

Het gebruik van staal-betonelementen is vooral voordelig in bouwwerken met meerdere verdiepingen. De dimensionering van dergelijke elementen wordt besproken in Eurocode 4. Naast een stabiliteitsberekening (uiterste grenstoestanden) vereist elke constructie ook een controle van de vervormingen (gebruiksgrenstoestanden). In dit artikel gaan we dieper in op de dimensionering van staal-betonstructuurelementen in de GGT.

*✉ Didier Delincé, ir., onderzoeker, laboratorium Structuren, animator Normen-Antenne 'Eurocodes', WTCB
Benoit Parmentier, ir., adjunct-labo-hoofd, laboratorium Structuren, WTCB*

1 INLEIDING EN REFERENTIE-NORMEN

De verschillende voordelen die geboden worden door het gebruik van staal-betonelementen in gebouwen met meerdere verdiepingen en gebouwen met een spanwijdte met een gemiddelde tot grote overspanning werden besproken in een vorig artikel [41]. Ze komen eveneens aan bod tijdens het onderzoeksproject SIRIUS ⁽¹⁾, gevoerd door het De Nayer Instituut en gesubsidieerd door het IWT ⁽²⁾ (Hobu-Fonds en Tetra-Fonds), waarbij het WTCB zetelt in de gebruikerscommissie.

De basisfilosofie voor de dimensionering van constructies volgens de Eurocodes maakt een onderscheid tussen twee types grenstoestanden ⁽³⁾ :

- de *uiterste grenstoestanden* of UGT, die betrekking hebben op de veiligheid van personen en/of van de constructie (instorting, ...). Het nazicht ervan vereist een controle van het maximale draagvermogen van een constructie of een element, evenals een controle van de overmatige vervormingen die zouden kunnen leiden tot het bezwijken van de constructie tengevolge van mechanische instabiliteit (bv. knik van een kolom, overhelling van een ligger, ...)
- de *gebruiksgrenstoestanden* of GGT, die betrekking hebben op de goede werking van de constructie of de structuurelementen, het

comfort van de gebruikers en het uitzicht van de constructie (scheurvorming, overmatige vervormingen, trillingen, ...).

De methode voor de berekening van staal-betonstructuurelementen (staal-betonliggers, staal-betonkolommen en staal-betonvloerplaten) in de UGT kwam reeds aan bod in een vorig artikel [41]. In dit tweede deel gaan we dieper in op de controle van deze elementen in de GGT, in overeenstemming met de Eurocodes, en dan vooral met Eurocode 4 (EC4).

We belichten hier enkel de algemene regels voor bouwwerken, die ter sprake komen in deel 1-1 van EC4 ⁽⁴⁾ [10]. De bijzondere aspecten die verband houden met bruggen en die behandeld worden in deel 2 van EC4, laten we buiten beschouwing. Eurocode 4 verwijst logischerwijze naar Eurocode 2 (EC2) ⁽⁵⁾ voor de berekening van betonelementen [5] en naar Eurocode 3 (EC3) voor de berekening van staalementen [8], in het bijzonder voor de dimensionering van de staalplaat (bekisting) van staal-betonvloerplaten [9].

A

Eurocode 4 : toepassing van de ENV of de EN ?

Net zoals in het vorige artikel wordt in deze bijdrage gebruik gemaakt van de ENV-versie van EC4. Deze tekst is opgenomen in de Belgische norm NBN ENV 1994-1-1 van 2002 [10], samen met het nationale toepassingsdocument (NTD) voor België. Deze norm heeft de status van een gehomologeerde norm bij het Belgisch Instituut voor Normalisatie (BIN), wat bekrachtigd werd in het KB van 11 juni 2004, gepubliceerd in het Belgisch Staatsblad van 27 augustus 2004. Ze vormt tegenwoordig dus de referentienorm voor het ontwerp van staal-betonconstructies in België.

Op dit ogenblik loopt ook de opstelling van de EN-versie van EC4 ten einde. In januari 2004 werd het eindontwerp door het Europees Comité voor Normalisatie (CEN) ter kritiek opgestuurd naar de Lidstaten (procedure van formele stemming). De definitieve versie zou dus in de loop van de volgende maanden bij het BIN, dat verantwoordelijk is voor de publicatie van de normen, beschikbaar moeten worden. Opdat deze EN 1994-1-1 in België zou kunnen toegepast worden, moet het BIN nog een Nationale Bijlage (ANB) voorbereiden en publiceren, waarin de nationale parameters en de bijzondere toepassingsregels opgenomen zijn. Dit dient te gebeuren binnen de twee jaar die volgen op de publicatie van de EN 1994-1-1. De NBN ENV 1994-1-1 zou dus ten laatste tegen het einde van 2006 vervangen moeten worden door zijn EN-equivalent. In vergelijking tot de ENV is de EN 1994-1-1 wat duidelijker geworden qua structuur en qua samenhang met de andere Eurocodes : EC1 voor de belastingen, EC0 voor de belastingcombinaties, EC2 voor betonconstructies en EC3 voor staalconstructies. Deze bijdrage werd voorbereid aan de hand van de NBN ENV 1994-1-1. Aangezien de EN-versie van EC4 echter ook weldra gepubliceerd zal worden, willen we de lezer in de loop van het artikel reeds wijzen op een aantal verschillen tussen beide documenten. Voor meer gedetailleerde informatie over de EN 1994-1-1, aangevuld met enkele voorbeelden, kan de geïnteresseerde lezer gebruik maken van een naslagwerk in het Engels [45], dat opgenomen is in de literatuurlijst.

Wat de Eurocodes 0 en 1 betreft, zijn de EN-versies reeds beschikbaar [1][3]. Hun ANB zou in de loop van de volgende maanden moeten verschijnen. Op dat ogenblik zullen ze de ENV-versies vervangen [2][4]. In dit artikel hebben we daarom reeds gebruik gemaakt van de aanduidingen uit de EN-versies.

De stand van zaken van de werkzaamheden kan gevolgd worden op de website van de Normen-Antenne 'Eurocodes' : <http://www.normen.be/eurocodes> (rubriek 'Normen' > 'Eurocodes' > 'Samenvattende tabellen').

⁽¹⁾ Voor meer informatie hieromtrent verwijzen we naar de website <http://www.staalplaatbetonvloeren.be>.

⁽²⁾ Instituut voor de aanmoediging van Innovatie door Wetenschap en Technologie in Vlaanderen.

⁽³⁾ In bepaalde documenten worden de gebruiksgrenstoestanden (GGT) aangeduid als bruikbaarheidsgrenstoestanden (BGT) en de uiterste grenstoestanden (UGT) als bezwijkgrenstoestanden (BGT). Om misverstanden te vermijden, gebruiken wij in deze bijdrage enkel de afkortingen GGT en UGT.

⁽⁴⁾ In deze tekst verwijzen referenties zoals 'EC4' naar deel 1-1 van EC4, m.a.w. naar de norm NBN ENV 1994-1-1 [10]. De referenties 'EC2' en 'EC3' verwijzen doorgaans naar de voornormen ENV, respectievelijk naar de NBN B 15-002 uit 1999 [5] en de NBN ENV 1993-1-1 uit 2002 [8].

⁽⁵⁾ De ENV-versie van EC2 werd in België gepubliceerd onder de aanduiding NBN B 15-002 [5].

B

EC4 in het Europese normenapparaat

Om EC4 in de praktijk te kunnen toepassen en om een dimensionering te kunnen uitvoeren, dient men te beschikken over een aantal andere documenten. Deze zijn eveneens nodig voor de keuze van de materialen, de bouwvoorzieningen en de uitvoeringsmethoden die het mogelijk maken om te beantwoorden aan de berekeningshypothese.

De samenhang tussen de berekeningsnormen (structurele Eurocodes), de uitvoeringsnormen voor bouwwerken en de productnormen met betrekking tot staal-betonconstructies is schematisch voorgesteld in afbeelding 1, p. 3 (*). In de productnormen wordt ook vaak verwezen naar een of meerdere proefnormen ter bepaling van bepaalde eigenschappen. Deze zijn niet opgenomen in dit schema.

Op dit ogenblik hebben nog niet alle normen de status van een definitieve EN-norm gekregen (zie legende bij afbeelding 1, p. 3).

De volledige referenties van de normen die momenteel in België gepubliceerd en van toepassing zijn, zijn opgenomen in de literatuurlijst aan het einde van dit artikel. De referentienormen die op dit ogenblik gebruikt dienen te worden voor de toepassing van EC4 en om materialen voor te schrijven waarmee het mogelijk is te voldoen aan de berekeningshypothese, zijn voorgesteld in § 2.

(*) Wij hebben enkel de referenties van de productnormen vermeld die betrekking hebben op gewapende constructies, en dus niet van de normen betreffende voorgespannen constructies. Het schema van afbeelding 1 (p. 3) bevat geen allesomvattende lijst van de normen die betrekking hebben op de producten, gebruikt voor staal-betonconstructies. Het overloopt enkel de voorname normen waarnaar de Eurocodes verwijzen voor de berekeningshypothese.

Dit artikel geeft een samenvattend overzicht van de meest voorkomende staal-betonstructurelementen. Aan het einde van dit artikel worden enkele interessante naslagwerken over dit onderwerp opgesomd.

2 BEREKENINGSHYPOTHESEN : EIGENSCHAPPEN VAN DE TOEGEPASTE MATERIALEN

In de huidige normatieve context, die gekenmerkt wordt door de invoering van een hele reeks Europese normen (→ B), willen we wat dieper ingaan op de hypothesen voor de eigenschappen van de materialen die toegepast worden in bouwwerken, gedimensioneerd volgens de Eurocodes. Deze hypothesen moeten in aanmerking genomen worden bij het voorschrijven van de materialen en de bepaling van de waarden die men dient te gebruiken bij de berekeningen (voor meer details verwijzen we naar § 3 'Materialen' van EC2 [5], van EC3 [8] en van EC4 [10]).

2.1 BETON

Voor beton verwijst EC2 naar de 2^e uitgave van de NBN B 15-001 uit 1992, die gebaseerd is op de ENV 206. Deze norm werd ondertussen vervangen door de NBN EN 206-1 (2001) [15] en een addendum uit 2004 [16], die op hun beurt vervolledigd werden door een Belgische aanvulling met de benaming NBN B 15-001 (uitgave 2004) [17]. Deze nieuwe

norm kwam aan bod in een artikel dat onlangs verschenen is in de WTCB-Dossiers [43].

De beperkingen die in EC4 opgelegd worden aan de betoneigenschappen zijn dezelfde als in EC2. De herhaling die beide documenten momenteel kenmerkt, zal verdwijnen in de toekomstige EN : in EN 1994-1-1 zal namelijk gewoon verwezen worden naar EN 1992-1-1.

Het toepassingsgebied van EC2 is overigens beperkt tot beton van bepaalde sterkteklassen. Voor België [5] betreft het de sterkteklassen C12/20 tot C50/60 voor gewapend beton (dit geldt eveneens voor staal-betonelementen). Door de overgang naar de EN-versie van Eurocode 2, waarvan de eindversie in de loop van de volgende maanden verwacht wordt, zal het toepassingsgebied van de rekenregels uitgebreid worden tot de klasse C90/105.

2.2 WAPENINGSSTAAL

Voor wapeningsstaal verwijzen EC2 en EC4 naar de EN 10080, die zou moeten verschijnen in 2005. De overeenkomstige voornorm, de ENV 10080, werd gepubliceerd in 1995 [20]. In het nationale toepassingsdocument (NTD) bij EC2 (opgenomen in de NBN B 15-002 [5]) werd de verwijzing naar deze norm vervangen door een verwijzing naar de overeenkomstige Belgische normreeks. Het NTD bij EC4 maakt hier geen toespeeling op. EC4 verwijst in dit kader evenwel naar EC2. Men mag dus redelijkerwijs veronderstellen

dat deze opmerking eveneens van toepassing is op de wapening die gebruikt wordt in staal-betonelementen.

De huidige referentiedocumenten zijn de normen NBN A 24-301 tot en met 304 ([21] tot en met [26]), aangevuld door de Technische Voorschriften PTV 302 tot en met 307 ([27] tot en met [33])⁽⁶⁾.

2.3 CONSTRUCTIESTAAL

Op gelijkaardige wijze als voor beton, verwijst EC4 voor constructiestaal (profielen en platen die gebruikt worden in staal-betonconstructies) naar EC3. De situatie is een beetje eenvoudiger dan voor beton, aangezien de documenten die de staalkwaliteit definiëren reeds bestaan (EN-normen waarnaar verwezen wordt in de Eurocodes; zie schema uit afbeelding 1, p. 3). Er zijn echter reeds een aantal wijzigingen aan de gang die zullen leiden tot nieuwe normen ...

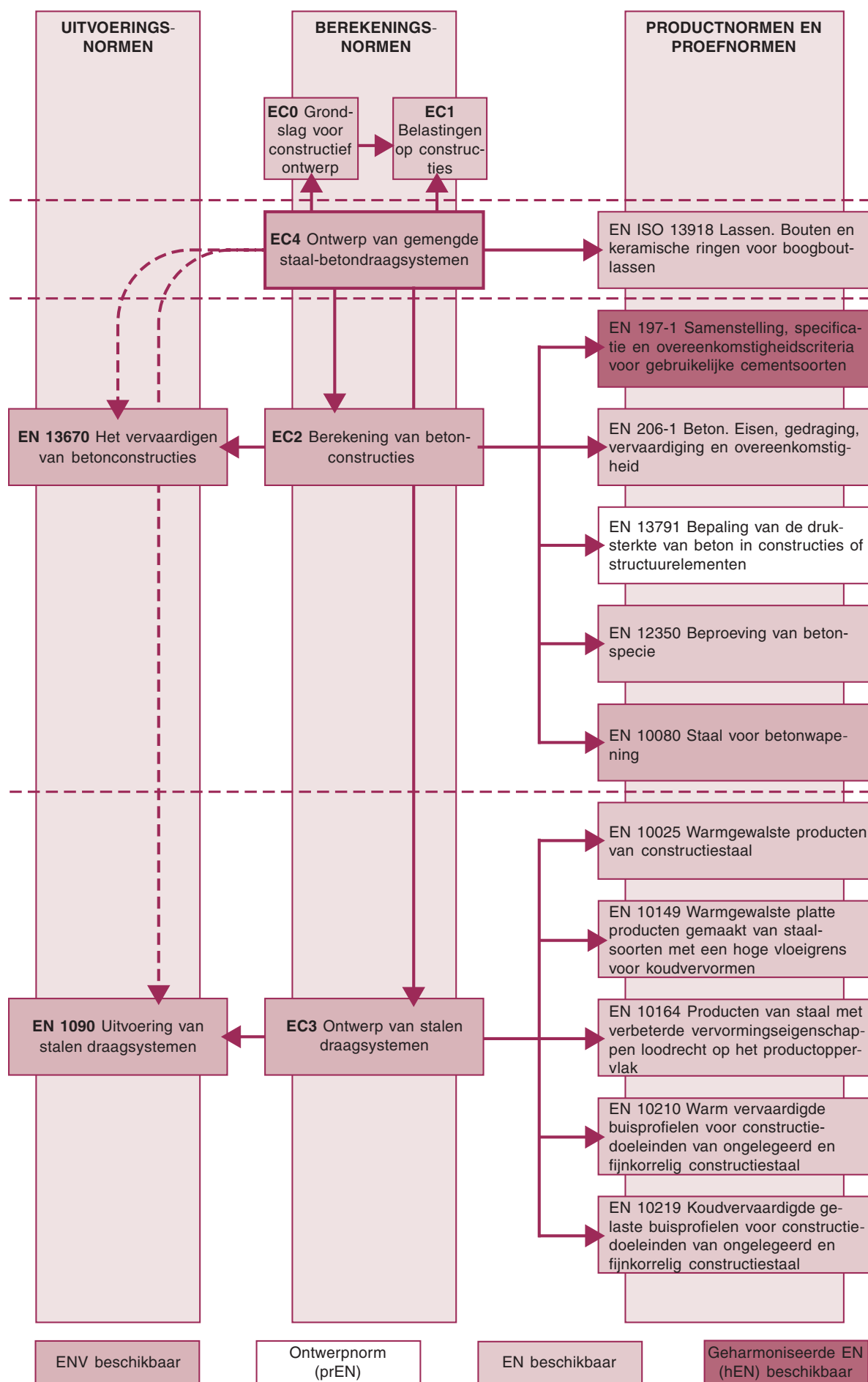
Net zoals voor beton is het toepassingsgebied van EC4 beperkt tot bepaalde staalkwaliteiten. Het gebruik van een plastische rekenmethode impliceert een aantal bijkomende beperkingen met betrekking tot de rekbaarheid van het staal (zie § 3.2.2.2 van EC3).

In deze bijdrage gaan wij niet dieper in op de aspecten betreffende de te gebruiken materialen, onder andere afhankelijk van het toegepaste rekenmodel (elastische berekening, plastische berekening, ...). De gebruiker dient deze controle echter wel uit te voeren bij het ontwerp van een constructie.

De beperkingen die door de Eurocodes opgelegd worden aan de eigenschappen van het wapeningsstaal en het constructiestaal kunnen als volgt samengevat worden : het gebruikte staal moet voldoende rekbaar zijn. Het moet met andere woorden voldoende vervormbaar zijn alvorens het bezwijkt. Deze beperkingen ter verzekering van de minimale rekbaarheid van het staal maken het mogelijk om bij de berekeningshypothese in de grenstoestanden het gedeeltelijke vloeien van het wapeningsstaal en/of het constructiestaal in rekening te brengen : de spanningen in het staal als gevolg van de beschouwde belastingen mogen de vloeigrens overschrijden en dus een blijvende vervorming van het materiaal (na de verwijdering van de belasting) teweegbrengen. Ze moeten echter steeds lager blijven dan de breukspanning (of uiterste treksterkte)⁽⁷⁾. In bepaalde gevallen mag een structurelement berekend worden, rekening houdend met het volledige vloeien van een of meer kritieke doorsneden, wat leidt tot de vorming van een zogenaamd *plastisch scharnier*.

⁽⁶⁾ Deze PTV kunnen gratis gedownload worden op de website 'Qualité & Construction' : <http://qc.aoso.vlaanderen.be/nl/normes/index.html>

⁽⁷⁾ Voor meer informatie omtrent de vereiste rekbaarheidseigenschappen : § 3.2 van EC3 voor constructiestaal en § 3.2 van EC2 voor wapeningsstaal.



Afb. 1 Samenhang tussen EC4 en de andere normen.

3 DIMENSIONERING VAN STAAL-BETONCONSTRUCTIES IN DE GEBRUIKSGRENSTOESTANDEN (GGT)

Constructies worden in de eerste plaats zodanig gedimensioneerd dat ze voldoen aan de eisen voor de uiterste grenstoestanden (UGT). Deze worden doorgaans op specifieke wijze bepaald (bv. voor liggers : weerstand van de doorsnede ten opzichte van de belastingen die erop aangrijpen, weerstand tegen overhelling, ...), zodat er voor de ontwerpers slechts weinig speelruimte overblijft : de principes, bepaald voor de controle van de UGT, worden immers bijna altijd vergezeld van precieze toepassingsregels, waarmee het mogelijk is na te gaan of de elementen voldoen aan de stabiliteitseisen van de constructie.

De gevolgen van een overschrijding van een GGT zijn minder zwaar dan deze van een overschrijding van een UGT (instorting). Het is dan ook moeilijker te voorspellen wanneer een structurelement niet langer gebruiksgeschikt zal zijn in de GGT. De gebruiksgeschiktheidscriteria kunnen erg verschillen, afhankelijk van het project en de eisen van de klant. De ontwerpers moeten dus vaker een beroep doen op hun eigen beoordelingsvermogen bij de bepaling van de vereiste criteria. Bij gebouwen hebben de grenswaarden, gebruikt voor de GGT, doorgaans een conventioneel karakter en beogen een maximale veiligheid. De toepassingsregels die in de Eurocodes opgenomen zijn met betrekking tot de gebruiksgeschiktheidscriteria zijn trouwens meestal aanbevelingen waarmee het mogelijk is te voldoen aan de vermelde principes en de eisen van de klant.

Hoewel de GGT vaak minder specifiek uitgedrukt worden dan de UGT, is de controle ervan essentieel ter verzekering van de duurzaamheid en de goede werking van de constructie ten opzichte van de andere bouw-elementen en het comfort van de gebruikers.

In de Eurocodes wordt ernaar gestreefd de berekeningen, nodig voor de controle van de GGT, tot een minimum te beperken. Voor bijzondere gevallen worden toepassingsregels gegeven om een meer gedetailleerde controle mogelijk te maken.

Bij de berekening van de belastingen en de vervormingen in de gebruiksgrenstoestanden moet rekening gehouden worden met de volgende effecten (EC4 § 5.1(2)) :

- de *shear lag* ⁽⁸⁾
- de toename van de doorbuiging tengevolge van een beduidende onvolledige schuif-

C

Wat zal veranderen met de Eurocodes EN

Wat de beperking van de vervormingen en de trillingen in gebouwen betreft, werden gebruiksgeschiktheidscriteria gedefinieerd in de Belgische norm NBN B 03-003 [40], die in 2003 gepubliceerd werd. Deze zijn niet afhankelijk van het materiaal waaruit het structurelement opgebouwd is, maar wel van de prestaties die ze moeten helpen vervullen. Voorbeeld : de toelaatbare doorbuiging van een vloer is afhankelijk van de vloerbedekking en de plaatsingswijze. De maximaal toelaatbare doorbuiging is groter voor een soepele vloerbedekking (1/250 van de overspanning) dan voor een stijve vloerbedekking (1/350 tot 1/500 van de overspanning).

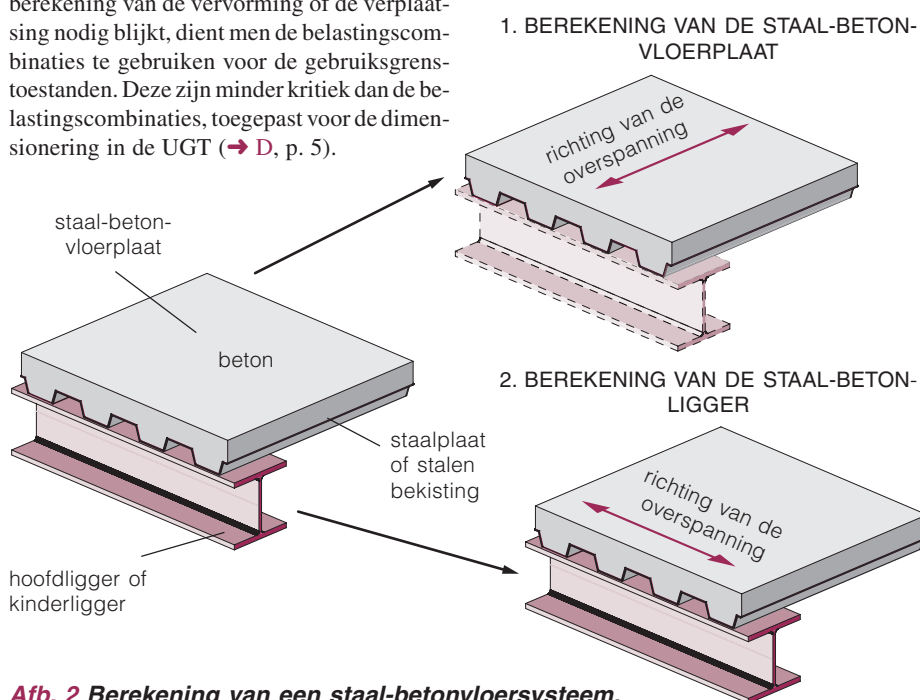
De norm NBN B 03-003 zal gebruikt worden als referentie bij het definiëren van de vervormingscriteria in de Nationale Bijlage van EC0. De Eurocodes in EN-stadium zullen trouwens naar EC0 verwijzen voor de bepaling van de gebruiksgeschiktheidscriteria, en dan vooral voor de vervormingen en de trillingen. Op dit ogenblik geven de ENV-versies van de Eurocodes 'Materialen' elk hun eigen criteria op.

- sterkteverbinding tussen het staal en het beton
- de scheurvorming, met residuele stijfheid van het beton onderworpen aan trekspanningen, in de zones met een negatief buigmoment
- kruip en krimp van het beton
- het eventuele vloeien van het staal, vooral als er geen onderstempeling gebruikt wordt
- het eventuele vloeien van de wapeningen, in de zones met een negatief buigmoment.

Deze effecten moeten niet noodzakelijk in rekening gebracht worden door middel van berekeningen of kwantitatieve metingen. Bepaalde effecten, zoals krimp en kruip van staal-betonliggers, worden immers op forfaitaire manier beschouwd. Voor gevallen waarbij een berekening van de vervorming of de verplaatsing nodig blijkt, dient men de belastingscombinaties te gebruiken voor de gebruiksgrenstoestanden. Deze zijn minder kritiek dan de belastingscombinaties, toegepast voor de dimensionering in de UGT (→ D, p. 5).

Hierna volgt een overzicht van de GGT die doorgaans moeten gecontroleerd worden voor de staal-betonstructurelementen die het vaakst gebruikt worden in gebouwen : staal-betonkolommen, staal-betonliggers en staal-betonvloerplaten (deze laatste worden meestal toegepast op een stalen draagconstructie).

Voor een vloersysteem, bestaande uit een staal-betonvloerplaat en metalen liggers (zie afbeelding 2), berekent men eerst en vooral de staal-betonvloerplaat in de UGT en de GGT. Vervolgens berekent men (eveneens in de UGT en de GGT) de staal-betonliggers, die gevormd worden door de verbinding van de vloerplaat met de hoofdliggers of met de kinderliggers (zie [44] voor meer details hieromtrent).



Afb. 2 Berekening van een staal-betonvloersysteem.

⁽⁸⁾ In een staal-betonvloer zal de overdracht van de afschuifspanningen via de verbindingsmiddelen aan de vloerplaat enkel betrekking hebben op de volledige vloerplaat indien de afstand tussen de metalen liggers niet te groot is. Dit betekent dat de normaalspanningen in de vloerplaat (bv. aan de bovenzijde) niet uniform verdeeld worden : ze zullen hoger zijn in de buurt van de metalen liggers en lager halverwege dergelijke liggers. Dit verschijnsel wordt ook aangeduid als *shear lag* (deze term werd in de norm vertaald als 'schuifrek in de betonflens', maar wordt in de praktijk niet gebruikt). Voor meer details hieromtrent verwijzen we naar § 3.2.1 (p. 5).

D

De gebruiksgrenstoestanden volgens de Eurocodes

De gebruiksgrenstoestanden (GGT) werden gedefinieerd in het begin van dit artikel. De algemene principes die gelden voor alle constructies zijn opgenomen in Eurocode 0 (EC0), m.a.w. in de norm NBN EN 1990 [1] (behandeld in een artikel uit de wintereditie van WTCB-Tijdschrift 2003 [41]). Zodra zijn Belgische Nationale Bijlage (ANB) afgewerkt is, zal deze norm de gehomologeerde voornorm NBN ENV 1991-1 [2] vervangen.

De algemene formule uit EC0 voor de controle van de GGT is de volgende :

$$E_d \leq C_d$$

waarbij E_d de rekenwaarde van het belastingseffect voorstelt, gespecificeerd in het gebruiksgeschiktheids criterium C_d en bepaald aan de hand van de geschikte combinatie

C_d de grensrekenwaarde van het gebruiksgeschiktheids criterium voorstelt.

Volgens EC0 moet men een onderscheid maken tussen GGT die *omkeerbaar* zijn (bv. trilling van een constructie onder invloed van de wind, bepaalde vervormingen, ...) en deze die *onomkeerbaar* zijn (bv. scheurvorming in het beton). De te beschouwen belastingscombinaties voor de berekening van de term E_d zijn verschillend, naargelang van het type grenstoestand, aangezien de gevolgen van een overschrijding van de verschillende grenstoestanden anders zijn. EC0 stelt de volgende belastingscombinaties voor, die vermeld worden in de ENV 1994-1-1 (waarbij G de blijvende belasting is, P de voorspanningsbelasting en Q de veranderlijke belasting). Hierbij zijn de partiële veiligheidscoëfficiënten voor de belastingen gelijkgesteld aan 1; de waarden van de ψ -combinatiecoëfficiënten voor de begeleidende waarden bij de veranderlijke belastingen zijn opgenomen in EC0 :

- *karakteristieke* combinatie – normaalgesproken gebruikt voor onomkeerbare GGT :

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

- *frequente* combinatie – normaalgesproken gebruikt voor omkeerbare GGT :

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

- *quasi-blijvende* combinatie – gebruikt voor omkeerbare GGT die een belangrijke invloed hebben op het uitzicht en de duurzaamheid van de constructie op lange termijn :

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

De ENV 1991-1 [2] stelt vereenvoudigde belastingscombinaties voor gebouwen voor. Deze werden echter niet weerhouden in de EN 1990 [1]. Voor de courante controle van de beperking van de doorbuiging en de horizontale verplaatsing bovenaan de kolommen (vervormingsgrenstoestanden) bevelen EC4, de Eurocodes voor de andere materialen en de norm NBN B 03-003 (→ C) de *karakteristieke belastingscombinatie* aan. Voor de controle van de grenstoestanden voor de scheurvorming in het beton, zoals besproken in EC2 en EC4, wordt het gebruik van de *quasi-blijvende belastingscombinatie* aanbevolen.

Dit derde aspect komt niet specifiek aan bod in EC4, maar wel in EC3 (ENV 1993-1-1). De controle van deze GGT is slechts belangrijk voor enkele bijzondere constructies.

E

Wat zal veranderen met de Eurocodes EN

Zoals hiervoor reeds vermeld (→ C), zullen de EN-versies van de verschillende Eurocodes 'Materialen' geen afzonderlijke vervormingscriteria bevatten. Voor de bepaling van de criteria, naargelang van het type toepassing (bv. afhankelijk van het type vloerbedekking voor vloerplaten, ...), zal verwezen worden naar EC0, en dus onrechtstreeks naar de norm NBN B 03-003 [40]. Deze laatste norm kan nu reeds samen met de ENV-versie van de Eurocodes gebruikt worden. De erin voorgestelde criteria ter beperking van de doorbuiging en de trillingen zijn meestal strenger dan deze uit de ENV.

De regels voor de controle van de GGT voor staal-betonliggers uit EC4 zijn van toepassing zodra het beton verhard is en de verbinding in de staal-betonligger effectief is. Voor de controle van de GGT tijdens de bouwphase kan men teruggrijpen naar EC3. Wij beperken ons hier tot het eerste geval. We willen er wel op wijzen dat de keuze van een al dan niet onderstempelde constructie afhankelijk kan zijn van de rekenresultaten in de UGT en de GGT tijdens de bouwphase.

3.2.1 CONTROLE VAN DE DOORBUIGING

We hebben hiervoor reeds vermeld dat men voor de controle van de GGT niet noodzakelijk gebruik dient te maken van lange berekeningen. In een bijdrage van de APK [44] hebben de auteurs duidelijk een aantal situaties afgebakend waarvoor geen enkele berekening vereist is. Voor een staal-betonligger die gecontroleerd werd in de UGT dient men de doorbuiging in de GGT niet te controleren indien de waarde van de verhouding k van de overspanning over de totale hoogte van de doorsnede van de staal-betonligger begrepen is tussen de volgende grenswaarden :

- eenvoudig opgelegde (isostatische) ligger :
 - hoofdligger : $15 \leq k \leq 18$
 - kinderligger : $18 \leq k \leq 20$
- continue (hyperstatische) ligger :
 - hoofdligger : $18 \leq k \leq 22$
 - kinderligger : $22 \leq k \leq 25$.

Hoofdliggers steunen rechtstreeks op muren of kolommen, terwijl kinder- of dwarsliggers de belastingen overdragen op de hoofdliggers. Afbeelding 3 stelt een dergelijke draagconstructie met een staal-betonvloerplaat voor.

3.1 STAAL-BETONKOLOMMEN

De te controleren GGT voor staal-betonkolommen hebben voornamelijk betrekking op de verplaatsing bovenaan de kolommen, die deel uitmaken van een constructie zonder onderstempeling (afzonderlijke kolommen). De grenswaarden voor deze horizontale verplaatsing zijn opgenomen in de NBN B 03-003 [40].

De axiale vervormingen van op druk belaste elementen zijn meestal voldoende klein om ze te kunnen verwaarlozen. De horizontale vervormingen worden als aanvaardbaar beschouwd indien de kolom gedimensioneerd werd om weerstand te kunnen bieden tegen knik.

Wat de grenstoestanden voor de scheurvorming betreft (voor beton dat blootstaat aan hoge drukspanningen), bevat EC4 geen grenswaarden voor de spanningen in de op druk belaste elementen.

3.2 STAAL-BETONLIGGERS

Staal-betonliggers zijn doorgaans samengesteld uit een stalen profiel (bv. warm gelamineerd of door lassen samengesteld I-profiel) en een vloerplaat. Deze laatste kan bestaan uit gewapend beton, uit ter plaatse gestort of geprefabriceerd beton, of uit een staal-betonvloerplaat, opgebouwd uit beton dat ter plaatse op een staalplaat (verloren of meewerkende bekisting) gestort werd. Om als een staal-betonstructuurelement beschouwd te kunnen worden, moet de verbinding tussen beide elementen gewaarborgd zijn (zie vorig artikel [42] voor de verbindingsmogelijkheden).

De controle van de GGT voor staal-betonliggers heeft voornamelijk betrekking op de drie volgende aspecten :

- de controle van de doorbuiging
- de controle van de scheurvorming
- de beperking van de trillingen.

Als een berekening nodig blijkt, moet men ermee rekening houden dat er verschillende soorten doorbuiging bestaan voor liggers en vloerplaten en dat voor elk van deze types een verschillend vervormingscriterium geldt. De gebruikte definities en symbolen variëren spijtig genoeg van de ene (voor)norm tot de andere. Tabel 1 geeft een overzicht van de symbolen die opgenomen zijn in de Eurocodes ENV, de Eurocodes EN en de norm NBN B 03-003.

De definities van de doorbuiging en van de vervormingen uit de NBN B 03-003 zijn preciezer dan deze uit de Eurocodes : een doorbuiging wordt gemeten ten opzichte van een (doorgaans) rechte systeemlijn tussen de steunpunten (de norm stelt de term 'uitwijking' voor voor 'horizontale' doorbuigingen). Een verplaatsing wordt gemeten ten opzichte van de uitgangslijn, die de geringe afwijkingen die vooraf aan het element werden aangebracht in aanmerking neemt (bv. zeeg).

Bij de opstelling van tabel 1 werd hiermee rekening gehouden. Hierna wordt de term 'doorbuiging' echter gebruikt in de algemene betekenis, m.a.w. als een 'verticale vervorming' voor liggers en vloerplaten.

Hoewel ook EC3 grenswaarden bevat voor de verticale doorbuiging, is het beter de (meer volledige) criteria uit de norm NBN B 03-003 te gebruiken. Deze bepaalt voor de verschillende vervormingscriteria immers de belastingscombinatie waarmee men dient rekening te houden voor de berekening van de doorbuiging. Ze geeft tevens aan op welke definitie van doorbuiging het criterium betrekking heeft. Voor de berekening van de doorbuiging wordt meestal gebruik gemaakt van de karakteristieke belastingscombinatie (→ **D**) (ook zeldzame belastingscombinatie genoemd). Enkel het criterium met betrekking tot het visuele comfort wordt gecontroleerd met de frequente combinatie.

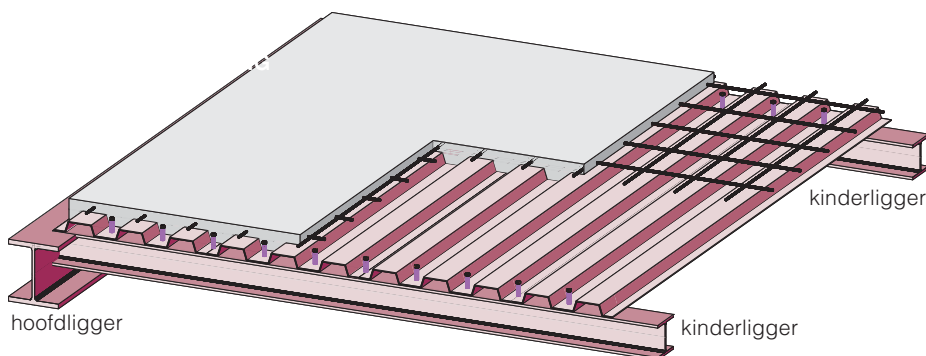
De doorbuiging wordt bepaald door een elastische berekening, met correctie van de effecten (a) en (e), vermeld in § 3 (p. 4). EC4 (§ 5.2.2) geeft hiervoor toepassingsregels op.

a. Shear lag

De invloed van de *shear lag* is kleiner dan in de UGT en kan verwaarloosd worden. Als de vloerplaat breder is dan 1/8 van de overspanning, kan men bij de bepaling van de doorbuiging de meewerkende breedte ⁽⁹⁾ van de vloerplaat in de spanwijdte gebruiken. Deze berekening is redelijk streng maar biedt het voordeel dat men de waarden, berekend voor de controle van de UGT (traagheidsmoment bij buiging van de doorsnede, ...) kan overnemen [44].

b. Onvolledige schuifsterkteverbinding

Als er een *onvolledige schuifsterkteverbinding*



Afb. 3 Staal-betonconstructie met een staal-betonvloerplaat.

Tabel 1 Definities van de doorbuiging en symbolen, gebruikt in de normen.

TYPE DOORBUIGING	SYMBOLEN EN	SYMBOLEN NBN B 03-003	SYMBOLEN ENV (EC3)
Zeeg (bv. voorkromming) van het niet-belaste structuurelement (toestand 0)	w_c	w_1	δ_0
Initiële doorbuiging (ogenblikkelijke en gedeeltelijk vertraagde) onder invloed van de blijvende belastingen (*) van de overeenkomstige belastingscombinatie (**) (toestand 1)	$w_1 - w_c$	w_a	$\delta_1 - \delta_0$
Aangroeiing van de doorbuiging (ogenblikkelijke en gedeeltelijk vertraagde) onder invloed van de blijvende belastingen (eigengewicht van de constructie + nadien aangebrachte afwerkingen)	w_2	w_b	—
Maximale ogenblikkelijke en vertraagde aangroeiing van de doorbuiging als gevolg van de veranderlijke belastingen (***) van de overeenkomstige belastingscombinatie (**) (toestand 2)	w_3	w_c	δ_2
Totale uitwijking, rekening houdend met de zeeg	$w_{\text{tot}} = w_1 + w_2 + w_3$	$w_{abc} + w_1$	—
Totale doorbuiging	$w_{\text{max}} = w_{\text{tot}} - w_c$	w_{abc}	$\delta_{\text{max}} = \delta_1 + \delta_2 - \delta_0$

(*) Doorbuiging tengevolge van het eigengewicht van de constructie vóór de plaatsing van het structuurelement waarvan de vervormingen moeten beperkt worden. Voorbeeld : wanneer de doorbuiging van een vloer beperkt wordt om te vermijden dat de vloerbetegeling zou scheuren, is het beschouwde structuurelement de betegeling. w_1 is in dat geval de doorbuiging van de vloer vóór de plaatsing van de betegeling.

(**) Het gaat hier doorgaans om de karakteristieke combinatie (zie hierna).

(***) De veranderlijke belastingen zijn de gebruiksbelastingen van het gebouw, de windbelasting, de sneeuwbelasting, de thermische belastingen, ... Deze worden in EC0 voorgesteld door Q [1].

⁽⁹⁾ Wat het begrip 'meewerkende breedte' betreft, verwijzen we naar het vorige artikel inzake de dimensionering in de UGT [42] (§ 3.2 en afbeelding 9).

ding⁽¹⁰⁾ is tussen de stalen ligger en de vloerplaat (berekend in de UGT), kunnen de effecten ervan verwaarloosd worden⁽¹¹⁾ in de volgende gevallen :

- in een overhangend deel of een overspanning, indien minstens een van de doorsneden tot klasse 3 of 4 behoort (voor de indeling van de doorsneden : zie [42], § 2.3)
- in een constructie zonder onderstempeling, als voldaan werd aan de volgende voorwaarden :
 - de berekening van de schuifsterkteverbinding moet gebeuren volgens EC4 (§ 6)
 - ofwel mag het gebruikte aantal verbindingsmiddelen N voor de onvolledige schuifsterkteverbinding niet kleiner zijn dan de helft van het aantal dat nodig is voor een volledige schuifsterkteverbinding N_f (dus $N/N_f \geq 0,5$), ofwel mogen de spanningen die opgewekt worden in de verbindingsmiddelen niet groter zijn dan $0,7 \cdot P_{Rk}$ (waarbij P_{Rk} de sterkte van een verbindingsmiddel voorstelt [42])
 - bij een geribde staal-betonvloerplaat, waarvan de ribben een hoek van 90° vormen met de ligger, mag de hoogte van de ribben niet groter zijn dan 80 mm.

Als men de onvolledige schuifsterkteverbinding niet kan verwaarlozen (d.w.z. indien niet voldaan werd aan bovenstaande voorwaarden), geeft EC4 (§ 5.2.2) formules ter bepaling van de doorbuiging van de staal-betonligger in onvolledige schuifsterkteverbinding. Hierbij gaat men uit van de waarden van de doorbuiging, berekend in volledige schuifsterkteverbinding δ_c en voor de stalen ligger alleen δ_a :

$$\frac{\delta}{\delta_c} = 1 + \beta \cdot \left(1 - \frac{N}{N_f} \right) \cdot \left(\frac{\delta_a}{\delta_c} - 1 \right) \quad (\text{als } N/N_f \geq 0,4)$$

met $\beta = 0,5$ voor een onderstempelde en $\beta = 0,3$ voor een niet-onderstempelde constructie.

F

Wat zal veranderen met de Eurocodes EN

- Het criterium inzake de maximaal toelaatbare spanning in het verbindingsmiddel om het effect van een onvolledige schuifsterkteverbinding te kunnen verwaarlozen, zal uitgedrukt worden t.o.v. de rekenweerstand P_{Rd} in plaats van t.o.v. de karakteristieke waarde (niet langer expliciet gedefinieerd). Dit leidt tot een minder streng criterium (de spanning in het verbindingsmiddel mag immers groter zijn).
- De formule uit de ENV ter berekening van de doorbuiging bij onvolledige schuifsterkteverbinding, werd niet weerhouden in de EN. Ze blijft wel van toepassing, maar een aantal andere methoden zouden eveneens aanvaard moeten worden [45].

δ/δ_c is de relatieve aangroeiing van de doorbuiging wegens het onvolledige karakter van de schuifsterkteverbinding, in cijfers vertaald door de verhouding N/N_f , berekend bij de dimensionering van de verbindingsmiddelen in de UGT (zie [42], voorbeeld 2). De voorwaarde $N/N_f \geq 0,4$ is vervuld als de onvolledige schuifsterkteverbinding gedimensioneerd werd volgens § 6.1.2 van EC4. De doorbuigingen δ , δ_c en δ_a (symbolen uit de ENV) beantwoorden aan het vervormingscriterium, opgesteld t.o.v. een van de hiervoor gedefinieerde doorbuigingen (zie tabel 1, p. 6), afhankelijk van de aard van de gecontroleerde GGT.

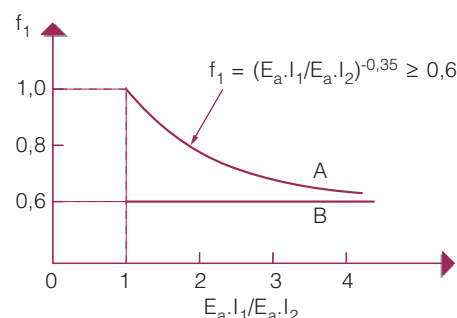
c. Zones met een negatief moment

Bij continue liggers neemt men de *scheurvorming in het beton in de zones met een negatief moment* als volgt in aanmerking. Men berekent de buigmomenten aan de steunpunten en de trekspanningen in de bovenste vezel van het beton σ_{ct} met de buigstijfheid van de gehomogeniseerde doorsneden $E_a I_1$ en $E_a I_2$ (zie → H voor de definitie van de symbolen). EC4 stelt in dit kader de twee volgende methoden voor.

- Voor liggers met een kritieke doorsnede van klasse 1, 2 of 3 in elk van de steunpunten waar de trekspanning in de bovenste vezel van de betonnen vloerplaat $\sigma_{ct} \geq 0,15 \cdot f_{ck}$, vermenigvuldigt men het buigmoment met de hierna gedefinieerde verminderingscoëfficiënt f_1 (met I_1 en I_2 respectievelijk het niet-gescheurde en gescheurde traagheidsmoment van de gehomogeniseerde doorsnede, → H) :
 - $f_1 = (E_a I_1 / E_a I_2)^{-0,35} \geq 0,6$: bij gelijkmatig verdeelde belastingen, indien de belastingen per lengte-eenheid gelijk zijn voor alle spanwijdten, en als de lengten van alle spanwijdten niet meer dan 25 % afwijken van elkaar⁽¹²⁾ (kromme A van afbeelding 4)
 - $f_1 = 0,6$ in alle andere gevallen (rechte B van afbeelding 4).

Vervolgens dient men de aangroeiing die overeenstemt met de buigmomenten van de aangrenzende spanwijdten toe te passen.

- Een preciezere methode (via computerberekeningen) bestaat in de toepassing van een globale elastische ‘gescheurde’ berekening, zoals voorgesteld ter controle van de UGT, maar wel rekening houdend met de belastingscombinaties in de GGT. In dit geval moet men de momenten aan de steunpunten niet verminderen. Bij deze berekening beschouwt men de buigstijfheid van de gehomogeniseerde doorsneden $E_a I_2$ en veronderstelt men dat het beton gescheurd is over 15 % van de lengte van de overspanning aan weerszijden van het steunpunt en over 30 % van de lengte van de overhelling.



Afb. 4 Verminderingscoëfficiënten voor het buigmoment aan de steunpunten om de scheurvorming in het beton in rekening te brengen (EC4, afb. 5.1).

G

Wat zal veranderen met de Eurocodes EN

Het criterium $\sigma_{ct} \geq 0,15 \cdot f_{ck}$ voor de herverdeling van de momenten zal uitgedrukt worden ten opzichte van de treksterkte van het beton f_{ctm} , gedefinieerd in de EN 1992-1-1 : $\sigma_{ct} \geq 1,5 \cdot f_{ctm}$. Dit is ook logischer. We willen erop wijzen dat de verhouding van de treksterkte tot de druksterkte f_{ctm}/f_{ck} niet constant is : deze vermindert naarmate het beton een hogere sterkteklasse heeft.

H

Buigstijfheid van de doorsnede van een staal-betonligger

Om een staal-betonligger te berekenen, bepaalt EC4 een gehomogeniseerde al dan niet gescheurde doorsnede t.o.v. het staal, met een respectievelijke buigstijfheid $E_a I_1$ en $E_a I_2$ ($E_a I_2 < E_a I_1$) :

- E_a is de elasticiteitsmodulus van het staal waaruit de ligger opgebouwd is
 - I_1 is het traagheidsmoment bij buiging van de staal-betondorsnede, voor een niet-gescheurd beton, berekend met de meewerkende breedte van de betonnen vloerplaat
 - I_2 is het traagheidsmoment bij buiging van de staal-betondorsnede, voor een gescheurd en op trek belast beton, berekend met de meewerkende breedte van de betonnen vloerplaat en de aanwezige wapening.
- Voor de berekening van I_1 en I_2 draagt de equivalente betonoppervlakte in staal A_c/n . De waarde van de nominale equivalentiecoëfficiënt n is gedefinieerd in punt d (p. 8). Bij de berekening van het niet-gescheurde traagheidsmoment I_1 , is A_c de totale oppervlakte van de betonnen vloerplaat. Voor de berekening van het gescheurde traagheidsmoment I_2 , is A_c de op druk belaste oppervlakte van de vloerplaat. In beide gevallen wordt deze oppervlakte berekend met de meewerkende breedte van de vloerplaat [42].

⁽¹⁰⁾ De onvolledige en volledige schuifsterkteverbinding werden gedefinieerd in [42] (§ 2.3 en voorbeeld 2), als gedeeltelijke en volledige verbinding.

⁽¹¹⁾ Men berekent dus de doorbuiging van de staal-betonligger in de veronderstelling van een volledige schuifsterkteverbinding tussen ligger en vloerplaat.

⁽¹²⁾ Dit komt erop neer te controleren of de verhouding van de langste spanwijdte tot de kortste kleiner is dan 1,25.

Het Belgische NTD bij EC4 geeft aan dat men bij de bepaling van σ_{ct} rekening dient te houden met de betonkrimp, onafhankelijk van de klasse van de doorsnede.

EC4 (§ 5.2.2(9)) bepaalt tevens dat het krommingseffect van de ligger als gevolg van de betonkrimp in rekening moet gebracht worden voor isostatische liggers indien de verhouding van de overspanning op de totale hoogte van de ligger k hoger is dan 20 en de voorziene vrije krimpvervorming van het beton groter is dan $400 \cdot 10^{-6}$. Dit effect is te verwaarlozen voor continue liggers. Doorgaans is het krommings-effect tengevolge van de krimp ook verwaarloosbaar, zelfs voor isostatische liggers [46].

EC4 bevat geen toepassingsregel waarmee het krommingseffect tengevolge van de krimp werkelijk in rekening gebracht kan worden bij de berekening van de doorbuiging. Ze geeft ook niet aan of de rekenregel uit bijlage 4 van EC2 kan toegepast worden op staal-betonstructuurelementen.



Wat zal veranderen met de Eurocodes EN

De EN geeft blijkbaar niet langer een criterium op voor de voorziene vrije krimpvervorming, waarmee het mogelijk is te bepalen of men bij de berekening van de doorbuiging rekening te houden met de krimp. De voorwaarde met betrekking tot de maximale waarde van de verhouding k om dit effect te kunnen verwaarlozen, blijft echter behouden.

d. Kruip van het beton

Bij het in rekening brengen van *kruip* wordt een voldoende precisie bereikt door in de berekeningen (o.a. ter bepaling van de traagheidsmomenten I_1 en I_2) de betonoppervlakte A_c te vervangen door de equivalente staaloppervlakte $A_{s,n}$, waarbij n de nominale equivalentiecoëfficiënt is ($n = E_a/E'_c$). De factor E_a stelt de elasticiteitsmodulus van het constructiestaal voor (zie EC3), terwijl de factor E'_c de 'equivalente' modulus van het beton is, die in dit geval gelijkgesteld wordt aan $E_{cm}/2$ [46] en waarbij E_{cm} de secans elasticiteitsmodulus van het beton voorstelt, zoals gedefinieerd in EC2.

e. Vloeien van het staal

De invloed van het *plaatselijke vloeien* van het constructiestaal ⁽¹³⁾ ter hoogte van een steunpunt kan in rekening gebracht worden door het buigmoment op het steunpunt te ver-

menigvuldigen met een verminderingscoëfficiënt f_2 (zoals bij de toepassing van de coëfficiënt f_1 voor het in aanmerking nemen van de scheurvorming in het beton) :

- $f_2 = 0,5$ indien de vloeigrens van het staal f_y bereikt wordt vóór de verharding van de betonnen vloerplaat
- $f_2 = 0,7$ als de vloeigrens van het staal f_y bereikt wordt door belastingen die aangrijpen na de verharding van het beton.

Een vereenvoudigde rekenmethode voor de doorbuiging van continue liggers is opgenomen in literatuurlijstnummer [46], p. 76.

De controle van de doorbuiging vóór en tijdens het betonneren kan gebeuren volgens dezelfde voorschriften (EC4, § 9.4.1).

3.2.2 CONTROLE VAN DE SCHEURVORMING

Scheurvorming in beton kan te wijten zijn aan verschillende oorzaken. Slechts enkele ervan kunnen doeltreffend beperkt worden door een geschikte uitvoering. De noodzaak om de scheurvorming te controleren en de scheuren te beperken, kan diverse redenen hebben :

- voldoende rekbaarheid (de wapeningen moeten in elastische fase zijn bij het verschijnen van de eerste scheuren) ⁽¹⁴⁾
- duurzaamheid
- uitzicht
- dichtheid van het beton, ...

De Eurocodes begrenzen de scheuropening enkel in het kader van de duurzaamheidscriteria.

Beton scheurt wanneer het belast wordt op trek. De scheuren in de betonnen vloerplaat van een staal-betonligger ontstaan door rechtstreekse belastingen of opgelegde vervormingen (bv. krimp, verandering van de omgevingstemperatuur, waarop het staal sneller reageert dan het beton). In continue liggers en kunnen scheuren optreden in zones waar het beton op trek belast wordt (negatief moment, m.a.w. in de buurt van de steunpunten, ...).

De controle van de scheurvorming van staal-betonliggers gebeurt aan de hand van EC2 (§ 4.4.2), maar het gedrag van een staal-betonligger verschilt op een aantal punten van dat van een T-ligger uit gewapend beton. De stalen ligger is immers niet onderhevig aan krimp en scheurvorming. De controle van de scheurvorming, zoals aanbevolen in EC4, is overigens enkel geldig voor scheuren die in het beton kunnen ontstaan als gevolg van belastingen in de langsrichting van de staal-betonligger. Voor de controle van de scheurvorming in de dwarsrichting dient men gebruik te maken van EC2 (§ 4.4.2). Dit geldt ook voor staal-betonliggers, opgebouwd uit een metalen profiel, aangezien de §§ 7 en 8 van EC4, die gewijd zijn aan staal-betonvloerplaten, geen bijzondere aanduidingen hieromtrent bevatten.

De beperking van de scheurvorming aan de bovenzijde van de betonnen vloerplaat, die blootgesteld wordt aan trekspanningen in zones met negatieve momenten, wordt verzekerd door de plaatsing van langswapeningen ter hoogte van de steunpunten. EC4 (§ 5.3.1(5)) geeft de volgende minimale waarden voor de wapeningspercentages t.o.v. de oppervlakte van de betondoorsnede van de vloerplaat :

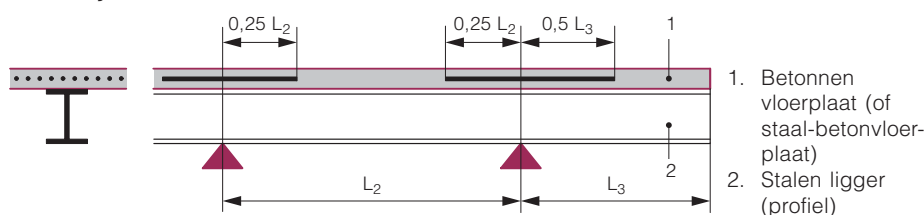
- 0,4 % van de betonoppervlakte voor een onderstempelde constructie
- 0,2 % van de betonoppervlakte voor een constructie zonder onderstempeling.

Voor de vereiste lengte van de wapeningen aan weerszijden van de steunpunten verwijzen we naar afbeelding 5. De maximale afstand tussen de staven moet voldoen aan de voorschriften uit § 5.4.3.2.1 van EC2 voor een niet-gemengde vloerplaat of uit § 7.2.1 van EC4 voor een staal-betonvloerplaat.

Voor gewone gebouwen zijn geen lange berekeningen nodig voor de controle van de scheurvorming in het beton :

- voor beton in de milieuklasse 1 ⁽¹⁵⁾, die betrekking heeft op het merendeel van de betonelementen voor gebruik binnenin gebouwen (kantoren, woningen, ...), is een

Afb. 5 Minimale lengte van de langswapening aan weerszijden van de steunpunten in een doorlopende ligger ter beperking van de scheurbreedte aan de bovenzijde van het beton.



⁽¹³⁾ De betekenis van het begrip 'vloeien van het staal' werd opgefrist aan het einde van § 2 (p. 2)

⁽¹⁴⁾ De spanningen in de wapening op het ogenblik dat de eerste scheuren verschijnen, moeten lager zijn dan de vloeigrens van het wapeningsstaal.

⁽¹⁵⁾ De milieuklassen (blootstellingsklassen) voor beton worden gedefinieerd in de norm NBN B 15-001 (1992), die de Belgische versie van de ENV 206 is. Deze zijn bepalend voor de duurzaamheidseisen. Klasse 1 stemt overeen met een droge omgeving. Een nieuwe versie van deze norm, gebaseerd op de EN 206, werd onlangs gepubliceerd [15, 16, 17]; zie ook Katern nr. 4 van de WTCB-Dossiers nr. 2004/3 [43]. Het aantal milieuklassen zal hierdoor stijgen van 5 tot 18. De EN-versies van EC4 en EC2 (EN 1992-1-1) zullen rekening houden met deze nieuwe classificatie.

controle van de scheuropening doorgaans overbodig, voor zover de scheuren geen probleem vormen voor het uitzicht of de afwerking (broze vloerbedekking)

- voor beton in de milieuklassen 2 tot 4 (bij gebrek aan specifieke eisen) beperkt EC2 de scheurbreedte tot 0,3 mm. Dit volstaat vaak om het uitzicht en de duurzaamheid van elementen uit gewapend beton voor staal-betonliggers in gebouwen te verzekeren. Voor elementen in de milieuklasse 1, die een controle van de scheuropening vereisen, mag de scheuropening tot 0,5 mm beperkt worden
- indien een globale berekening van de belastingen nodig blijkt voor de controle van de scheurvorming tengevolge van rechtstreekse belastingen, zijn er bepaalde verschillen in vergelijking tot de berekening in de UGT. Voor de bepaling van de interne krachten kan enkel een globale elastische berekening toegepast worden. Er is geen herverdeling van de momenten voor een elastische ‘gescheurde’ berekening. Voor een elastische ‘niet-gescheurde’ berekening zijn de waarden van de herverdelingsgrenzen voor de buigmomenten in de steunpuntzone lager dan voor de UGT : 15 % indien de doorsnede van klasse 1 of 2 is en 10 % in de andere gevallen ⁽¹⁶⁾. De ‘niet-gescheurde’ berekening kan manueel gebeuren. Voor de ‘gescheurde’ berekening moet men meestal een beroep doen op een computerprogramma.

Wat de berekening van de doorbuiging betreft, wordt het effect van de scheurvorming van het beton in aanmerking genomen zoals verduidelijkt in § 3.2.1 (p. 5). De controle van de grenstoestanden voor de scheurvorming mag in geen geval verward worden met het in rekening brengen van de scheurvorming bij de controle van de andere grenstoestanden (zoals bijvoorbeeld bij de berekening van de doorbuiging, maar ook bij de controle van de UGT [42]).

Het belangrijkste voordeel van EC4 (§ 5.3) bij de controle van de scheurvorming in de GGT is dat men ermee kan nagaan of de in de UGT berekende wapeningsdoorsnede volstaat. Dit is doorgaans het geval. Enerzijds dient men hierbij vooreerst de maximale diameter van de wapeningsstaven te controleren, anderzijds dient men hun verdeling over de meewerkende breedte van de betonnen vloerplaat na te gaan, opdat de afstand tussen de staven niet te groot zou zijn (zie tabellen 5.1 en 5.2 van EC4).

Hieruit kan men het volgende principe afleiden : de keuze van de rekbaarheid van de wapeningsstaven (keuze van de vloeigrens van

het staal) is afhankelijk van de toelaatbare scheurvorming in het beton : indien het scheurvormingscriterium streng is (lage maximale scheurbreedte), dient men weinig rek-bare wapeningen toe te passen.

3.2.3 BEPERKING VAN DE TRILLINGEN

Dit aspect komt niet specifiek aan bod in EC4. Deze verwijst hiervoor naar de criteria uit EC3. Wij kiezen echter het gebruik van de criteria uit de norm NBN B 03-003 [40].

Voor courante vloeren, waarop geen toestellen gebruikt worden die trillingen kunnen teweegbrengen in de constructie, dient men zich ervan te vergewissen dat de constructie een eigen frequentie heeft die hoger is dan 3,5 Hz. Voor sporthallen, danszalen en turnzalen mag deze waarde opgetrokken worden tot 7 Hz.

Men kan de eigen frequentie f van een eenvoudig opgelegde constructie beoordelen met de ogenblikkelijke doorbuiging δ (gelijk aan δ_1 volgens de ENV-aanduidingen uit tabel 1, p. 6) onder invloed van de frequente belastingscombinatie (EC3) : de doorbuiging wordt berekend onder blijvende belastingen (eigen-gewicht van de staal-betonligger). De ogenblikkelijke doorbuiging δ maakt duidelijk dat de fundamentele eigen frequentie van het element (de staal-betonligger) afhankelijk is van de verhouding van zijn stijfheid tot zijn lineaire eigengewicht : bij de berekening van deze doorbuiging mag men dus enkel rekening houden met de blijvende belastingen tengevolge van het eigengewicht van de staal-betonligger.

In het naslagwerk van de APK [44] wordt een vereenvoudigde formule voorgesteld, waarbij de doorbuiging δ wordt uitgedrukt in mm :

$$f = \frac{18}{\sqrt{\delta}} \text{ [Hz]}.$$

De norm NBN B 03-003 bevat nog een andere formule, die iets gunstiger is voor lineaire elementen. Deze geeft overigens ook grenswaarden op voor de doorbuiging, waardoor het mogelijk is te voldoen aan het criterium van de minimale eigen frequentie van de ligger : 20 mm bij 3,5 Hz en 5 mm bij 7 Hz.

3.3 STAAL-BETONVLOERPLATEN

De staal-betonvloerplaten die aan bod komen in EC4 bestaan uit een betonnen vloerplaat die ter plaatse op een staalplaat (bekisting) ge-

stort wordt, zodanig dat er een samenwerkingseffect ontstaat tussen de twee materialen, in de richting van de ribben van de staalplaat (zie vorig artikel [42]).

De controle van staal-betonvloerplaten in de GGT betreft dezelfde aspecten als deze die behandeld werden bij staal-betonliggers : de beperking van de maximale doorbuiging, de controle van de scheurvorming en de beperking van de trillingen tijdens het gebruik. EC4 (§ 7) gaat dieper in op staal-betonvloerplaten.

3.3.1 CONTROLE VAN DE DOORBUIGING

In de eerste plaats dient men de maximale doorbuiging in de GGT te controleren voor de staalplaat die als bekisting gebruikt wordt. Vervolgens doet men hetzelfde voor de staal-betonvloerplaat. Dit gebeurt na de verharding van het beton en zodra het samenwerkende effect verzekerd is.

Vóór en tijdens het betonneren dient men de doorbuiging van de staalplaat die dienst doet als bekisting te beperken. EC4 (§ 7.5.2) geeft aan dat deze controle moet gebeuren door gebruik te maken van de karakteristieke belastingscombinatie. Hierbij moet rekening gehouden worden met het eigengewicht van de staalplaat en met het gewicht van het beton, maar niet met de voor de UGT bepaalde constructiebelastingen ⁽¹⁷⁾.

De maximale doorbuiging mag niet groter zijn dan $L/180$ of 20 mm (waarbij L de overspanning tussen twee steunpunten voorstelt en waarbij de eventuele onderstempelingen als steunpunten beschouwd worden). Als de doorbuiging in het midden van de staalplaat groter is dan $L/250$ of 20 mm, dient men bij de berekening van de staalplaat het ‘ponding’-effect ⁽¹⁸⁾ van de betonspecie in aanmerking te nemen, bijvoorbeeld door te veronderstellen dat



Wat zal veranderen met de Eurocodes EN

Het criterium met betrekking tot het ‘ponding’-effect zal anders uitgedrukt worden : het zal in aanmerking genomen worden indien de in de GGT berekende doorbuiging onder het eigengewicht van de staalplaat en de betonspecie groter is dan $1/10$ van de dikte van de staal-betonvloerplaat. In dit geval is de rekenregel (die erin bestaat het gewicht van het beton met een toeslag te vermeerderen) dezelfde als in de ENV.

⁽¹⁶⁾ De regels voor de herverdeling van de momenten voor de berekening van continue liggers in de UGT kwamen niet aan bod in het vorige artikel [42]. Dit berekeningsaspect zal behandeld worden in een derde deel, gewijd aan een aantal praktische rekenvoorbeelden. Voor meer gedetailleerde uitleg verwijzen we de lezer eveneens naar [44], [46] en [47].

⁽¹⁷⁾ Dit is logisch aangezien er geen enkele belasting mag aangrijpen op de vloerplaat zolang het beton niet verhard is.

⁽¹⁸⁾ Een uitgesproken ‘ponding’-effect tengevolge van de vervorming van de bekisting of van het element dat deze functie vervult, leidt tot een toename van het gewicht van het beton op de draagconstructie ten opzichte van het berekende theoretische gewicht.

de nominale dikte van het beton verhoogd wordt met 0,7δ over de volledige overspanning [44]. De berekening van de doorbuiging van de staalplaat gebeurt overeenkomstig de aanbevelingen uit deel 1-3 van Eurocode 3 [9], waarin onder andere vermeld staat welke meewerkende doorsnede van de staalplaat in rekening gebracht moet worden. De waarden van de meewerkende doorsnede van de staalplaten zijn doorgaans opgenomen in de technische documentatie van de fabrikanten.

De controle van de doorbuiging van de staalbetonvloerplaat gebeurt na de verwijdering van alle onderstempelingen en na de verharding van het beton. De specificaties uit § 7.6.2.2 van EC4 zijn van toepassing. De berekening van de doorbuiging kan verwaarloosd worden indien aan de volgende twee voorwaarden voldaan werd :

- de verhouding k van de overspanning van de vloerplaat over de dikte moet kleiner zijn dan de grenswaarden uit EC2 [46], met name :
 - $k \leq 25$ voor een eenvoudig opgelegde vloerplaat
 - $k \leq 32$ voor een spanwijdte aan de rand van een continue vloerplaat
 - $k \leq 35$ voor een spanwijdte in het midden van een continue vloerplaat.

De te beschouwen dikte van de vloerplaat bij de berekening van de verhouding k is de

meewerkende dikte, m.a.w. de afstand van de bovenzijde van de betonnen vloerplaat tot het zwaartepunt van de staalplaat [46]

- de verglijding aan de uiteinden van de overspanning tussen het beton en het staal kan verwaarloosd worden indien de glijbelasting (belasting, bepaald volgens gehomologeerde proeven, die een verglijding aan de uiteinden van 0,5 mm teweegbrengt) kleiner is dan 1,2 maal de gewenste gebruiksbelasting (EC4, § 7.6.2.2(9)).

Als de tweede voorwaarde niet vervuld is, kan men een eindverankering voorzien (zie EC4, § 7.1.2.2 of [42]), of de verglijding in rekening brengen bij de bepaling van de doorbuiging.

Indien de volledige berekening van de doorbuiging zich opdringt, kan men de invloed van de scheurvorming van het beton ter hoogte van de tussensteunpunten in aanmerking nemen op dezelfde manier als bij staal-betonliggers : de krachtenverdeling in de vloerplaat gebeurt met een ‘niet-gescheurde’ elastische berekening. Voor de herverdeling van de momenten vermindert men de momenten op de steunpunten met maximum 30 %.

De berekening van het traagheidsmoment van de equivalente doorsnede kan gebeuren volgens de methode uit EC4 (§ 7.6.2.2(5)).

3.3.2 CONTROLE VAN DE SCHEURVORMING

De scheurvorming in het beton van de vloerplaat moet enkel gecontroleerd worden aan de bovenzijde ervan en volgens EC2 [5].

Doorlopende vloerplaten kunnen berekend worden als vloerplaten met een isostatische spanwijdte. In dit geval (net zoals voor staalbetonliggers) beveelt EC4 aan om de zones van de vloerplaat met negatieve momenten te voorzien van forfaitaire minimale wapeningshoeveelheden (EC4, § 7.6.2.1) :

- 0,4 % van de betonoppervlakte boven de staalplaat voor een onderstempelde vloerplaat
- 0,2 % van de betonoppervlakte boven de staalplaat voor een vloerplaat zonder onderstempeling.

De minimale afstand tussen de staven in het beton boven de staalplaat moet bepaald worden volgens EC2, rekening houdend met de volle hoogte van de staal-betonvloerplaat.

3.3.3 BEPERKING VAN DE TRILLINGEN

De controle van de staal-betonvloerplaat ten opzichte van trillingen gebeurt net zoals voor staal-betonliggers (zie § 3.2.3, p. 9). ■



LITERATUURLIJST

• Normen beschikbaar bij het Belgisch Instituut voor Normalisatie (BIN) (*)

Rekenprincipes volgens de Eurocodes - Belastingen

1. NBN EN 1990 (2002) Eurocode. Grondslag voor constructief ontwerp.
2. NBN ENV 1991-1 (2002) Eurocode 1. Grondslag voor ontwerp en belastingen op draagsystemen. Deel 1 : Grondslag voor ontwerp samen met Belgische toepassingsrichtlijn (gehomologeerde versie + NTD).
3. NBN EN 1991-1-1 (2002) Eurocode 1. Belastingen op constructies. Deel 1-1 : Algemene belastingen. Dichtheden, eigen gewicht en opgelegde belastingen voor gebouwen.
4. NBN ENV 1991-2-1 (2002) Eurocode 1. Grondslag voor ontwerp en belasting op draagsystemen. Deel 2-1 : Belasting op draagsystemen. Dichtheden, eigengewicht en opgelegde belastingen samen met Belgische toepassingsrichtlijn (gehomologeerde versie + NTD).

Betonconstructies

5. NBN B 15-002 (1999) Eurocode 2. Berekening van betonconstructies. Deel 1-1 : Algemene regels en regels voor gebouwen.
6. NBN ENV 13670-1 (2000) Execution of concrete structures. Part 1 : Common.

Staalconstructies

7. NBN ENV 1090 (1997-2000) Uitvoering van stalen draagsystemen (6 delen).
8. NBN ENV 1993-1-1 (2002) Eurocode 3. Ontwerp van stalen draagsystemen. Deel 1-1 : Algemene regels en regels voor gebouwen samen met Belgische toepassingsrichtlijn (gehomologeerde versie + NTD).
9. NBN ENV 1993-1-3 (1997) Eurocode 3. Ontwerp van stalen draagsystemen. Deel 1-3 : Algemene regels. Aanvullende regels voor koudgeformde dunwandige profielen en platen.

Staal-betonconstructies

10. NBN ENV 1994-1-1 (2002) Eurocode 4. Ontwerp van gemengde staal-betondraagsystemen. Deel 1-1 : Algemene regels en regels voor gebouwen samen met Belgische toepassingsrichtlijn (gehomologeerde versie + NTD).
11. NBN ENV 1994-1-2 (2002) Eurocode 4. Ontwerp van gemengde staal-betondraagsystemen. Deel 1-2 : Algemene regels voor brandbeveiligend ontwerp samen met Belgische toepassingsrichtlijn.
12. NBN ENV 1994-2 (1998) Eurocode 4. Ontwerp van gemengde staal-betondraagsystemen. Deel 2 : Staal-betonbruggen.

Productnormen en proefnormen : cement en beton

13. NBN EN 197-1 (2000) Cement. Deel 1 : Samenstelling, specificatie en overeenkomstigheidscriteria voor gebruikelijke cementsoorten.
14. NBN EN 197-1/A1 (2004) Cement. Deel 1 : Samenstelling, specificatie en overeenkomstigheidscriteria voor gebruikelijke cementsoorten.

(*) Behalve de PTV 302 [27] tot en met 307 [33], gepubliceerd door OCBS (Organisme voor de Controle van Betonstaal.



LITERATUURLIJST (VERVOLG)

15. NBN EN 206-1 (2001) Beton. Deel 1 : Eisen, gedraging, vervaardiging en overeenkomstigheid.
16. NBN EN 206-1/A1 (2004) Beton. Deel 1 : Voorschriften, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit.
17. NBN B 15-001 (2004) Aanvulling op NBN EN 206-1. Beton. Eisen, gedraging, vervaardiging en overeenkomstigheid.
18. NBN EN 12350 (1999-2000) Beproeving van betonspecie (7 delen).
19. prEN 13791 Assessment of concrete compressive strength in structures or in structural elements.

Productnormen en proefnormen : wapeningsstaal

20. NBN ENV 10080 (1995) Staal voor betonwapening. Lasbaar geribd betonstaal B500. Technische leveringsvoorwaarden voor staven, rollen en gepuntlaste wapeningsnetten.
21. NBN A 24-301 (1986) Staalprodukten. Betonstaal. Staven, draden en gelaste wapeningsnetten. Algemeenheden en gemeenschappelijke voorschriften.
22. NBN A 24-302 (1986) Staalprodukten. Betonstaal. Gladde en geribde staven. Gladde en geribde walsdraad.
23. NBN A 24-303 (1986) Staalprodukten. Betonstaal. Gladde geribde koudvervormde draad.
24. NBN A 24-303/A1 (1990) Staalprodukten. Betonstaal. Gladde geribde koudvervormde draad.
25. NBN A 24-304 (1986) Staalprodukten. Betonstaal. Gelaste wapeningsnetten.
26. NBN A 24-304/A1 (1988) Staalprodukten. Betonstaal. Gelaste wapeningsnetten.
27. PTV 302 Gewapend betonstaal. Geribde warmgewalste staven en draad (Herziening 1). OCBS, 2002.
28. PTV 302/A1 Gewapend betonstaal. Geribde warmgewalste staven en draad. Addendum 1. OCBS, 2003.
29. PTV 303 Gewapend betonstaal. Geribde koudvervormde draad (Herziening 2). OCBS, 1998.
30. PTV 304 Gewapend betonstaal. Gelaste wapeningsnetten (Herziening 1). OCBS, 2004.
31. PTV 305 Gewapend betonstaal. Tralieliggers (Herziening 1). OCBS, 2000.
32. PTV 306 Bewerken van betonstaal (rechten, knippen, plooiën, schikken en lassen (Herziening 1). OCBS, 2002.
33. PTV 307 Gewapend betonstaal. Geribde staven. Alternatief profiel (Herziening 1). OCBS, 2003.

Productnormen en proefnormen : constructiestaal

34. NBN EN 10025 (1993) Warmgewalste producten van constructiestaal. Technische leveringsvoorwaarden (bevat het amendement A1 van 1993)
35. NBN EN 10149 (1995) Warmgewalste platte produkten gemaakt van staalsoorten met een hoge vloeigrens voor koudvervormen (3 delen).
36. NBN EN 10164 (1993) Produkten van staal met verbeterde vervormingseigenschappen loodrecht op het produktoppervlak. Technische leveringsvoorwaarden.
37. NBN EN 10210-1 (1995) Warm vervaardigde buisprofielen voor constructiedoeleinden van ongelegeerd en fijnkorrelig constructiestaal. Deel 1 : Technische leveringsvoorwaarden.
38. NBN EN 10219-1 (1997) Koudvervaardigde gelaste buisprofielen voor constructiedoeleinden van ongelegeerd en fijnkorrelig constructiestaal. Deel 1 : Technische leveringsvoorwaarden.

Productnormen en proefnormen : verbindingsmiddelen

39. NBN EN ISO 13918 (1999) Lassen. Bouten en keramische ringen voor boogboutlassen (ISO 13918:1998).

Andere normen

40. NBN B 03-003 (2003) Vervormingen van draagsystemen. Vervormingsgrenswaarden. Gebouwen.

• Artikels verschenen in WTCB-Tijdschrift en in de WTCB-Dossiers

41. Parmentier B. en Delincé D.
Ontwerp en dimensionering van constructies volgens Eurocode 0 (EN 1990) (Normen en Reglementen). WTCB-Tijdschrift, winter 2003.
42. Parmentier B. en Martin Y.
Staal-betondraagconstructies. Deel 1 : ontwerp bij uiterste grenstoestand volgens Eurocode 4 (Normen en Reglementen). WTCB-Tijdschrift, winter 2002.
43. Pollet V., Apers J. en Desmyter J.
Nieuwe normen voor beton. Deel 1 : nieuwe versie van de norm NBN B 15-001. WTCB-Dossiers, Katern 4, nr. 2004/3.

• Naslagwerken met betrekking tot de dimensionering van staal-betonconstructies

44. Association pour la promotion de l'enseignement de la construction acier (APK)
Construction métallique et mixte acier-béton. Tome 1. Calcul et dimensionnement selon les Eurocodes 3 et 4. Editions Eyrolles, 1996.
45. Johnson R. P. en Anderson D.
Designers' Guide to EN 1994-1-1. Eurocode 4 : Design of composite steel and concrete structures. Part 1.1 : General rules and rules for buildings. Londen, Thomas Telford, 2004.
46. Johnson R. P. en Anderson D.
Designers' Handbook to Eurocode 4. Part 1.1 : Design of composite steel and concrete structures. Londen, Thomas Telford, 1993.
47. Schleich J. B., Mathieu J. en Conan Y.
Manuel de calcul selon l'Eurocode 4 des bâtiments contreventés en ossature mixte acier-béton. Brussel, Convention européenne de la construction métallique (CECM), nr. 96, 2000.

• Andere

48. Wang Y. C. et Moore D. B.
A design method for concrete-filled hollow section, composite columns. Londen, The Structural Engineer, volume 75, nr. 21, 1997.