

## Notat

Sag	Udvikling Konstruktioner	Projektnr..	17681
Projekt	BEF-PCSTATIK	Dato	2009-03-03
Emne	Krav til duktilitet – fremtidig praksis for betonelementbyggeri.	Initialer	JFJ

### Indledning

Overordnet set omfatter en konstruktionsanalyse:

- opdeling af konstruktionen i konstruktionselementer
- fastlæggelse af belastningerne på de enkelte konstruktionselementer
- eftervisning af det enkelte konstruktionselements modstandsevne.

EC2 anfører i kapitel 5 begrænsninger for hvornår der kan anvendes plastisk analyse. Disse begrænsninger tager ikke sigte på de metoder, der iht. til selvsamme norm anvendes til eftervisning af konstruktionselementers modstandsevne. Der er alene tale om begrænsninger for, hvornår plastisk analyse kan anvendes til fastlæggelse af den overordnede fordeling af lastvirkninger. Dette har dermed kun relevans for statisk ubestemte konstruktioner.

I det danske nationale annekse er begrænsninger til dels også udstrakt til at gælde for metoderne til eftervisning af de enkelte konstruktionselementers modstandsevne. Dette giver god mening i meget store konstruktioner, hvor konstruktionselementer er helt ude af skala med de laboratorieforsøg der ligger bag beregningsmetoderne. Til gengæld er det oplagt unødvendigt, hvor erfaringer fra laboratoriet kan overføres meget direkte til de virkelige konstruktioner.

Ved introduktion af nye normsæt, der som EC2 er bredt dækkende for talrige typer af konstruktioner, er det naturligt at anlægge en forsigtig overordnet synsvinkel. Det er først via den senere anvendelse af normsættet ved beregning af eksempelvis broer, tunneller, bassiner, fundering, støttemure samt små og store bygninger at der udvikles en anerkendt praksis på det enkelte område.

Nærværende notat rummer anbefalinger til fremtidig praksis ved konstruktionsanalyser af sædvanlige betonelementbyggerier, hvor betonelementerne produceres med armering i klasse A-stål.

#### ALECTIA A/S

Teknikerbyen 34  
2830 Virum  
Denmark  
Tlf.: +45 88 19 10 00  
Fax: +45 88 19 10 01

CVR nr. 22 27 89 16

www.alectia.com  
jff@alectia.com

## Fastlæggelse af belastninger på elementer

Ved fastlæggelse af belastningerne på de enkelte elementer skelnes i denne forbindelse mellem 3 hovedtilfælde:

1. Statisk bestemte elementer
2. Elementer, der er stift forbundne i knudepunkter
3. Elementer, der er plastisk forbundne i knudepunkter

Med henblik på generel anvendelse af klasse A-stål som elementarmering kan for de 3 hovedtilfælde tages udgangspunkt i følgende:

1. De statisk bestemte elementer omfatter hovedparten af betonelementerne. Her har udformningen ingen indflydelse på lastvirkningerne. Ubestemtheden i eksempelvis reaktionsfordelingen under sædvanlige huldæk eller vægelementer er uden praktisk betydning. Krav til armeringens duktilitet hænger derfor alene sammen med de valgte metoder til eftervisning af de enkelte elementers modstandsevne.
2. Elementer, der er stift forbundne i knudepunkter, er forholdsvis sjældent forekommende. Disse må behandles i deres aktuelle sammenhæng som en statisk ubestemt konstruktion. Det forudsættes at lastvirkningerne i snitfladerne mellem elementerne bestemmes ved en overordnet lineær elastisk model, hvorefter krav til armeringens duktilitet er som ved de statisk bestemte elementer.
3. Elementer, der er plastisk forbundne i knudepunkter, er typisk elementer der indgår i det stabiliserende system med koblinger i form af stødjern, udragende bøjler eller lignende. I forhold til elementernes styrke er lastvirkningen på det enkelte element fra disse koblinger sædvanligvis beskeden. Dermed er det af afgørende betydning, at disse koblinger i sig selv besidder en betydelig plastisk deformationskapacitet for at sikre, at den forudsatte overordnede lastfordeling i det stabiliserende system kan etableres uden sprødbrud i koblingerne undervejs. Under forudsætning af at lastvirkningerne svarende til disse koblingers brudstyrke med passende sikkerhed kan optages lokalt i elementet uden flydning i den egentlige elementarmering, vil elementerne kunne dimensioneres efter samme regler som statisk bestemte elementer, blot med lastvirkningerne fra koblingerne påsat som ydre laste.

Med dette udgangspunkt vil EC2's regler om rotationskapacitet og armeringskvaliteter ved brug af plastisk analyse ikke være relevant for den egentlige elementarmering i nogen af de tre hovedtilfælde.

## Eftervisning af fugearmering og koblingers modstandsevne

Elementbygningers sammenhæng sikres traditionelt via lodret og vandret fugearmering suppleret med særlige koblinger mellem elementer og fugearmering eller mellem elementer indbyrdes.

Fugearmeringen og koblingerne kendetegnes typisk ved ret begrænsede modstandsevner i forhold til elementernes modstandsevne. Dette svarer således til hovedtilfælde 3 i det foregående.

I det omfang fugearmering eller koblinger disponeres direkte med henblik på at sikre bygningens stabiliserende system eller bygningens robusthed må der stilles krav om, at både fugearmering og koblinger udføres med god, plastisk deformationskapacitet.

Dette skyldes, at det forudsatte stabiliserende system i brudgrænsetilstanden kræver, at koblinger og fugearmering fungerer samtidig mange steder i bygningen. En del af koblingerne og fugearmeringen vil træde i funktion tidligt i forhold til andre dele, der først begynder og virke efterhånden som bygningens overordnede deformationsfigur udvikler sig. Under denne proces skal de først aktive dele kunne tåle betydelige tvangsdeformationer uden brud.

Konklusionen heraf er at:

- al fugearmering skal mindst være klasse B-stål
- koblinger, der medvirker til sikring af bygningens stabiliserende system eller robusthed, skal udføres med bøjler eller ankerjern i mindst klasse B-stål; med mindre der anvendes standardløsninger med dokumenteret plastisk deformationskapacitet på mindst 20 mm
- lastvirkninger svarende til flydning i koblingers bøjler eller ankerjern må ikke kunne fremkalde brud i tilstødende bygningsdele, svejsesamlinger etc.

For koblinger, der i brudstadiet tjener til at sikre samvirken mellem eksempelvis elementer indbyrdes eller mellem elementer og pladsstøbt beton, gælder samme krav. Kravene omfatter til gengæld ikke koblinger i form af øjeboltsamlinger mv., der alene tjener til at kontrollere revneudvikling i fuger mellem elementer.

For koblinger, der skal sikre stiv forbindelse mellem elementer i knudepunkter i en statisk ubestemt konstruktion svarende til hovedtilfælde 2, forudsættes som nævnt snitkraftbestemmelse efter den lineære elasticitetsteori. Dermed er disse koblinger ikke omfattet af normens særlige regler vedrørende anvendelse af plastisk analyse.

## Eftervisning af elementers modstandsevne

EC2 stiller som udgangspunkt ikke særlige krav til armeringens duktilitet i forbindelse med metoder til eftervisning af elementernes modstandsevne.

Der er heller ikke formuleret særlige krav til de enkelte elementers plastiske deformationskapacitet. Tværtimod tillades uden begrænsninger af den art uarmerede vægelementer etc. med brudformer af udpræget sprød karakter. Hensyn til brudformen optræder alene ved fastlæggelsen af partialkoefficienterne.

Det nationale annekst introducerer i pkt. 6.2.3 (2) og 6.2.4 (4) et særligt dansk krav om, at forskydningsarmering i form af klasse A-stål kun må anvendes under forudsætning af, at der er sikret tilstrækkelig translationskapacitet til at et forskydningsbrud kan udvikles som forudsat i forskydningsberegningen. Det anføres, at dette kan forventes at være opfyldt, hvis  $\cot\theta$  vælges til den værdi, der giver den optimale armering, hvilket for ren forskydning svarer til  $\cot\theta = 1$ .

I praksis eksisterer ren forskydning ikke. Der vil altid samtidig med forskydningspændingerne i et felt opbygges tryk- og trækspændinger i tilgrænsende tryk- og trækzoner, ofte betegnet stringerne. I en sædvanlig, simpelt understøttet bjælke betyder dette samspil mellem bøjlearmering og trækarmring, at man ved energianalyse ledes til, at det ved forskydningsdimensioneringen vil være på den sikre side at begrænse betontrykhældningen svarende til følgende krav:

$$\cot\theta \leq 2 \sqrt{f_{ys} / f_{yL}}$$

hvor  $f_{ys}$  og  $f_{yL}$  er henholdsvis bøjlearmeringens og længdearmringens flyde-spænding. Under denne forudsætning vil både bøjler og længdearmring kunne udføres i klasse A-stål, når de overordnede forudsætninger for snitkraftbestem-melsen i øvrigt er opfyldt. For en ordens skyld bemærkes, at  $\cot\theta$  fortsat ikke må vælges, så der er risiko for trykbrud i bjælkekroppen.

Det skal samtidig bemærkes, at almindeligt forekommende betonelementer i byggeriet har en skala på niveau med, hvad der er erfaringer med i laboratorierne. Ved laboratorieforsøg med forskydnings- eller vridningspåvirkede betonbjælker belastet til brud er der ikke rapporteret så store tøjninger i armeringen, at det på nogen måde fordrer stål kvalitet med flydekapacitet over 2,5 %. Da normens metoder til eftervisning af elementernes modstandsevne netop er baseret på laboratorieforsøgene, kan ovennævnte anbefaling til begrænsning af betontrykhældningen anses for ret konservativ.

I visse tilfælde med mere komplekse kraftforløb i elementets skiveplan eftervises modstandsevnen ved anvendelse af stringermetoden. I så fald bør der generelt som forudsætning for at benytte klasse A-stål ved fastlæggelsen af kraftforløbet anvendes en energimetode for at undgå løsninger, der fordrer uforholdsmæssigt store plastiske omlejringer af kræfterne i elementet, før den forudsatte statiske model er aktiveret.

## Konklusion

Konklusionen af ovenstående er, at der i sædvanlige betonelementbyggerier generelt kan anvendes klasse A-stål i betonelementerne under forudsætning af:

- At der ved koblinger, der medvirker til sikring af bygningens stabiliserende system eller robusthed, er indlagt armering i elementet der med god sikkerhed mod flydning kan optage lastvirkninger svarende til flydning i koblingernes bøjler eller ankerjern
- At der til indstøbte bøjler eller ankerjern ved koblinger, der medvirker til sikring af bygningens stabiliserende system eller robusthed, mindst anvendes stål i kvalitet som klasse B, eller at der til sikring af forskydningsoptagelse i vægfuger anvendes standardløsninger med dokumenteret plastisk deformationskapacitet på mindst 20 mm.
- At der ved brug af stringermetoden eller tilsvarende, plastiske kraftfordelingsmodeller anvendes en energimetode til sikring af løsninger med begrænsede krav til de plastiske omlejringer.

For konstruktioner i konsekvensklasse CC3, hvor konsekvenserne af svigt er særlig alvorlige, bør sammenhængen mellem kravene til materialer/udførelse og de anvendte beregningsmodeller præciseres konkret i den enkelte opgave. Som eksempler på disse konstruktioner kan nævnes samme som i punkt B4 (5) i det nationale annekst til EC0.

ALECTIA A/S

Jesper Frøbert Jensen

Virum

Direkte tlf. 88191572