'une brosse. Les extrémités extérieures des barres, où l'échantillon est fixé dans une attache hydraulique, ne sont pas endommagées.

Par contraste avec la rupture fragile de l'échantillon test, un élément structurel renforcé avec Combar® montre des signes distincts de rupture imminente (larges déformations et fissurations) bien avant d'atteindre la résistance ultime.

Ouverture de fissure

Pour déterminer l'ouverture de fissure, les tests de traction ont été effectués sur des éprouvettes en béton cylindriques (Schöck Combar® $\varnothing = 16$ mm; enrobage béton $c_v = 65$ mm; ratio de renforcement $\rho = 1,1$ %, résistance du béton (cube) $f_{c,cube} = 30$ N/mm²). Les éprouvettes en béton ne contenaient aucun renforcement additionnel. Elles ont été chargées jusqu'à une contrainte de 900 MPa. Des fissures sont apparues dans l'échantillon une fois que la résistance à la traction du béton a été atteinte, avec un espacement d'environ 300 mm. La largeur des fissures a augmenté avec l'augmentation de la charge. Après avoir atteint la charge maximale, l'échantillon a été déchargé. Les fissures se sont refermées presque entièrement. Une analyse détaillée de l'échantillon a montré que les nervures en béton se sont détachées à proximité des fissures. Les nervures en béton étaient intactes entre les nervures des barres. Les barres n'ont montré aucun signe de dommage.

- Lorsque la résistance à la traction du béton est atteinte, des fissures apparaissent dans l'éprouvette avec un espacement d'environ 300 mm. La largeur des fissures s'accroît lorsque la charge est augmentée.
- Les autres tests non-renforcés sont chargés jusqu'à une contrainte de 900 N/mm².
- Les nervures en béton entièrement intactes sont visibles dans les sections médianes des fragments de l'éprouvette test. Les nervures en béton ont été détachées à proximité des fissures.
- La barre et ses nervures restent intactes.



Première fissure
(150 N/mm²)



Deuxième fissure
(300 N/mm²)



575 N/mm²



900 N/mm² contrainte
max.



Échantillon après
déchargement

Les résultats des tests de traction sur les éprouvettes en béton permettent d'obtenir les conclusions suivantes :

- Le comportement de fissuration avec Combar® est analogue à celui d'une armature en acier.
- Les distances entre les fissures voisines étaient généralement plus petites dans les éléments en béton renforcés avec Combar® que ceux avec le même ratio de renforcement en acier.

Ouverture de fissure

L'approche suivante peut être utilisée pour obtenir approximativement l'aire de la section requise d'armature Combar® anti-fissuration par rapport à la quantité requise d'armature en acier.

La largeur des fissures est proportionnelle au diamètre de l'armature, indépendamment du matériau de renforcement utilisé. Si un nombre plus important de barres de section inférieure est utilisé, les fissures seront réduites.

Comme c'est le cas pour une armature en acier, le glissement total des barres Combar® (test d'arrachement) est proportionnel au carré de la contrainte dans la barre. Si la contrainte est réduite de moitié, le glissement diminue de 25%.

Il peut être supposé de manière conservatrice que l'espacement des fissures est le même dans un élément renforcé avec Combar® que dans un élément renforcé avec des barres d'acier.

En partant de ces faits et suppositions, la relation entre la quantité requise de Combar® et la quantité requise d'armature en acier est :

$$\frac{W_{k, \text{Combar}}}{W_{k, \text{acier}}} = 1,0 = \frac{200.000 \text{ N/mm}^2}{60.000 \text{ N/mm}^2} \cdot \left[\frac{\phi_{\text{Combar}}}{\phi_{\text{acier}}} \right] \cdot \left[\frac{f_{\text{Combar}}}{f_{\text{acier}}} \right]^2$$

Ainsi, pour des diamètres de barres identiques :

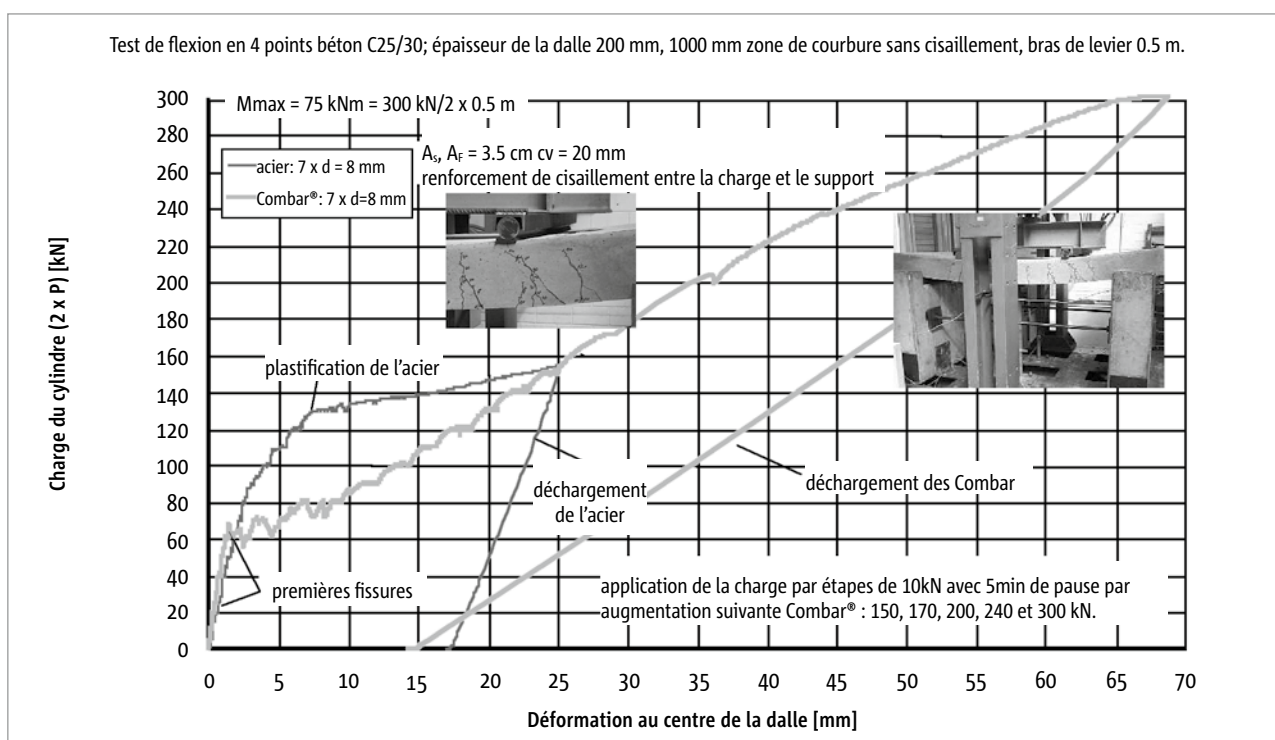
$$\text{req. } A_{\text{Combar}} = \sqrt{\frac{200.000}{60.000}} A_{\text{acier}} = 1,83 A_{\text{acier}}$$

Déformation

Déformation

Le module d'élasticité du Combar® est faible comparé à celui de l'acier. Par conséquent, une attention particulière doit être portée à la vérification des exigences de limite d'utilisation.

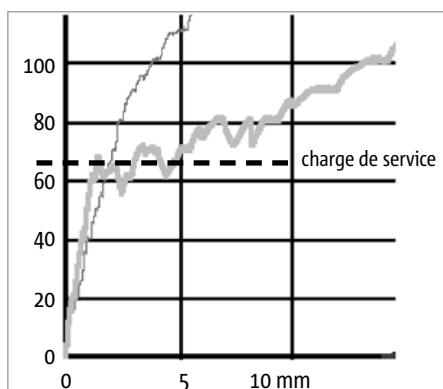
Deux dalles béton de dimensions identiques (2500 x 1000 x 200 mm), ont été testées dans un dispositif de flexion en 4 points (zone de pliage sans cisaillement : 1000 mm). La dalle 1 était renforcée avec 7 barres d'acier diamètre 8 mm (classe 500), la dalle 2 avec 7 barres Combar® diamètre 8 mm.



Test de flexion en 4 points, comparaison Combar® - acier

La charge maximale soutenue par la dalle renforcée avec Combar® était plus de deux fois plus importante que la charge soutenue par la dalle renforcée avec de l'acier. La déformation maximum était approximativement trois fois supérieure.

Peu de temps après la formation des premières fissures, la déformation des deux dalles était quasiment identique. Une fois la charge de service atteinte dans la barre de renfort (environ 305 MPa; 67 kN de charge au cylindre), la déformation de la dalle renforcée avec Combar® était environ 2,5 fois plus importante. A 90 % de cette contrainte (60 kN de charge au cylindre), la différence de déformation était entre 1,5 et 2,0.



Extrait test de flexion en 4 points

Conclusions

- Dans tous les dimensionnements d'éléments béton renforcés par GFRP, une attention particulière doit être portée à la vérification des déformations limites imposées.
- Afin d'atteindre la même déformation au sein d'un élément en béton fissuré renforcé avec Combar® par rapport à un renforcement géométriquement identique en acier, la section d'armature doit être nettement augmentée.

Comportement thermique

Coefficient de dilatation thermique

Le coefficient axial et radial de dilatation thermique a été déterminé sur des échantillons tests à des températures allant de 0°C à 70°C.

| Coefficient de dilatation thermique α | Schöck Combar® |
|--|----------------------|
| axial [1/K] | 0.6×10^{-5} |
| radial [1/K] | 2.2×10^{-5} |

A titre de comparaison : le coefficient de dilatation thermique du béton se situe entre $0,5$ et $1,2 \times 10^{-5}$ 1/K, celle de l'acier $1,0 \times 10^{-5}$ 1/K et celui de l'acier inoxydable à $1,7 \times 10^{-5}$ 1/K.

Les éléments structurels renforcés avec Schöck Combar® ne sont pas affectés par les changements de température. La fissuration expansive n'a pas eu lieu dans les essais en laboratoire, même quand les barres de renforcement Combar® étaient placées à proximité de la surface de l'échantillon et avec des variations du niveau d'humidité au fil du temps. Ce phénomène peut être expliqué par le faible module d'élasticité des armatures en fibres de verre perpendiculaire à l'axe de la barre. Il est contrôlé par le module de la résine, qui est compris entre 3000 et 5000 MPa.

Températures ambiantes

La température ambiante des barres Combar® dans un élément béton ne devrait pas excéder une valeur constante de 40°C. Sauf indication contraire, toutes les valeurs techniques dans les fiches de données produit ont été déterminées à température ambiante. Des températures supérieures pourraient survenir durant le durcissement d'éléments massifs en béton. Des valeurs de température allant jusqu'à 65°C dans les façades, les balcons ou d'autres éléments minces ne causent pas de dommage aux barres Combar®. Il n'a pas été observée de réduction de la capacité portante.

Si les barres Combar® venaient à être exposées de façon permanente à des températures élevées, la valeur caractéristique de la résistance à la traction doit être réduite selon le concept de durabilité décrit page 16 et 17. Les ingénieurs Schöck sont disponibles pour une consultation approfondie.

Comportement à basse température

Le comportement de Combar® a été testé à des températures extrêmement faibles (jusqu'à -40°C) dans des séries de tests divers au Canada selon les spécifications ISIS / CSA S807. Il a été montré que les propriétés matérielles du Combar® restent presque inchangées à des températures extrêmement faibles.

Différente expansion du renforcement et du béton

Dans certaines situations critiques, les effets augmentent car le coefficient réel de dilatation thermique du béton n'est pas le même que celui ayant été pris en compte pour le renforcement. Les contraintes résultantes dans le renforcement dues à une augmentation de la température de l'élément béton renforcé par 10°C, sont exposées en N/mm² dans le tableau ci-dessous.

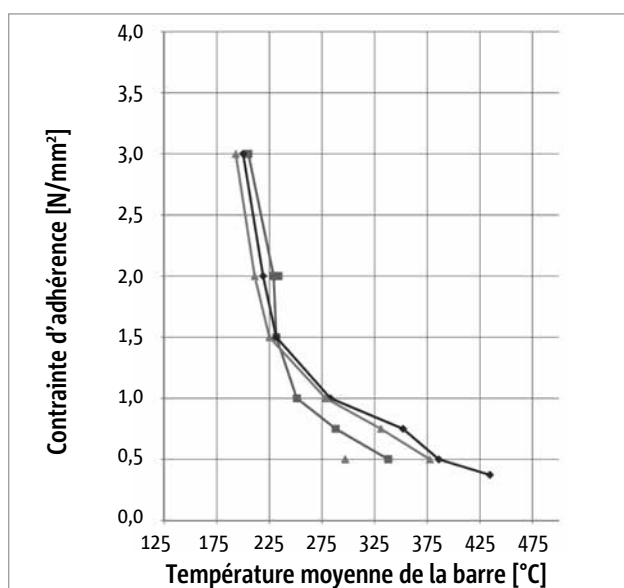
| Renforcement (module en GPa) | | Béton (en fonction de sa formulation) | | |
|------------------------------|--------------------|---------------------------------------|------------------------|-------------------------|
| | | $\alpha = 8$ | $\alpha = 10$ | $\alpha = 12$ |
| Acier classique (E=200): | $\alpha_{II} = 10$ | 4 N/mm ² | 0 N/mm ² | -4 N/mm ² |
| Combar® (E=60): | $\alpha_{II} = 6$ | -1,2 N/mm ² | -2,4 N/mm ² | -3,6 N/mm ² |
| Acier inoxydable (E=160): | $\alpha_{II} = 17$ | 14,4 N/mm ² | 11,2 N/mm ² | 8 N/mm ² |
| CFRP (E=120): | $\alpha_{II} = 0$ | -9,6 N/mm ² | -12 N/mm ² | -14,4 N/mm ² |

Contraintes résultantes dans le renforcement dues à l'augmentation de 10°C des coefficients de dilatation thermique [in 10^{-6} 1/K] contraintes de traction négatives !

Résistance au feu

La résistance au feu des matériaux composites à fibre est régie par le comportement des fibres et de la résine. Lors d'une exposition à une flamme nue, une barre Combar® peut prendre feu. La barre s'arrêtera de brûler après une courte période de temps lorsque le matériau inflammable a brûlé à sa surface. Combar® ne contient aucun agents ignifugeants.

La résistance à la traction de la barre est contrôlée par la résistance des fibres qui commencent à ramollir, c-à-d fondre, autour de 600°C. La matrice fournit l'adhérence entre la barre et le béton. La matrice ramollit avec l'augmentation de la température, perdant ainsi sa force d'adhérence. Comme ce comportement diffère des renforcements en acier, il est recommandé de limiter la température de la barre en fonction de la contrainte d'adhérence dans le cas de charge «feu». Les températures critiques pour cette procédure ont été déterminées à l'IBMB Braunschweig en Allemagne. Ces températures critiques varient légèrement entre les différents diamètres et sont les températures de défaillance. Par conséquent, le facteur de sécurité matériel est 1,0.



La contrainte d'adhérence en fonction de la température moyenne

Quand la résistance au feu est un problème, des mesures doivent être prises pour s'assurer que la température de surface des barres n'est pas dépassée dans une période de temps spécifique. La température de surface de la barre peut être prise comme la température du béton à la ligne centrale de la barre.

| Résistance à la traction (conception à froid) f_{fb} [N/mm ²] | Température critique t [°C] |
|---|-------------------------------------|
| 3,0 | 192 |
| 2,5 | 202 |
| 2,0 | 211 |
| 1,5 | 225 |
| 1,0 | 238 |
| 0,5 | 336 |

Pour différents classements au feu, chacune des valeurs minimales d'enrobage béton listées ci-dessous doivent être appliquées ou bien d'autres mesures de protection au feu (comme le recouvrement en fibrociment) doivent être entreprises pour assurer la sécurité d'adhérence.

| Classement au feu | Enrobage béton (min.) c [mm] |
|-------------------|--------------------------------------|
| R30 | 30 |
| R60 | 50 |
| R90 | 65 |
| R120 | 85 |

Concept de dimensionnement

1. Charges et forces internes

Les charges sont déterminées conformément à l'EC 1 et l'EC 2, ou les codes nationaux en vigueur.

2. Forces internes

Les barres Combar® ont un comportement linéaire élastique jusqu'à rupture. Il n'y a pas de plastification observée. Il n'y a pas de formation d'articulations plastique. Par conséquent, les charges sur les éléments béton renforcés par GFRP ne peuvent pas être déterminées en utilisant une analyse plastique.

La redistribution des moments ne doit pas être prise en compte dans le dimensionnement.

Pour des raisons de sécurité, les propriétés matérielles non-linéaires ne devraient pas être prises en compte dans le dimensionnement. Elles peuvent être considérées dans l'analyse des éléments et dans la détermination des déformations.

3. Format du dimensionnement

Dans le dimensionnement, il doit être vérifié que

$$E_d \leq R_d \quad \text{où } E_d \text{ sont les charges de conception et } R_d \text{ est la résistance de conception.}$$

Le facteur de sécurité matériel pour Combar® est : $\gamma_f = 1.3$

4. Propriétés des matériaux béton

Merci de vous référer à l'EC 2 ou aux codes nationaux en vigueur.

5. Propriétés des matériaux Combar®

Les propriétés matérielles des barres Combar® sont listées sur les pages 6 et 7 (barres droites), 8 et 9 (barres pliées), 10 et 11 (barres avec têtes d'extrémités), 12 (goujons).

6. Conditions d'expositions et enrobage béton

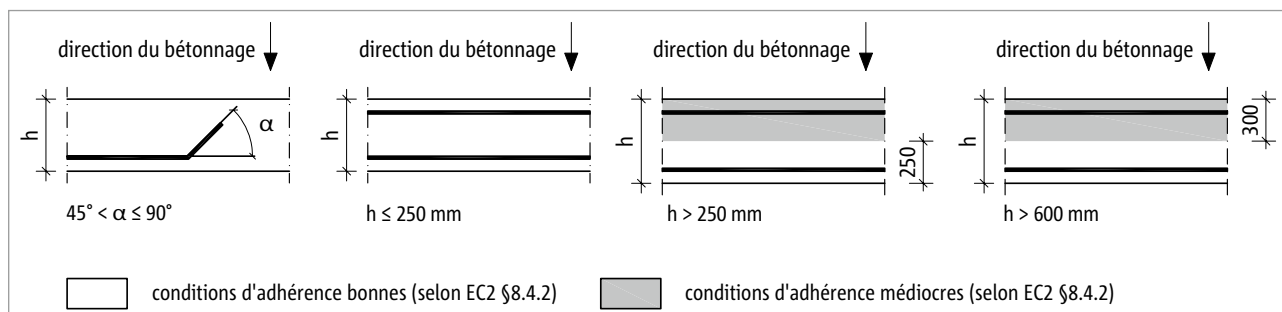
Les conditions d'exposition listées dans l'EC 2 ou les codes nationaux en vigueur, s'appliquent au béton sans changements.

Les barres Combar® ne se corrodent pas. Pour toutes les conditions d'exposition, l'enrobage minimum de béton est par conséquent :

$$c_{nom} = d_f + \Delta c \quad \text{où } \Delta c = 10 \text{ mm coulé sur place, } 5 \text{ mm pré-fabriqués}$$

7. Propriétés d'adhérence

Propriétés d'adhérence



Valeurs d'adhérence selon l'approbation allemande (AbZ Z-1.6-238)

| | C12/15 | C16/20 | C20/25 | C25/30 | C30/37 | C35/45 | C40/50 | C45/55 | C50/60 |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| conditions d'adhérence bonnes | 1.45 | 1.77 | 2.03 | 2.26 | 2.33 | 2.39 | 2.45 | 2.51 | 2.58 |
| conditions d'adhérence médiocres | 1.09 | 1.32 | 1.53 | 1.78 | 2.01 | 2.23 | 2.34 | 2.46 | 2.58 |

Concept de dimensionnement

8. Allongement des barres

Les longueurs d'allongement des barres droites Combar® doivent être déterminées selon l'EC 2 ou les codes nationaux en vigueur en utilisant les valeurs de conception de contrainte d'adhérence listées en section 7.

La longueur d'allongement des barres droites peut être réduite en installant une barre avec têtes d'extrémité. Les têtes d'extrémité Combar® transfèrent la charge conformément au tableau visible à la page 10.

9. Recouvrements des barres

Les recouvrements des barres Combar® sont calculées comme pour les armatures en acier conventionnelles.

10. Dimensionnement des courbures avec/sans charges normales

Le dimensionnement est réalisé par itération du plan de contrainte sous les mêmes hypothèses que celles utilisées pour le dimensionnement d'éléments en béton renforcés avec de l'acier. Les barres Combar® se comportent de façon linéairement élastique jusqu'à rupture.

La valeur caractéristique à long terme de la résistance à la traction est déterminée selon la procédure décrite dans les pages 17 et 18. Les valeurs d'échantillon pour des conditions typiques d'un environnement central Européen sont listées dans le tableau 3 (page 35). La recommandation pour un dimensionnement universel est de 445 N/mm², indépendamment des conditions environnementales (certification Allemande).

Un tableau de dimensionnement pour les combinaisons de M et N est fourni dans les pages 30 et 31 (Tableau 1). La valeur de dimensionnement de la résistance à la traction dans ce tableau est 435 N/mm², la même valeur que pour une armature en acier (selon l'EC 2).

11. Armature de cisaillement

11.1 Procédure de dimensionnement

a) Termes additionnels pour Combar® (en complément des termes de l'EC 2) :

$V_{Rd,fd}$ valeur de dimensionnement du renforcement au cisaillement des Combar®

b) Le ratio de renforcement minimum requis spécifié dans le paragraphe 9.3.2 (2) de l'EC 2 pour des poutres et des dalles unidirectionnelles avec $b/h < 5$ s'applique également pour Combar®.

c) Dans les sections où $V_{Ed} > V_{Rd,c}$ les étriers Combar® ou les barres à têtes doivent être utilisés comme armatures de cisaillement.

11.2 Valeurs de dimensionnement des forces de cisaillement

11.2.1 Éléments sans armature de cisaillement

a) L'équation 6.2.a de l'EC 2 est modifiée pour Combar® en :

$$V_{Rd,ct} \text{ soit } V_{Rd,c} = \frac{0,138}{\gamma_c} \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot \frac{E_f}{E_s} \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d$$

| | |
|-----------------------------|--|
| $\kappa = 1 + \sqrt{200/d}$ | facteur de taille |
| ρ_l | ratio de renforcement longitudinal |
| E_{fl} | module d'élasticité du renforcement longitudinal |
| f_{ck} | valeur caractéristique de résistance à la compression du béton |
| b_w | largeur de la poutre |
| d | profondeur structurelle |

b) L'équation 6.2 de l'EC 2 ne s'applique pas pour Combar®.

Concept de dimensionnement

11.2.2 Éléments avec armature de cisaillement

11.2.2.1 Procédure simplifiée

a) La contrainte dans les armatures de cisaillement Combar® est limitée à la même valeur que celle du renforcement en acier. $\epsilon_f = \epsilon_s = 435 \text{ N/mm}^2 / 200,000 \text{ N/mm}^2 = 0,2175 \%$. Cela assure que l'analogie du treillis selon l'EC 2 section 6.2.3 et figure 6.5 est applicable avec Combar®. Soit les étriers Combar® soit les tirants à double tête sont utilisés comme armatures de cisaillement. Les têtes d'extrémité sont sélectionnées pour une valeur de conception de résistance à la traction de $f_{tVd} = 130 \text{ N/mm}^2$. L'armature de cisaillement doit être ancrée dans la zone de compression du béton. L'enrobage de béton à l'extrémité des têtes (dans l'axe des barres) n'est pas requis, elles peuvent être placées directement sur le coffrage.

b) Lors de l'utilisation de barres à double tête Combar® comme armature de cisaillement, l'équation 6.9 de l'EC 2 permettant de déterminer la valeur de conception $V_{Rd,fd}$ est modifiée en :

$$V_{Rd,fd} = \frac{A_{fw}}{S_w} \cdot f_{Vd} \cdot z \cdot \cot \theta$$

11.2.2.2 Procédure exacte selon Kurth et Hegger

Dans l'article de presse "la résistance au cisaillement des éléments en béton avec un renforcement de composite en fibre polymère - dérivation de l'approche de dimensionnement" [Bauingenieur Band 88, Oktober 2013] de M. Kurth et J. Hegger, une procédure plus exacte et moins conservatrice a été développée pour déterminer la résistance au cisaillement des éléments en béton renforcés avec des barres Combar. Elle s'applique seulement aux sections contenant des armatures longitudinales ainsi qu'à celles contenant des armatures de cisaillement. Dans cette procédure, la capacité portante du béton et celle de l'armature de cisaillement sont sommées pour obtenir la capacité portante globale de la section.

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,f}$$

La capacité portante de l'armature de cisaillement est :

$$V_{Rd,f} = \alpha_{fw} \cdot f_{fd,w} \cdot z \cdot \cot(\theta)$$

où

| | |
|---------------|--|
| α_{fw} | aire de la section transversale de l'armature de cisaillement Combar® |
| $f_{fd,w}$ | valeur de dimensionnement de résistance à la traction de l'armature de cisaillement Combar® ($f_{fd,w} \leq E_{fw} \cdot \epsilon_{fd,w}$) |
| z | bras de levier interne |
| θ | inclinaison de l'entretoise en béton ($= \beta_1$) |

et

$$\epsilon_{fd,w} = 2,3 + \frac{2 \cdot EI^* [\text{MNm}^2]}{30} \leq 7,0 [\%]$$

$$EI^* = E_{f1} \cdot A_{f1} (0,8 \cdot d)^2$$

$$\theta = \arctan \left[\sqrt[3]{\frac{M/V \cdot a_{fw} \cdot E_{fw}}{A_{fl} \cdot E_{fl}}} \right] \left\{ \begin{array}{l} \geq 20^\circ \\ \leq 50^\circ \end{array} \right.$$

La valeur de conception de la résistance au cisaillement ne peut excéder la valeur maximale $V_{Rd,max}$.

$$V_{Rd,max} = V_{Rd,c} + \frac{1,1 \cdot b_w \cdot z \cdot f_{cm}^{2/3}}{\gamma_c \cdot (\cot(\theta) + \tan(\theta))}$$

Les modules d'élasticité corrects doivent être utilisés pour chaque type de renforcement selon que l'on utilise des barres droites Combar® avec ou sans têtes (60.000N/mm²) ou barres pliées (50.000 N/mm²).

La procédure de Kurth et Hegger peut être utilisée aussi pour des renforcements mixtes (par ex. barres longitudinales Combar®, étriers en acier).

Concept de dimensionnement

12. Déformations

Le module d'élasticité des barres Combar® est considérablement plus faible que celui des armatures en acier. Par conséquent, le comportement dans l'état limite de service est souvent plus critique dans la conception qu'il ne l'est pour les éléments en béton renforcés par acier. Les ratios de renforcement typiques requis pour limiter la déformation de la dalle de travée à $L/250$ sont fournis dans le Tableau 4 (page 36).

13. Contrôle de fissuration

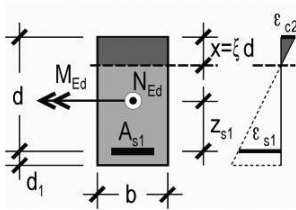
L'ouverture des fissures devrait être limitée à 0,7 mm (éléments intérieurs) et 0,5 mm (éléments extérieurs). Une note de calcul détaillée selon l'EC 2 doit être fournie en utilisant

$$S_{r,max} = \frac{d_f}{2.8 \cdot \text{eff} \rho_f} \leq \frac{\sigma_f d_f}{2.8 \cdot f_{ct,eff}}$$

Les renforcements requis de sections transversales, destinés à limiter la largeur des fissures à des valeurs spécifiques, peuvent être déterminés en utilisant le Graphique 1 (page 33).

Tableau 1 :
Table des valeurs de dimensionnement aux ELU

Informations complémentaires
sur www.schoeck.com/fr



$$M_{Ed1} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_{s1}$$

$$\mu_{Ed1} = M_{Ed1} / (b \cdot d^2 \cdot f_{cd})$$

$$\text{erf. } A_s = (\omega_1 \cdot b \cdot d \cdot f_{cd} + N_{Ed}) / f_{yd}$$

| μ_{Ed1} | ω_1 | ξ | ζ | ϵ_2 ‰ | ϵ_{s1} ‰ | f_{yd} N/mm ² | μ_{Ed1} |
|-------------|------------|-------|---------|----------------|-------------------|----------------------------|-------------|
| 0.001 | 0.001 | 0.017 | 0.994 | -0.123 | 7.250 | 435.000 | 0.001 |
| 0.002 | 0.002 | 0.024 | 0.992 | -0.175 | 7.250 | 435.000 | 0.002 |
| 0.003 | 0.003 | 0.029 | 0.990 | -0.217 | 7.250 | 435.000 | 0.003 |
| 0.004 | 0.004 | 0.034 | 0.989 | -0.252 | 7.250 | 435.000 | 0.004 |
| 0.005 | 0.005 | 0.038 | 0.987 | -0.283 | 7.250 | 435.000 | 0.005 |
| 0.006 | 0.006 | 0.041 | 0.986 | -0.311 | 7.250 | 435.000 | 0.006 |
| 0.007 | 0.007 | 0.045 | 0.985 | -0.338 | 7.250 | 435.000 | 0.007 |
| 0.008 | 0.008 | 0.048 | 0.984 | -0.363 | 7.250 | 435.000 | 0.008 |
| 0.009 | 0.009 | 0.051 | 0.983 | -0.387 | 7.250 | 435.000 | 0.009 |
| 0.010 | 0.010 | 0.053 | 0.982 | -0.409 | 7.250 | 435.000 | 0.010 |
| 0.011 | 0.011 | 0.056 | 0.981 | -0.431 | 7.250 | 435.000 | 0.011 |
| 0.012 | 0.012 | 0.059 | 0.980 | -0.452 | 7.250 | 435.000 | 0.012 |
| 0.013 | 0.013 | 0.061 | 0.979 | -0.472 | 7.250 | 435.000 | 0.013 |
| 0.014 | 0.014 | 0.063 | 0.978 | -0.491 | 7.250 | 435.000 | 0.014 |
| 0.015 | 0.015 | 0.066 | 0.978 | -0.510 | 7.250 | 435.000 | 0.015 |
| 0.016 | 0.016 | 0.068 | 0.977 | -0.529 | 7.250 | 435.000 | 0.016 |
| 0.017 | 0.017 | 0.070 | 0.976 | -0.547 | 7.250 | 435.000 | 0.017 |
| 0.018 | 0.018 | 0.072 | 0.975 | -0.564 | 7.250 | 435.000 | 0.018 |
| 0.019 | 0.020 | 0.074 | 0.975 | -0.582 | 7.250 | 435.000 | 0.019 |
| 0.020 | 0.021 | 0.076 | 0.974 | -0.598 | 7.250 | 435.000 | 0.020 |
| 0,025 | 0.026 | 0.086 | 0.971 | -0.679 | 7.250 | 435.000 | 0.025 |
| 0,030 | 0.031 | 0.094 | 0.967 | -0.753 | 7.250 | 435.000 | 0.030 |
| 0,035 | 0.036 | 0.102 | 0.965 | -0.824 | 7.250 | 435.000 | 0.035 |
| 0,040 | 0.042 | 0.110 | 0.962 | -0.892 | 7.250 | 435.000 | 0.040 |
| 0,045 | 0.047 | 0.117 | 0.959 | -0.957 | 7.250 | 435.000 | 0.045 |
| 0.050 | 0.052 | 0.123 | 0.957 | -1.021 | 7.250 | 435.000 | 0.050 |
| 0.055 | 0.058 | 0.130 | 0.954 | -1.083 | 7.250 | 435.000 | 0.055 |
| 0.060 | 0.063 | 0.136 | 0.952 | -1.143 | 7.250 | 435.000 | 0.060 |
| 0.065 | 0.068 | 0.142 | 0.950 | -1.203 | 7.250 | 435.000 | 0.065 |
| 0.070 | 0.074 | 0.148 | 0.947 | -1.262 | 7.250 | 435.000 | 0.070 |
| 0.075 | 0.079 | 0.154 | 0.945 | -1.321 | 7.250 | 435.000 | 0.075 |
| 0.080 | 0.085 | 0.160 | 0.943 | -1.379 | 7.250 | 435.000 | 0.080 |
| 0.085 | 0.090 | 0.165 | 0.941 | -1.437 | 7.250 | 435.000 | 0.085 |
| 0.090 | 0.096 | 0.171 | 0.938 | -1.495 | 7.250 | 435.000 | 0.090 |
| 0.095 | 0.101 | 0.176 | 0.936 | -1.552 | 7.250 | 435.000 | 0.095 |
| 0.100 | 0.107 | 0.182 | 0.934 | -1.610 | 7.250 | 435.000 | 0.100 |
| 0.105 | 0.113 | 0.187 | 0.932 | -1.669 | 7.250 | 435.000 | 0.105 |
| 0.110 | 0.118 | 0.192 | 0.929 | -1.727 | 7.250 | 435.000 | 0.110 |

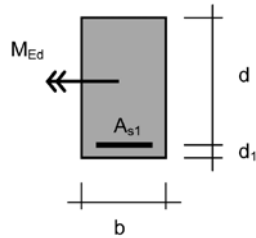
Tableau 1 (suite)

Informations complémentaires
sur www.schoeck.com/fr

| μ_{Ed1} | ω_1 | ξ | ζ | $\epsilon_{t2} \text{‰}$ | $\epsilon_{t1} \text{‰}$ | $f_{yd} \text{ N/mm}^2$ | μ_{Ed1} |
|-------------|------------|-------|---------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------|
| 0.115 | 0.124 | 0.198 | 0.927 | -1.787 | 7.250 | 435.000 | 0.115 |
| 0.120 | 0.130 | 0.203 | 0.925 | -1.847 | 7.250 | 435.000 | 0.120 |
| 0.125 | 0.136 | 0.208 | 0.922 | -1.908 | 7.250 | 435.000 | 0.125 |
| 0.130 | 0.141 | 0.214 | 0.920 | -1.969 | 7.250 | 435.000 | 0.130 |
| 0.135 | 0.147 | 0.219 | 0.918 | -2.032 | 7.250 | 435.000 | 0.135 |
| 0.140 | 0.153 | 0.224 | 0.915 | -2.096 | 7.250 | 435.000 | 0.140 |
| 0.145 | 0.159 | 0.230 | 0.913 | -2.162 | 7.250 | 435.000 | 0.145 |
| 0.150 | 0.165 | 0.235 | 0.910 | -2.229 | 7.250 | 435.000 | 0.150 |
| 0.160 | 0.177 | 0.246 | 0.905 | -2.367 | 7.250 | 435.000 | 0.160 |
| 0.170 | 0.189 | 0.257 | 0.899 | -2.512 | 7.250 | 435.000 | 0.170 |
| 0.180 | 0.201 | 0.269 | 0.894 | -2.663 | 7.250 | 435.000 | 0.180 |
| 0.190 | 0.214 | 0.280 | 0.888 | -2.822 | 7.250 | 435.000 | 0.190 |
| 0.200 | 0.227 | 0.292 | 0.882 | -2.989 | 7.250 | 435.000 | 0.200 |
| 0.210 | 0.240 | 0.304 | 0.876 | -3.164 | 7.250 | 435.000 | 0.210 |
| 0.220 | 0.253 | 0.316 | 0.870 | -3.348 | 7.250 | 435.000 | 0.220 |
| 0.228 | 0.264 | 0.326 | 0.865 | -3.500 | 7.250 | 435.000 | 0.228 |
| 0.240 | 0.280 | 0.346 | 0.856 | -3.500 | 6.605 | 396.000 | 0.240 |
| 0.250 | 0.295 | 0.364 | 0.849 | -3.500 | 6.118 | 367.000 | 0.250 |
| 0.260 | 0.309 | 0.382 | 0.841 | -3.500 | 5.666 | 340.000 | 0.260 |
| 0.270 | 0.324 | 0.400 | 0.834 | -3.500 | 5.247 | 315.000 | 0.270 |
| 0.280 | 0.339 | 0.419 | 0.826 | -3.500 | 4.856 | 291.000 | 0.280 |
| 0.290 | 0.355 | 0.438 | 0.818 | -3.500 | 4.490 | 269.000 | 0.290 |
| 0.300 | 0.371 | 0.458 | 0.810 | -3.500 | 4.146 | 249.000 | 0.300 |
| 0.310 | 0.387 | 0.478 | 0.801 | -3.500 | 3.823 | 229.000 | 0.310 |
| 0.320 | 0.404 | 0.499 | 0.793 | -3.500 | 3.517 | 211.000 | 0.320 |
| 0.330 | 0.421 | 0.520 | 0.784 | -3.500 | 3.228 | 194.000 | 0.330 |
| 0.340 | 0.439 | 0.542 | 0.774 | -3.500 | 2.953 | 177.000 | 0.340 |
| 0.350 | 0.458 | 0.565 | 0.765 | -3.500 | 2.692 | 162.000 | 0.350 |
| 0.360 | 0.477 | 0.589 | 0.755 | -3.500 | 2.442 | 147.000 | 0.360 |
| 0.370 | 0.497 | 0.614 | 0.745 | -3.500 | 2.203 | 132.000 | 0.370 |
| 0.380 | 0.518 | 0.640 | 0.734 | -3.500 | 1.973 | 118.000 | 0.380 |
| 0.390 | 0.540 | 0.667 | 0.723 | -3.500 | 1.751 | 105.000 | 0.390 |
| 0.400 | 0.563 | 0.695 | 0.711 | -3.500 | 1.535 | 92.000 | 0.400 |

Tableau 2 : Renforcement pour nuances de béton spécifiques (C25/30)

Informations complémentaires
sur www.schoeck.com/fr



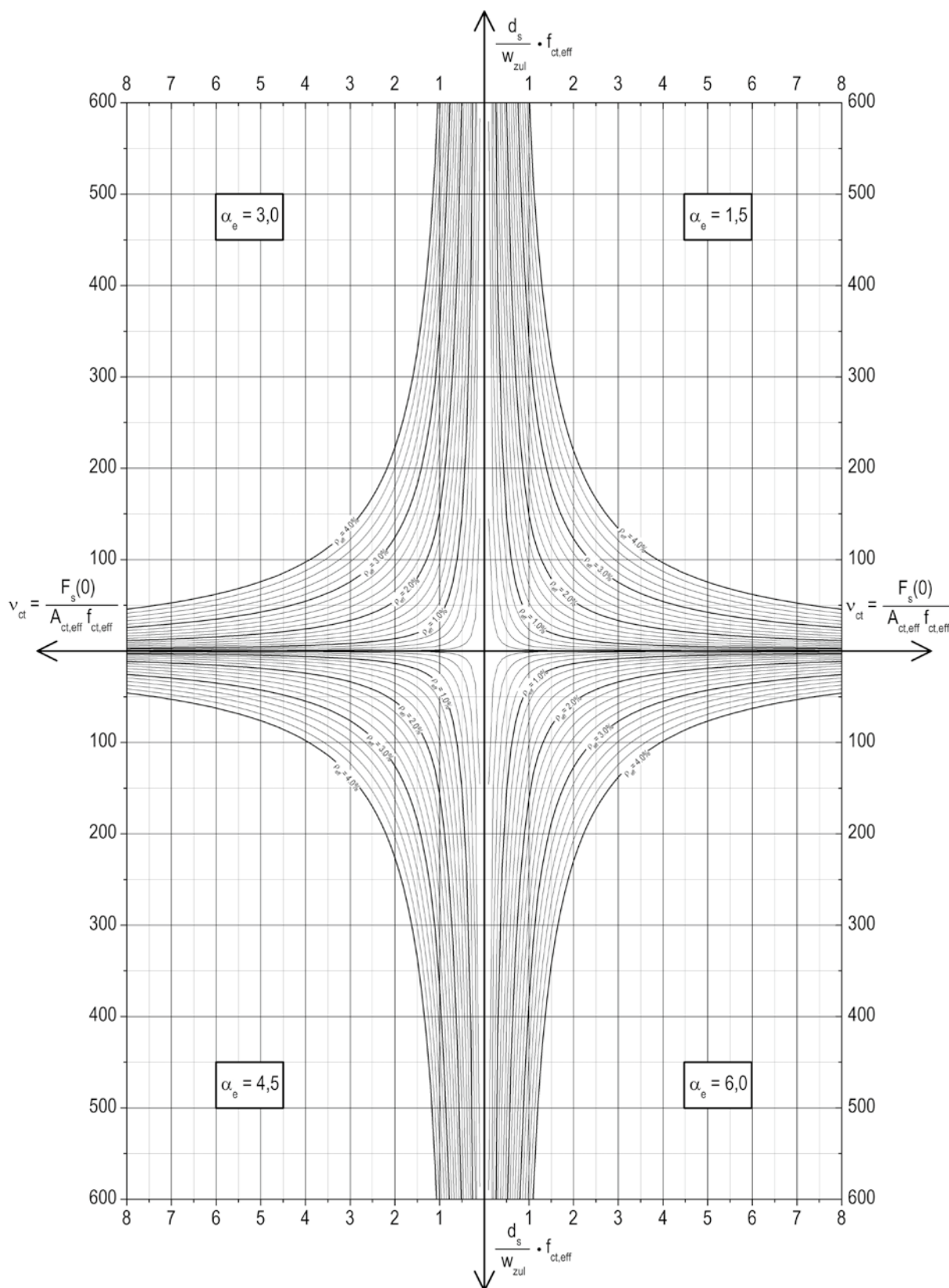
$$\mu_{Ek} = \frac{M_{Ed}}{bd^2 f_{ck}} \quad \frac{d_1/d}{d_s/w_k} \Rightarrow A_{s1} = p_1 \cdot bd$$

C25 - 100ρ₁

| d_1/d | 0.10 | | | | 0.15 | | | | 0.20 | | | |
|---------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | d_s/w_{zul} μ_{Ek} | 20 | 40 | 60 | 80 | 20 | 40 | 60 | 80 | 20 | 40 | 60 |
| 0.010 | 0.118 | 0.168 | 0.206 | 0.239 | 0.118 | 0.168 | 0.206 | 0.239 | 0.118 | 0.168 | 0.206 | 0.239 |
| 0.012 | 0.142 | 0.202 | 0.248 | 0.288 | 0.142 | 0.202 | 0.248 | 0.288 | 0.142 | 0.202 | 0.248 | 0.288 |
| 0.014 | 0.166 | 0.237 | 0.291 | 0.337 | 0.166 | 0.237 | 0.291 | 0.337 | 0.166 | 0.237 | 0.291 | 0.337 |
| 0.016 | 0.191 | 0.271 | 0.333 | 0.386 | 0.191 | 0.271 | 0.333 | 0.386 | 0.191 | 0.271 | 0.333 | 0.386 |
| 0.018 | 0.215 | 0.305 | 0.376 | 0.435 | 0.215 | 0.305 | 0.376 | 0.435 | 0.215 | 0.305 | 0.376 | 0.435 |
| 0.020 | 0.239 | 0.340 | 0.418 | 0.484 | 0.239 | 0.340 | 0.418 | 0.484 | 0.239 | 0.340 | 0.418 | 0.484 |
| 0.022 | 0.263 | 0.375 | 0.461 | 0.534 | 0.263 | 0.375 | 0.461 | 0.534 | 0.263 | 0.375 | 0.461 | 0.534 |
| 0.024 | 0.288 | 0.410 | 0.504 | 0.584 | 0.288 | 0.410 | 0.504 | 0.584 | 0.288 | 0.410 | 0.504 | 0.584 |
| 0.026 | 0.307 | 0.435 | 0.534 | 0.617 | 0.321 | 0.444 | 0.547 | 0.634 | 0.321 | 0.444 | 0.547 | 0.634 |
| 0.028 | 0.326 | 0.462 | 0.567 | 0.655 | 0.337 | 0.479 | 0.590 | 0.684 | 0.337 | 0.479 | 0.590 | 0.684 |
| 0.030 | 0.344 | 0.488 | 0.598 | 0.692 | 0.355 | 0.503 | 0.616 | 0.712 | 0.360 | 0.511 | 0.626 | 0.724 |
| 0.032 | 0.362 | 0.513 | 0.628 | 0.726 | 0.374 | 0.530 | 0.649 | 0.750 | 0.377 | 0.535 | 0.655 | 0.757 |
| 0.034 | 0.378 | 0.536 | 0.657 | 0.759 | 0.392 | 0.555 | 0.681 | 0.786 | 0.396 | 0.561 | 0.688 | 0.795 |
| 0.036 | | 0.558 | 0.685 | 0.791 | 0.409 | 0.580 | 0.711 | 0.821 | 0.414 | 0.587 | 0.719 | 0.831 |
| 0.038 | | 0.580 | 0.711 | 0.822 | | 0.604 | 0.740 | 0.855 | | 0.611 | 0.749 | 0.865 |
| 0.040 | | 0.601 | 0.737 | 0.851 | | 0.626 | 0.768 | 0.887 | | 0.634 | 0.778 | 0.899 |
| 0.042 | | 0.621 | 0.761 | 0.880 | | 0.648 | 0.795 | 0.918 | | 0.657 | 0.806 | 0.931 |
| 0.044 | | 0.640 | 0.785 | 0.908 | | 0.669 | 0.821 | 0.948 | | 0.679 | 0.832 | 0.962 |
| 0.046 | | | 0.809 | 0.935 | | | 0.846 | 0.977 | | 0.700 | 0.858 | 0.992 |
| 0.048 | | | 0.831 | 0.961 | | | 0.870 | 1.006 | | | 0.884 | 1.021 |
| 0.050 | | | 0.853 | 0.987 | | | 0.894 | 1.033 | | | 0.908 | 1.050 |
| 0.052 | | | | 1.012 | | | | 1.060 | | | 0.932 | 1.077 |
| 0.054 | | | | 1.036 | | | | 1.086 | | | | 1.104 |
| 0.056 | | | | | | | | | | | | 1.131 |

Graphique 1 : Renforcement minimum pour une valeur donnée de w_{zul}

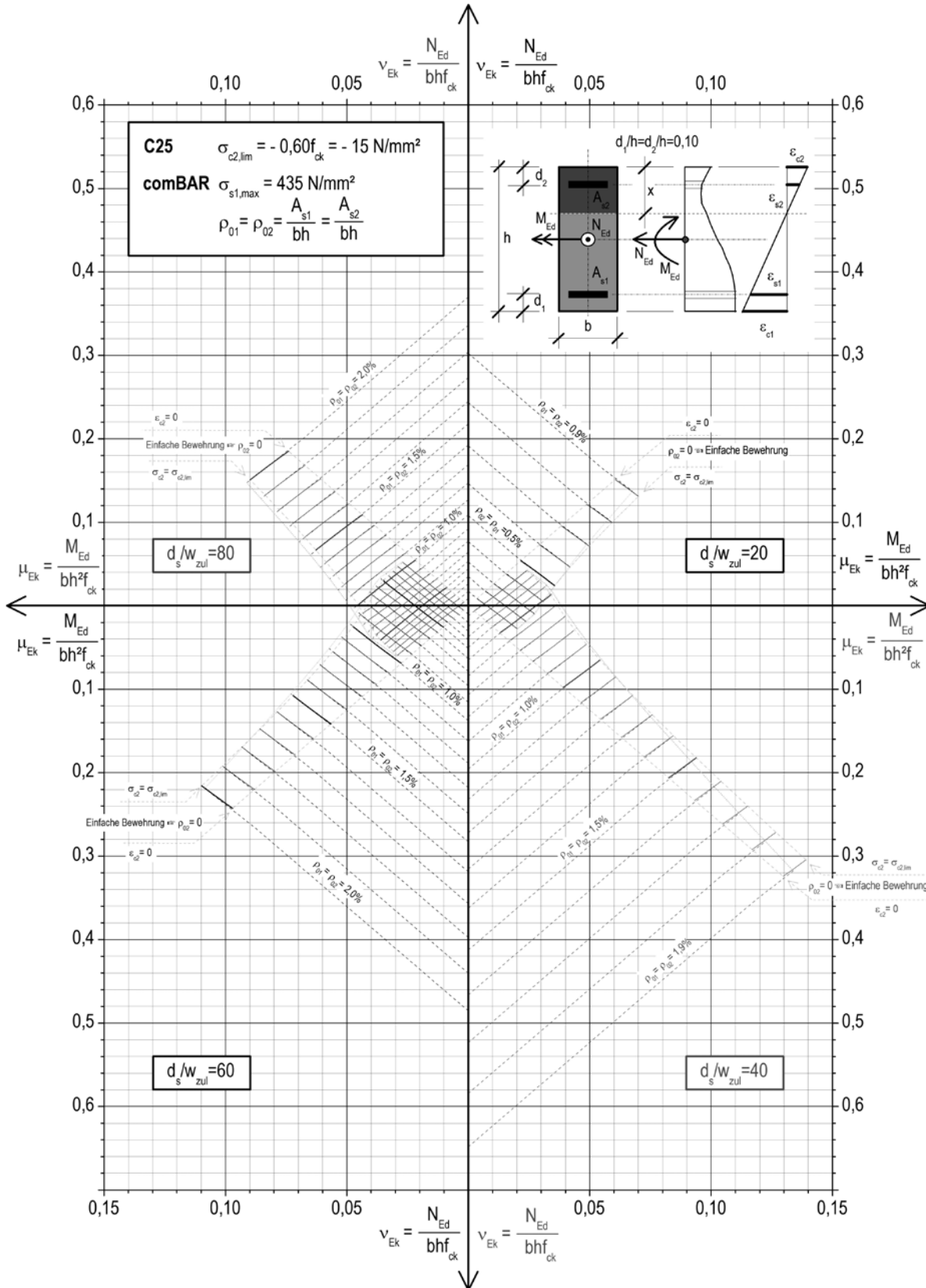
Informations complémentaires
sur www.schoeck.com/fr



Graphique 1 : Renforcement minimum pour une valeur donnée de w_{zul} horizontal

Graphique 2 : Renforcement anti-fissuration pour $M_{Ed} + N_{Ed}$ (C 25/30; $d/h = 0,10$)

Informations complémentaires
sur www.schoeck.com/fr



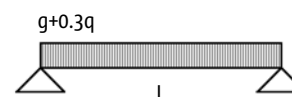
Graphique 2 : Renforcement anti-fissuration pour $M_{Ed} + N_{Ed}$; C 25/30; $d/h = 0,10$

Tableau 3 : Renforcement requis pour une déformation de L/250


Informations complémentaires
sur www.schoeck.com/fr

Dalle de travée simple avec charge uniforme

Largeur de dalle : 1m
Béton : C25/30
Charge d'exploitation (q) : 3.5 kN/m²
Combinaison quasi-permanente : poids mort (g) + 0.3 x charge d'exploitation



| L[m] L/250 [mm] | A [mm ²] contrainte de traction [MPa] | | | | |
|--------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | h [mm] | | | | |
| | 160 | 180 | 200 | 250 | 300 |
| 3.5 m 14 mm | 630 mm ² 205 MPa | 210 mm ² | 230 mm ² | 280 mm ² | 330 mm ² |
| 4.0 m 16 mm | 1630 mm ² 107 MPa | 1150 mm ² 138 MPa | 660 mm ² 227 MPa | 280 mm ² | 330 mm ² |
| 4.5 m 18 mm | 2320 mm ² 89 MPa | 1700 mm ² 120 MPa | 1300 mm ² 147 MPa | 620 mm ² 271 MPa | 330 mm ² |
| 5.0 m 20 mm | | 2810 mm ² 89 MPa | 2140 mm ² 111 MPa | 1230 mm ² 169 MPa | 670 mm ² 285 MPa |
| 5.5 m 22 mm | | | 3260 mm ² 89 MPa | 2150 mm ² 120 MPa | 1400 mm ² 169 MPa |
| 6.0 m 24 mm | | | | 3520 mm ² 85 MPa | 2320 mm ² 120 MPa |

 renforcement min. selon la certification Allemande; enrobage béton = 15 mm; $d_{\text{barre}} = 12$ mm


 ratio de ferrailage > 2% (pas économique)

Tableau 4.a : Courbe d'élasticité des barres Combar®

Informations complémentaires
sur www.schoeck.com/fr

Les barres Combar® peuvent être pliées de façon élastique, par exemple pour créer des étriers circulaires pour pieux forés ou pour installer les barres dans la voûte d'un tunnel. Les barres pliées doivent être fixées dans leur position. Une fois que la force appliquée pour plier les barres est retirée, la barre retourne à sa forme initiale.

Plier les barres induit une contrainte de traction et de compression. La contrainte de traction totale de la barre pré-pliée et des charges additionnelles appliquées ne doivent pas excéder la contrainte de traction autorisée.

$$\varepsilon_{\text{pré-pliage}} = \frac{d_{f/2}}{R} \quad f_{\text{pré-pliage}} = \varepsilon_{\text{pré-pliage}} \cdot E_f$$

Tableau 4.a : Contraintes induites dans la barre par pré-pliage/Contrainte résiduelle pouvant être induite dans la barre par des charges additionnelles. Les diamètres de courbure minimums (à $f_{fd} = 445 \text{ N/mm}^2$) sont surlignés.

| Rayon de courbure | d = 8 mm | | d = 12 mm | | d = 16 mm | | d = 20 mm | | d = 25 mm | | d = 32 mm | | Rayon de courbure |
|-------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------|
| | $f_{\text{pré-pliage}}$ * | admis f_{charge} ** | $f_{\text{pré-pliage}}$ | admis f_{charge} | $f_{\text{pré-pliage}}$ | admis f_{charge} | $f_{\text{pré-pliage}}$ | admis f_{charge} | $f_{\text{pré-pliage}}$ | admis f_{charge} | $f_{\text{pré-pliage}}$ | admis f_{charge} | |
| 0.54 m | 445 | 0 | | | | | | | | | | | 0.54 m |
| 0.75 m | 320 | 125 | | | | | | | | | | | 0.75 m |
| 0.81 m | | | 445 | 0 | | | | | | | | | 0.81 m |
| 1.00 m | 240 | 205 | 360 | 85 | | | | | | | | | 1.00 m |
| 1.08 m | | | | | 445 | 0 | | | | | | | 1.08 m |
| 1.20 m | 200 | 245 | 300 | 145 | 400 | 45 | | | | | | | 1.20 m |
| 1.35 m | | | | | | | 445 | 0 | | | | | 1.35 m |
| 1.50 m | 160 | 285 | 240 | 205 | 320 | 125 | 400 | 45 | | | | | 1.50 m |
| 1.69 m | | | | | | | | | 445 | 0 | | | 1.69 m |
| 2.00 m | 120 | 325 | 180 | 265 | 240 | 205 | 300 | 145 | 375 | 70 | | | 2.00 m |
| 2.16 m | | | | | | | | | | | 445 | 0 | 2.16 m |
| 3.00 m | 80 | 365 | 120 | 325 | 160 | 285 | 200 | 245 | 250 | 195 | 320 | 125 | 3.00 m |
| 5.00 m | 48 | 397 | 72 | 373 | 96 | 349 | 120 | 325 | 150 | 295 | 192 | 253 | 5.00 m |
| 7.50 m | 32 | 413 | 48 | 397 | 64 | 381 | 80 | 365 | 100 | 345 | 128 | 317 | 7.50 m |
| 10.00 m | 24 | 421 | 36 | 409 | 48 | 397 | 60 | 385 | 75 | 370 | 96 | 349 | 10.00 m |
| 15.00 m | 16 | 429 | 24 | 421 | 32 | 413 | 40 | 405 | 50 | 395 | 64 | 381 | 15.00 m |
| 20.00 m | 12 | 433 | 18 | 427 | 24 | 421 | 30 | 415 | 38 | 408 | 48 | 397 | 20.00 m |
| 25.00 m | 10 | 435 | 14 | 431 | 19 | 426 | 24 | 421 | 30 | 415 | 38 | 407 | 25.00 m |
| 30.00 m | 8 | 437 | 12 | 433 | 16 | 429 | 20 | 425 | 25 | 420 | 32 | 413 | 30.00 m |

interpolation des valeurs intermédiaires

* $f_{\text{pré-pliage}}$ = contrainte due au pré-pliage

** admis f_{charge} = contrainte additionnelle admissible due à la charge

Tableau 4.b : Déformation élastique des barres Combar®

Informations complémentaires
sur www.schoeck.com/fr

La force requise pour plier les barres Combar® peut être déterminée en utilisant les lois de la mécanique technique. Pour les barres appuyées aux deux extrémités (portée unique), les forces requises pour plier les barres dans un rayon spécifique sont exposées dans le Tableau 4.b.

$$P = \frac{48EI\delta}{s^3} \quad \text{avec} \quad I = \frac{r^4 \pi}{4}$$

$$s = 2R \quad \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$h = 0,5s \quad \tan \frac{\alpha}{4}$$

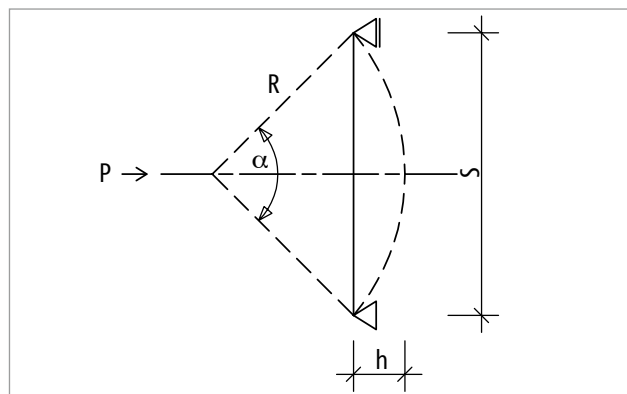


Tableau 4.b : Forces (exemples) requises pour plier les barres Combar® dans un rayon spécifique. Les rayons de courbure minimums sont mis en évidence ci-dessous.

| Diamètre barre (mm) | R [m] | s [m] | α [RAD] | h [mm] | P[N] |
|---------------------|-------|-------|----------------|--------|------|
| ∅ 8 | 0.54 | 1.00 | 2.37 | 337 | 195 |
| ∅ 12 | 0.81 | 1.50 | 2.37 | 506 | 439 |
| ∅ 16 | 1.08 | 2.00 | 2.37 | 674 | 781 |
| ∅ 20 | 1.50 | 2.00 | 1.46 | 382 | 1080 |
| ∅ 25 | 2.50 | 3.00 | 1.29 | 500 | 1023 |
| ∅ 32 | 6.00 | 3.00 | 0.51 | 191 | 1046 |

Mention légales

Imprimé par :
Schöck France SARL
6 rue Icare
67960 Entzheim
Tél. : +33 3 88 20 92 28
Email : etudes-fr@schoeck.com

Copyright :
© 2022, Schöck France SARL
Le contenu de cette brochure ne doit en aucun cas, même partiellement, être transmis à des tiers sans l'accord écrit de Schöck France SARL. Toutes les données techniques, les désignations, etc., sont soumises à la loi relative à la protection des droits d'auteur.



Sous réserve de modifications techniques
Date de publication : Janvier 2022



Schöck France SARL
6 rue Icare
67960 Entzheim
Téléphone : +33 3 88 20 92 28
etudes-fr@schoeck.com
www.schoeck.com/fr



Scannez pour découvrir la
solution Schöck Combar®
sur www.schoeck.com/fr

Rejoignez-nous sur
 Schöck France SARL
 @SchoeckFrance

