

Tvärkraftsdimensionering

Jämförelser mellan olika normer

FÖRORD

I denna rapport jämförs regler för tvärkraftsdimensionering av betongkonstruktioner, med speciell inriktning på broar. De normer som jämförs är

- svensk: BBK 94 + BRO 94
- europeisk: Eurocode 2 (prEN 1992-1-1, July 2002) Design of concrete structures
- tysk: DIN 1045-1 (juli 2001) Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton
- brittisk: BS 5400-4:1990 Code of practise for design of concrete bridges
- amerikansk: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 1998

Beträffande europeiska och tyska normer saknas f.n. speciella broregler. Därför används här de allmänna reglerna. För EC2 används den version våren 2002 som ligger närmast den slutliga version som kommer att presenteras för CEN i juli 2002.

Framställningen är i första hand inriktad på brottgränstillstånd. När det gäller bruksgränstillstånd och tvärkraft är alla de undersökta normerna mycket knapphändiga.

Utredningen har beställts av Vägverket, Bro och Tunnel.

Stockholm 2002-05-13

Bo Westerberg

INNEHÅLL

1 Allmänt	4
1.1 Beteckningar	4
2 Beräkningsmodeller för brottgränstillstånd	4
2.1 Allmänt	4
2.2 BBK 94 + BRO 94	5
2.2.1 Allmänt	5
2.2.2 Bärförmåga	5
2.2.3 Skjuvarmeringens kapacitet	6
2.2.4 Övre gräns m.h.t. livtryckbrott	6
2.2.5 Minimiarmering	7
2.3 EC2 7	
2.3.1 Allmänt	7
2.3.2 Bärförmåga utan skjuvarmering	7
2.3.3 Bärförmåga med skjuvarmering	8
2.3.4 Övre gräns m.h.t. livtryckbrott:	9
2.3.5 Alternativ	9
2.3.6 Minimiarmering	9
2.4 DIN 9	
2.4.1 Allmänt	9
2.4.2 Bärförmåga utan skjuvarmering	10
2.4.3 Bärförmåga med skjuvarmering	10
2.4.4 Övre gräns m.h.t. livtryckbrott	10
2.4.5 Minimiarmering	10
2.5 BS 11	
2.5.1 Allmänt	11
2.5.2 Bärförmåga utan skjuvarmering	11
2.5.2.1 Slakarmerade konstruktioner	11
2.5.2.2 Spännarmerade konstruktioner	11
2.5.3 Skjuvarmering	12
2.5.3.1 Slakarmerade konstruktioner	12
2.5.3.2 Spännarmerade konstruktioner	12
2.5.4 Minimiarmering	12
2.6 AASHTO	12
2.6.1 Allmänt	12
2.6.2 Tvärkraftskapacitet	13
2.6.3 Bestämning av parametrarna β och θ	13
2.6.4 Minimiarmering	14
3 Beräkningsexempel	15
3.1 Exempel 1	15
3.1.1 BBK 94	15
3.1.2 EC2	15
3.1.3 DIN	15
3.1.4 BS	15
3.1.5 AASHTO	16
3.1.6 Sammanställning	16
3.2 Exempel 2	17

3.2.1	BBK 94 + BRO 94	17
3.2.2	EC2	18
3.2.3	DIN	18
3.2.4	BS	18
3.2.5	AASHTO	19
3.2.6	Sammanställning	19
4	Parameterstudier	20
4.1	Tvärsnitt utan skjuvarmering	20
4.1.1	Inverkan av armeringsinnehåll	20
4.1.2	Inverkan av förspänning	23
4.2	Tvärsnitt med skjuvarmering	24
4.2.1	T-tvärsnitt	24
4.2.2	Lådtvärsnitt	25
5	Kommentarer	26
5.1	Tvärsnitt utan skjuvarmering	26
5.2	Tvärsnitt med skjuvarmering	26
6	Bruksgränstillstånd	29
6.1	BBK 94 + BRO 94	29
6.2	EC2	29
6.3	DIN	29
6.4	BS	29
6.5	AASHTO	29
7	Referenser	30
8	Bilaga. Diagram ur AASHTO LRFD	31

1 Allmänt

1.1 Beteckningar

I de olika normerna används delvis olika beteckningssystem. Här används så långt möjligt samma beteckningar för samma begrepp, med EC2 som utgångspunkt. För begrepp som är speciella för en viss norm används originalbeteckningar. Alla beteckningar förklaras på plats första gången de används.

I det följande används förkortade benämningar på de olika normerna: **BBK** [1], **BRO 94** [2], **EC2** [3], **DIN** [4], **BS** [5] samt **AASHTO** [6].

2 Beräkningsmodeller för brottgränstillstånd

2.1 Allmänt

För dimensionering av skjuvarmering finns två huvudprinciper:

- Additionsprincipen (betongbidrag + armeringsbidrag vid 45° trycksträvslutning)
- Fackverksmodell med variabel trycksträvslutning (inget betongbidrag men lutning $\leq 45^\circ$)

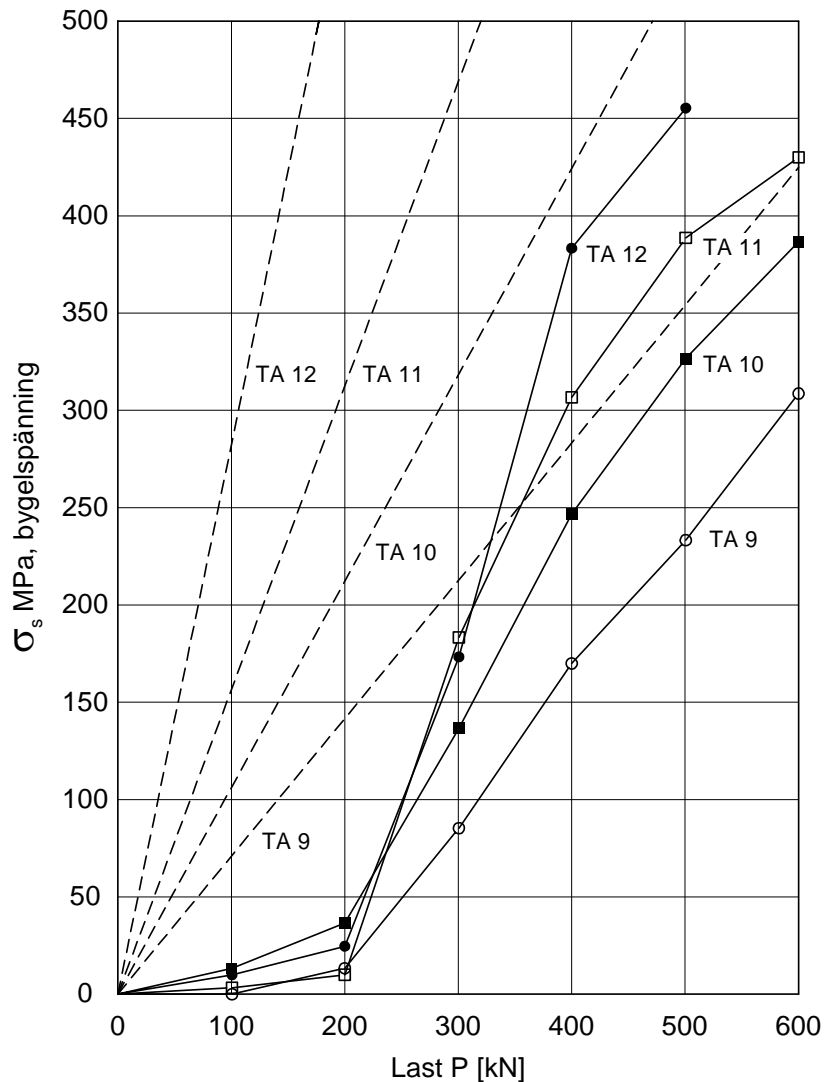
I vissa normer används den ena, i andra den andra modellen. Man kan om man så vill se båda modellerna som olika variationer på samma tema: additionsprincipen som en indirekt metod att bestämma lutningen på trycksträvorna i fackverksmodellen, och fackverksmodellen med lutningar $< 45^\circ$ som ett sätt att indirekt beakta betongens bidrag i ett 45°-fackverk.

Additionsprincipen har gamla anor, och fanns redan i gamla B7, i form av ”metod B”. Bakgrunden illustreras i figur 1, hämtad från [11]. Streckade linjer visar bygelspänningar beräknade för ett fackverk med 45° trycksträvslutning. Heldragna linjer visar uppmätta spänningar. Dessa följer samma lutning som de beräknade, men förskjutna ett stycke = skjuvspricklasten, eller brottlasten utan skjuvarmering. Brottlasten *med* skjuvarmering blir då lika med skjuvspricklasten + den last för vilken byglarna flyter enligt 45°-modellen, vilket är just vad additionsprincipen säger. Detta är verifierat även för förspända konstruktioner; skjuvspricklasten höjs då på grund av spännkraften och brottlasten höjs i motsvarande grad. Detta är bakgrunden till exempelvis termen V_p i BBK och motsvarande term i BS.

Metoden är empirisk, och gör inte anspråk på att beskriva hur det verkligen fungerar vid tvärkraftsbrott (i det avseendet är fackverksmodellen i regel bättre, åtminstone vid stor tvärkraftspåverkan). Det empiriska underlaget är omfattande, även om det saknas fullskaleförsök på riktigt stora konstruktioner av typ broar. Denna reservation gäller självfallet alla modeller i lika hög grad.

En nyare modell, som utgör grund för den metod som f.n. används i AASHTO, är den s.k. modifierade tryckfältsteorin [7, 8]. Om man så vill kan man se den som en kombination av de båda tidigare modellerna. Den torde vara den f.n. mest realistiska modellen.

De olika modellerna i sina aktuella tillämpningar beskrivs närmare i det följande. För närmare beskrivning av BBK:s tillämpning av additionsprincipen och EC2:s tillämpning av fackverksmodellen, se [10].



Figur 1. Balkar med T-tvårsnitt, flänsbredd 960 mm, livbredd 160 mm och effektiv höjd 375 mm, böj-
armering 6φ 24. Byglar s
113 mm, φ 12, 10, 8 resp 6
mm. Betong ca K30. [11].

2.2 BBK 94 + BRO 94

2.2.1 Allmänt

BBK 94 [1] använder additionsmodell, där kapaciteten beräknas som summan av ”betongens kapacitet” $V_c + V_p$ ¹ och ”skjuvarmeringens kapacitet” V_s , den senare definierad för ett fackverk där trycksträvorna lutar 45°. Dessutom tillkommer en term V_i som beaktar lutande spännkraft och/eller lutande tryck- eller dragzon.

2.2.2 Bärförmåga

Tvärkraftskapaciteten är enligt BBK 94

$$V_{Rd} = V_c + V_p + V_i + V_s \quad (1)$$

I detta uttryck är ”betongens tvärkraftskapacitet”

¹ I BBK skrivs inte V_p ut som en separat term, utan förutsätts ingå i V_c

$$V_c = b_w d f_v \quad (2)$$

där

b_w = balklivets minsta bredd inom effektiva höjden

d = effektiv höjd

f_v = formell skjuvhållfasthet, se nedan

$$f_v = \xi (1 + 50\rho) 0,3 f_{ct} \quad (3)$$

där

ξ = 1,4 för $d \leq 0,2$ m

= 1,6 - d för $0,2 < d \leq 0,5$ m

= 1,3 - 0,4d för $0,5 < d \leq 1,0$ m

= 0,9 för $1,0 < d$

f_{ct} = dimensionerande draghållfasthet för betong

Bidraget från spännkraft eller tryckande normalkraft är

$$V_p = \frac{1}{1,2\gamma_n} \left(\frac{M_0}{M_d} \right)_{\min} \cdot V_d \quad (4)$$

där

M_d = böjande moment av yttre last

M_0 = nolltöjningsmoment, dvs det moment som tillsammans med spännkraften eller den yttre normalkraften ger nolltöjning på dragsidan

$\left(\frac{M_0}{M_d} \right)_{\min}$ = minsta värdet på kvoten M_0/M_d inom aktuell balkdel (del mellan momentnollpunkt och momentmaximipunkt)

Summan $V_c + V_p$ begränsas m.h.t. livskjuvbrott till

$$V_{cw} = b_w d (f_{ct} + 0,3\sigma_{cm}) \quad (V_{cw} \text{ är egen beteckning}) \quad (5)$$

V_i är bidrag från lutande spännkraft eller lutande tryck- eller dragzon. Det kan vara positivt eller negativt beroende på kraftriktning och lutningsriktning. Detta behandlas på likartat sätt i alla de studerade normerna, och kommenteras därför inte närmare i det följande.

2.2.3 Skjuvarmeringens kapacitet

Skjuvarmeringens bidrag till bärförmågan i additionsmodellen är

$$V_s = A_{sv} f_{sv} \frac{z}{s} \quad \text{vilket ger erforderlig area} \quad \frac{A_{sv}}{s} = \frac{V_s}{z \cdot f_{sv}} \quad (6)$$

där z = inre hävarm $\approx 0,9d$

2.2.4 Övre gräns m.h.t. livtryckbrott

Livtryckbrott ger en övre gräns för bärförmågan, oberoende av skjuvarmering:

$$V_d - V_i \leq 0,25 b_w d f_{cc} \quad (7)$$

2.2.5 Minimiarmering

Här redovisas endast minimiskjuvarmering (area per längdenhet) enligt BRO 94 [2]:

$$A_{sv,min} = 0,0015 \cdot b_w, \text{ för lådbalk dock } 0,003 \cdot b_w \quad (8)$$

2.3 EC2

2.3.1 Allmänt

I den kommande EN-versionen av EC2 [3] har tvärkraftsdimensioneringen reviderats ganska kraftigt jämfört med tidigare ENV-version (ENV 1992-1-1:1991).

För kapaciteten utan skjuvarmering användes tidigare ett uttryck ganska likt det i BBK, men i den nya versionen används samma modell som i MC90 [9]. Anledningen till denna ändring är att dimensioneringsreglerna i EN-versionen utvidgats till att även gälla för höghållfast betong (upp till C90). Den tidigare formeln var baserad på betongens draghållfasthet, dvs tryckhållfasthet^(2/3), vilket gav för höga värden vid hög hållfasthet². Den nya är liksom i MC90 baserad på tryckhållfasthet^(1/3).

För dimensionering av skjuvarmering fanns i ENV-versionen två alternativa metoder: ”standardmetod” (= additionsmetod), samt fackverksmetod med variabel trycksträvslutning. I EN-versionen har man slopat standardmetoden till förmån för fackverksmodellen. Anledningen är inte att det skulle vara något känt fel på additionsmodellen, utan snarare att många länder ansåg att man inte kunde ha två alternativa metoder i en norm. Att valet då föll på fackverksmodellen berodde på att det är den modell som används i MC90, samt att metoden bygger på en begriplig mekanisk modell, vilket har klara pedagogiska fördelar. Se även [10].

I ENV-versionen av fackverksmodellen fanns ingen som helst inverkan av förspänning. Denna brist är avhjälpt i EN-versionen, genom att kapaciteten för livtryckbrott gjorts beroende av förspänning eller annan tryckkraft. Övre gränsen för lutningen, $\cot\theta \leq 2,5$, är dock densamma oavsett förspänning, vilket är en begränsning på säkra sidan (MC90 rekommenderar $\cot\theta \leq 3$ oavsett förspänning). Begränsningen av $\cot\theta$ är dock en s.k. NDP (nationally determined parameter), som varje land kan välja själv; det gäller även siffran 0,12 i ekv. (9).

2.3.2 Bärförmåga utan skjuvarmering

a) Inom böjsprucket område:

$$V_{Rd,ct} = \left(0,12k(100\rho_1 f_{ck})^{1/3} + 0,15\sigma_{cp} \right) b_w d \quad (9)$$

där

² I BBK har detta istället beaktats på så sätt att låga värden anges för draghållfastheten i högre hållfasthetsklasser

$$k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2,0$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w d}$$

A_{sl} = area för längsarmering

b_w = minsta tvärsnittsbredd inom dragzonen

d = effektiv höjd

f_{ck} = karakteristisk tryckhållfasthet för betongen

$$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c$$

N_{Ed} = normalkraft av yttre last eller förspänning, positiv vid tryck

A_c = betongarean

För snitt inom ett avstånd av $2,5d$ från upplag kan tvärkraftskapaciteten ökas.

b) Inom icke böjsprucket område:

$$V_{Rd,ct} = \frac{I \cdot b_w}{S} \sqrt{f_{ctd}^2 + \alpha_1 \sigma_{cp} f_{ctd}} \quad (10)$$

där

I = tröghetsmoment

S = statiskt moment av area på ena sidan tyngdpunktsaxeln

α_1 = l_x/l_{pt2} för vidhäftningsförankrad (förespänd) armering, = 1,0 för ändförankrad (efter-spänd) armering

l_x = avstånd från aktuellt snitt till överföringssträckans början

l_{pt2} = övre dimensioneringsvärde för överföringssträckan vid förespänd armering

$\sigma_{cp} = N/A_c$, N = normalkraft eller spännkraft (positiv vid tryck)

Tvärkraftskapacitet enligt ovan behöver inte kontrolleras närmare upplag än den punkt där tyngdpunktsaxeln skärs av en 45° linje från upplagets innerkant.

2.3.3 Bärförmåga med skjuvarmering

EC2 använder en renodlad fackverksmodell, där hela tvärkraften tas av den skjuvarmering som skär en tänkt skjuvspricka med en lutning som är $\leq 45^\circ$. Sprickornas lutning motsvarar lutningen för fackverkets trycksträvor.

Skjuvarmeringens kapacitet:

$$V_{Rd,sy} = A_{sw} f_{ywd} \frac{z \cot \theta}{s} \quad (11)$$

Gränser för trycksträvornas (sprickornas) lutning:

$$1 \leq \cot \theta \leq 2,5 \quad (12)$$

2.3.4 Övre gräns m.h.t. livtryckbrott:

$$V_{Rd,max} = \alpha_c \frac{b_w z v f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (13)$$

$$\alpha_c = \min [(1 + \sigma_{cp}/f_{cd}) ; 1,25 ; 2,5(1 - \sigma_{cp}/f_{cd})] \quad (14)$$

där

σ_{cp} = N/A_c , N = normalkraft eller spännkraft (positiv vid tryck)

z = inre hävarm; kan sättas till $0,9d$

v = $0,6(1 - f_{ck}/250)$

θ = lutning för trycksträvor i fackverksmodell

2.3.5 Alternativ

EC2 ger en alternativ möjlighet att utnyttja högre tryckhållfasthet för betongen, med $v = 0,6$, om man samtidigt bara utnyttjar 80 % av skjuvarmeringens kapacitet. Detta alternativ kan ses som att man utnyttjar en högre grad av plasticering i betongen, i utbyte mot en lägre grad för skjuvarmeringens del. Det kan löna sig att använda vid hög tvärkraft, dvs ge mindre skjuvarmering. Alternativt kan det utnyttjas för att möjliggöra tunnare balkliv.

2.3.6 Minimiarmering

$$A_{sw,min} = \frac{0,08 \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \cdot b_w \quad (\text{area per längdenhet}) \quad (15)$$

2.4 DIN

2.4.1 Allmänt

Den nya DIN-normen [4] är i stor utsträckning direkt baserad på EC2. Det betyder för tvärkraftsdimensioneringens del att man använder fackverksmodell med varierande lutning, som kan väljas inom vissa gränser. Gränserna definieras dock annorlunda än i EC2. För icke skjuvarmerade konstruktioner används samma formler som i EC2, men i vissa fall med lägre koefficienter.

I tidigare DIN-norm skiljde man på slakarmerade och spännarmerade konstruktioner.

För slakarmerade konstruktioner dimensionerades skjuvarmering enligt ett 45°-fackverk, och med varierande "skjuvtäckning" beroende på skjuvspänningens storlek. Detta kan även ses som att man varierade trycksträvornas lutning i fackverket, från 45° vid hög skjuvspänning ner till 21,8° vid låg skjuvspänning ($\tan \theta = 0,4$ eller $\cot \theta = 2,5$, svarande mot 40% skjuvtäckning).

För spännarmerade konstruktioner användes fackverksmodell med en lutning, som bestämdes entydigt av skjuvspänningens storlek och lutningen hos huvudtryckspänningen i osprucket stadium; det senare gav en inverkan av förspänning. Eftersom lutningen var bestämd kan man inte tala om en fackverksmodell med variabel trycksträvslutning.

2.4.2 Bärförmåga utan skjuvarmering

DIN använder samma formler som EC2, men med lägre koefficienter för böjskjuvbrott:

$$V_{Rd,ct} = \left(0,10k(100\rho_l f_{ck})^{1/3} + 0,12\sigma_{cp}\right) b_w d \quad (16)$$

För icke böjsprucket område (livskjuvbrott) gäller samma formler som i EC2.

2.4.3 Bärförmåga med skjuvarmering

Fackverksmodell enligt EC2, dock med annan begränsning av trycksträvornas lutning:

$$0,58 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2 + 1,4\sigma_{cp} / f_{cd}}{1 - V_{Rd,c} / V_{Ed}} \leq 3,0 \text{ (för lättballastbetong 2,0)} \quad (17)$$

$$V_{Rd,c} = \beta_{ct} \cdot 0,10 \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} \left(1 - 1,2 \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) \cdot b_w d \quad (18)$$

där

$$\beta_{ct} = 2,4$$

$$\eta_1 = 1,0 \text{ (lägre för lättballastbetong)}$$

Som förenkling godtas att man sätter $\cot \theta = 1,2$ (med eller utan tryckkraft; vid dragkraft 1,0).

2.4.4 Övre gräns m.h.t. livtryckbrott

$$V_{Rd,max} = \alpha_c \frac{b_w v f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (19)$$

där $\alpha_c = 0,75 \eta_1$ ($\eta_1 = 1,0$ för normalbetong, lägre för lättballastbetong)

Observera att α_c här har en annan betydelse än α_c i EC2. Här ingår en reduktion motsvarande faktorn v , men ingen explicit inverkan av förspänning; den senare beaktas istället via övre gränsen för $\cot \theta$. Värdet på α_c blir alltid högre i DIN (i EC2 blir $\alpha_c \cdot v$ alltid $< 1,25 \cdot 0,6 = 0,75$).

2.4.5 Minimiarmering

$$A_{sw,min} = \frac{0,16 f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_w \quad (20)$$

(area per längdenhet; f_{ctm} = medelvärde för betongens draghållfasthet)

2.5 BS

2.5.1 Allmänt

BS [5] använder en ren additionsmodell av samma typ som i BBK. Slakarmerade och spännarmerade konstruktioner behandlas var för sig och med vissa skillnader, dock enligt samma grundprincip. Spännkraft beaktas på likartat sätt som i BBK, men i M_{cr} (23), som motsvarar BBK:s M_0 (4), utnyttjas här även betongens draghållfasthet.

2.5.2 Bärförmåga utan skjuvarmering

2.5.2.1 Slakarmerade konstruktioner

$$v_c = \frac{0,27}{\gamma_m} \left(\frac{100A_s}{b_w d} \right)^{1/3} f_{cu}^{1/3} \quad (21)$$

där

v_c = betongens skjuvhållfasthet

f_{cu} = betongens karakteristiska kubhållfasthet, ≤ 40

$\gamma_m = 1,25$

Ovanstående uttryck liknar uttrycken för $V_{Rd,ct}$ enligt EC2 och DIN. Koefficienten $0,27/\gamma_m = 0,22$ är dock betydligt högre. Om man dessutom beaktar att BS använder kubhållfasthet f_{cu} istället för cylinderhållfasthet f_{ck} blir den jämförbara koefficienten 0,23. Dock begränsas inverkan av betonghållfasthet här till $f_{cu} \leq 40$.

2.5.2.2 Spännarmerade konstruktioner

a) Böjsprucket:

$$V_{cr} = 0,037 \cdot b_w d \sqrt{f_{cu}} + \frac{M_{cr}}{M} \cdot V \geq 0,1 \cdot b_w d \sqrt{f_{cu}} \quad (22)$$

$$M_{cr} = (0,37 \sqrt{f_{cu}} + f_{pt}) \cdot W \text{ (sprickmoment)} \quad (23)$$

där

f_{cu} = betongens karakteristiska kubhållfasthet

f_{pt} = betongspänning vid dragen kant av förspänning enbart (positiv vid tryck)

W = böjmotstånd med avseende på dragen kant

Termen $W \cdot f_{pt}$ är identisk med BBK:s M_0 . Skillnaden jämfört med BBK är således att BS genom M_{cr} även tillgodoräknar sig en viss draghållfasthet hos betongen, $0,37 \sqrt{f_{cu}}$.

b) Icke böjsprucket:

$$V_{c0} = 0,67 \cdot b_w h \sqrt{f_t^2 + \sigma_{cp} f_t} \quad (24)$$

där

$f_t = 0,24 \sqrt{f_{cu}}$; draghållfasthet hos betongen

σ_{cp} = medeltryckspänning av förspänning

Oavsett om det aktuella området är sprucket eller inte, så ska man använda det lägsta av V_{cr} och V_{c0} . (Motsvarande gäller i BBK, där man använder det lägsta av $V_c + V_p$ respektive V_{cw} .)

2.5.3 Skjuvarmering

2.5.3.1 Slakarmerade konstruktioner

$$\text{För } v \leq \xi_s \cdot v_c: \quad \frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{0,4b_w}{0,87f_{yk}} \quad (\text{minimiarmring}) \quad (25a)$$

$$\text{För } v > \xi_s \cdot v_c: \quad \frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{b_w(0,4 + v - \xi_s v_c)}{0,87f_{yk}} \quad (25b)$$

där

$$\xi_s = (500/d)^{1/4} \geq 0,70 \quad (\text{motsvarar BBK:s } \xi)$$

$$v = \frac{V}{b_w d}$$

$$f_{yk} \leq 460 \text{ MPa}$$

v_c se ekv (21)

2.5.3.2 Spännarmerade konstruktioner

Samma formler som för slakarmerade, men med $\xi_s = 1$ (dessutom uttryckt på ett annat sätt, som gör att det ser mer annorlunda ut än det egentligen är).

2.5.4 Minimiarmring

$$A_{sw,min} = \frac{0,4 \text{ (MPa)}}{f_{yk}} \cdot b_w \quad (\text{area per längdenhet}) \quad (26)$$

2.6 AASHTO

2.6.1 Allmänt

AAHSTO [6] använder en modern dimensioneringsmetod, baserad på s.k. modifierad tryckfältsteori, se [7]. En sammanfattande beskrivning ges i [8]. Metoden beaktar skjuvkraftöverföring längs skrovliga sprickytor, s.k. ”aggregate interlock”. Detta bidrag till bärförmågan blir beroende av sprickornas bredd, och som styrande parameter används härvidlag töjningen i böjarmeringen. Vid beräkning av denna beaktas på ett enkelt sätt såväl skjuvsprickornas lutning (dragkraftsförskjutning) som eventuell yttre normalkraft samt förspänning. Metoden blir trots detta lite krånglig genom att den fordrar iteration, samt att vissa parametrar måste bestämmas genom interpolering i tabeller eller diagram.³

³ Det finns även en förenklad variant som i praktiken fungerar som en additionsmodell.

Tidigare användes i amerikanska normer en additionsmodell av liknande typ som i BBK och BS. Även spännkraft beaktades på likartat sätt. (Om man går in på detaljer finner man en hel del skillnader, men grundprincipen var densamma.)

Beteckningar:

För begrepp som är direkt jämförbara används nedan samma beteckningar som ovan (t.ex. A_{sw} , b_w , d , z , σ_p). Vissa beteckningar kan ha en något annan innebörd än ovan (t.ex. A_c som här betecknar betongarea i dragzonen). I sådana fall används egen beteckning för undvikande av missförstånd (t.ex. A_{ct} istället för A_c). I övrigt används originalbeteckningar.

2.6.2 Tvärkraftskapacitet

*Nominell tvärkraftskapacitet:*⁴

$$V_n = V_c + V_i + V_s \quad (27)$$

Övre gräns m.h.t. livtryckbrott:

$$V_{n,max} = 0,25f_{ck}b_wz + V_i \quad (28)$$

Betongens tvärkraftskapacitet:

$$V_c = 0,083\beta\sqrt{f_{ck}} \cdot b_wz \quad (29)$$

Inverkan av lutande spännkraft m.m:

V_i = en eventuell spännkrafts komponent i tvärkraftens riktning (betecknas egentligen V_p , men motsvarar BBK:s V_i och har därför här givits denna beteckning för att inte förväxlas med BBK:s V_p)⁵

Skjuvarmeringens kapacitet:

$$V_s = \frac{A_{sw}}{s} f_{yk} \cdot z \cdot \cot \theta \quad (30)$$

Definitioner:

β = faktor som bestämmer betongens skjuvkraftöverföring, se nedan

b_w = minsta tvärsnittsbredd inom effektiva höjden

z = inre hävarm; kan sättas = 0,9 x effektiv höjd

A_{sw} = area för skjuvarmeringsenhet

s = centrumavstånd mellan skjuvarmeringsenheter

f_{yk} = armeringens sträckgräns (karakteristiskt värde)

θ = trycksträvslutning, se nedan

2.6.3 Bestämning av parametrarna β och θ

Förenklad metod:

Metoden gäller konstruktioner utan förspänning, ej utsatta för dragkraft samt med viss miniarmering; den fungerar i praktiken som en ren additionsmodell:

$$\beta = 2,0, \theta = 45^\circ$$

⁴ Motsvarar närmast ett karakteristiskt värde

⁵ Här nämns ingenting om inverkan av lutande över- eller undersida (veterligen inte heller någon annanstans)

Generell metod:

Denna metod är baserad på modifierad tryckfältsteori enligt [7], se även [8].

Här bestäms en töjning i böjarmeringen, som används för bestämning av parametrarna β och θ . Töjningen är ett mått på sprickbredd, vilken i sin tur påverkar den tvärkraft som kan föras över sprickor genom friktion ("aggregate interlock"). Via denna töjning erhålls en direkt inverkan av såväl böjande moment som förspänning och eventuell yttre normalkraft.

$$\varepsilon_x = \frac{M_u / z + 0,5 \cdot V_u \cot \theta - 0,5 N_u - A_p \sigma_p}{E_s A_s + E_p A_p} \leq 0,002 \quad (31)$$

Om värdet på ε_x är negativt (dvs "drag"sidan är tryckt) multipliceras det med en faktor

$$F_\varepsilon = \frac{E_s A_s + E_p A_p}{E_c A_{ct} + E_s A_s + E_p A_p} \quad (32)$$

Här är

V_u = tvärkraft ("factored", dvs multiplicerad med lastfaktor)

M_u = motsvarande moment «

N_u = eventuell normalkraft (utöver spännkraft) «

φ = "resistance factor", i detta sammanhang = 0,9

A_{ct} = betongarea på dragsidan⁶

A_p = area för spännarmering på dragsidan

A_s = area för slakarmering på dragsidan

M_u = böjmoment (inkl lastfaktorer)

N_u = normalkraft (inkl lastfaktorer), positiv vid tryck

V_u = tvärkraft (inkl lastfaktorer)

σ_p = effektiv förspänning

Tabeller och diagram (se bilaga) ger värden på β och θ som funktion av ε_x samt en "relativ skjjuvspänning" v/f_{ck} (skjuvarmerade konstruktioner) respektive ett fiktivt sprickavstånd (icke skjuvarmerade). Eftersom vinkeln θ även ingår i uttrycket för ε_x fordras en iteration.

Skjuvspänningen v definieras som:

$$v = \frac{V_u - \varphi V_i}{\varphi \cdot b_w z} \quad (33)$$

Här är V_u s.k. "factored shear force", dvs motsvarigheten till övriga normers dimensioneringsvärde. Division med "resistance factor" innebär att V_u sätts i relation till ett dimensioneringsvärde för bärförmågan. Uttrycket innehåller således den totala säkerhetsmarginalen.

2.6.4 Minimiarmering

$$A_{sw,min} = \frac{0,083 \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \cdot b_w \quad (\text{area per längdenhet}) \quad (34)$$

⁶ Arean inom halva höjden på dragsidan

3 Beräkningsexempel

3.1 Exempel 1

Rektangulärt tvärsnitt utan skjuvarmering enligt figur.

Betong C40 (motsvarar närmast K50)

Armering med $f_{yk} = 500$ MPa

$h = 1,0$ m

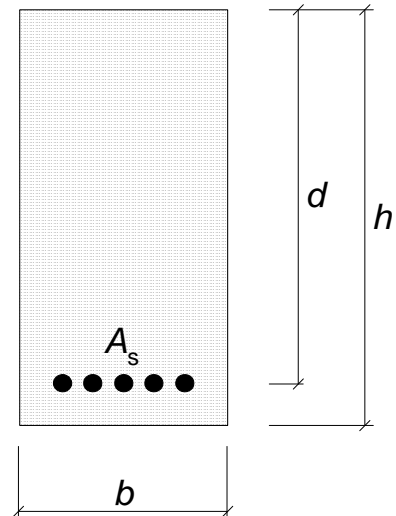
$b = 0,5$ m

$d = 0,9$ m

$z \approx 0,9d = 0,81$ m

$\rho = A_s/bd = 0,01$

$\sigma_p = 0$ (ingen förspänning)



En permanent last G plus en variabel last Q , med $\psi = 0,7$
 samt variabel last / total last = $Q / (G+Q) = 0,3$

3.1.1 BBK 94

Beräkning för säkerhetsklass 3. För att underlätta jämförelse av delresultat med övriga normer flyttas dock $\gamma_n = 1,2$ till lastsidan (detta påverkar inte slutresultatet).

$$\gamma_G = 1,2 \cdot 1,05 = 1,26 \quad \gamma_Q = 1,2 \cdot 1,5 = 1,8 \quad \gamma_F = (1-0,3) \cdot 1,26 + 0,3 \cdot 1,8 = 1,422$$

$$f_{ct} = 2,25/1,5 = 1,5 \text{ MPa}$$

$$f_v = \xi \cdot (1 + 50 \cdot \rho) \cdot 0,3 \cdot f_{ct} = (1,3 - 0,4 \cdot 0,9) \cdot (1 + 50 \cdot 0,01) \cdot 0,3 \cdot 1,5 = 0,635 \text{ MPa}$$

”Tillåten” eller nominell skjuvspänning, fortsättningsvis betecknad v_n , blir

$$v_n = f_v / \gamma_F = 0,635/1,422 = \underline{\underline{0,446 \text{ MPa}}}$$

3.1.2 EC2

$$\gamma_G = 1,35 \quad \gamma_Q = 1,5$$

$$\gamma_F = (1-0,3) \cdot 1,35 + 0,3 \cdot 0,7 \cdot 1,5 = \underline{\underline{1,260}}$$

$$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$$

$$v_{Rd,ct} = 0,12k(100\rho_l f_{ck})^{1/3} + 0,15\sigma_{cp} = 0,12 \cdot (1 + \sqrt{0,2/0,9}) \cdot (100 \cdot 0,01 \cdot 40)^{1/3} + 0 = 0,604 \text{ MPa}$$

$$v_n = v_{Rd,ct} / \gamma_F = 0,604/1,26 = \underline{\underline{0,479 \text{ MPa}}}$$

$$\text{även } \gamma_G = \xi \cdot 1,35 = 0,85 \cdot 1,35 = 1,1475^7$$

$$\gamma_F = (1-0,3) \cdot 1,1475 + 0,3 \cdot 1,5 = 1,253$$

3.1.3 DIN

$$\gamma_G = 1,35$$

$$\gamma_Q = 1,5$$

$$\gamma_F = (1-0,3) \cdot 1,35 + 0,3 \cdot 1,5 = 1,395$$

$$v_{Rd,ct} = 0,10k(100\rho_l f_{ck})^{1/3} + 0,15\sigma_{cp} = 0,10 \cdot (1 + \sqrt{0,2/0,9}) \cdot (100 \cdot 0,01 \cdot 40)^{1/3} + 0 = 0,503 \text{ MPa}$$

$$v_n = v_{Rd,ct} / \gamma_F = 0,503/1,395 = \underline{\underline{0,361 \text{ MPa}}}$$

3.1.4 BS

$$\gamma_G = 1,15$$

$$\gamma_Q = 1,5$$

$$\gamma_F = (1-0,3) \cdot 1,15 + 0,3 \cdot 1,5 = 1,255$$

⁷ ξ är en nationellt definierad parameter i EN 1990, med 0,85 som rekommenderat värde

$$v_c = \frac{0,27}{\gamma_m} \left(\frac{100A_s}{b_w d} \right)^{1/3} f_{cu}^{1/3} = \frac{0,27}{1,25} (100 \cdot 0,01 \cdot 40)^{1/3} = 0,739a$$

($f_{cu} = 50$ MPa, i detta sammanhang dock begränsat till 40 MPa)

$$v_n = v_c / \gamma_F = 0,739/1,255 = \underline{\underline{0,589 \text{ MPa}}}$$

3.1.5 AASHTO

$$\gamma_G = 1,25 \quad \gamma_Q = 1,75 \quad \gamma_F = (1-0,3) \cdot 1,25 + 0,3 \cdot 1,75 = 1,400$$

Förenklad metod kan inte användas, då den fordrar en viss minimiarmering.

Generell metod:

Efter passningsberäkning erhålls

$$\beta = 1,46, \theta = 50,8^\circ, \cot\theta = 0,816$$

$$V_c = 0,083\beta\sqrt{f'_c} \cdot b_w z = 0,083 \cdot 1,46\sqrt{40} \cdot 0,5 \cdot (0,9 \cdot 0,9) = 0,311 \text{ MN}$$

Verifikation:
 Resultatet påverkas även av böjmomentet. Här antas att "skjuvspännet" $a = M/V = 2,5d = 2,5 \cdot 0,9 = 2,25$ m, vilket ger $M = V \cdot a = 0,311 \cdot 2,25 = 0,700$ MNm.

$$\varepsilon_x = \frac{M_u / z - 0,5N_u + 0,5V_u \cot\theta - A_p \sigma_p}{E_s A_s + E_p A_p} = \frac{0,700/0,81 + 0,5 \cdot 0,311 \cdot 0,816 - 0}{2 \cdot 10^5 \cdot 0,01 \cdot 0,5 \cdot 0,9 + 0} = 1,10 \cdot 10^{-3}$$

 Noggrann avläsning i diagram (bilaga 1) ger $\beta = 1,46, \theta = 50,8^\circ$, jfr ovan.

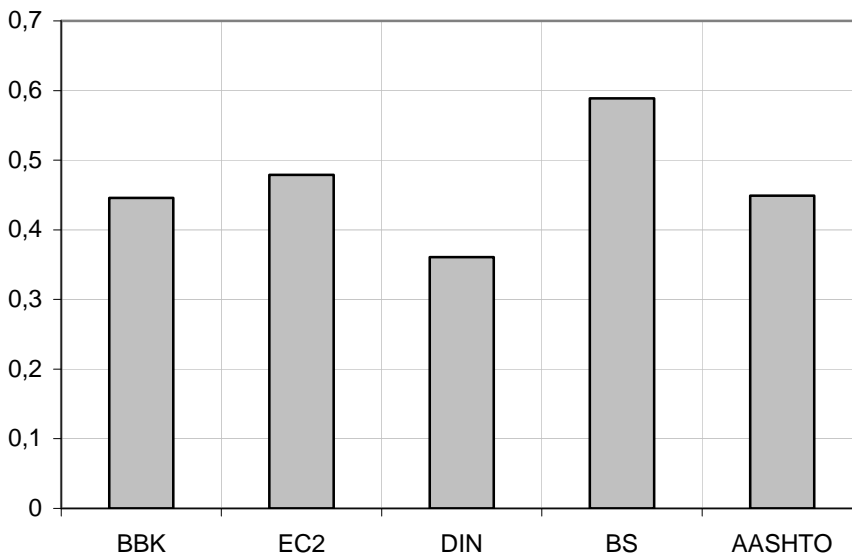
$$v_c = V_c / bd = 0,311 / (0,5 \cdot 0,9) = 0,691 \text{ MN}$$

Med lastfaktor samt "resistance factor" $\varphi = 0,9$ erhålls då

$$v_n = \varphi v_c / \gamma_F = 0,9 \cdot 0,691 / 1,400 = \underline{\underline{0,449 \text{ MPa}}}$$

3.1.6 Sammanställning

Nominell skjuvspänning v_n , MPa



3.2 Exempel 2

Beräkna erforderlig skjuvarmering

$$V = 1,0 \text{ MN (utan lastfaktorer)}$$

$$M = V \cdot a, \text{ med } a = 2,5 \cdot d$$

Lastförutsättningar som i exempel 1

Betong C40 (K50)

Slakarmering: $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$

Förspänning: $P = 4,0 \text{ MN}$

$$h = 1,0 \text{ m}$$

$$b_w = 0,3 \text{ m}$$

$$d = 0,9 \text{ m}$$

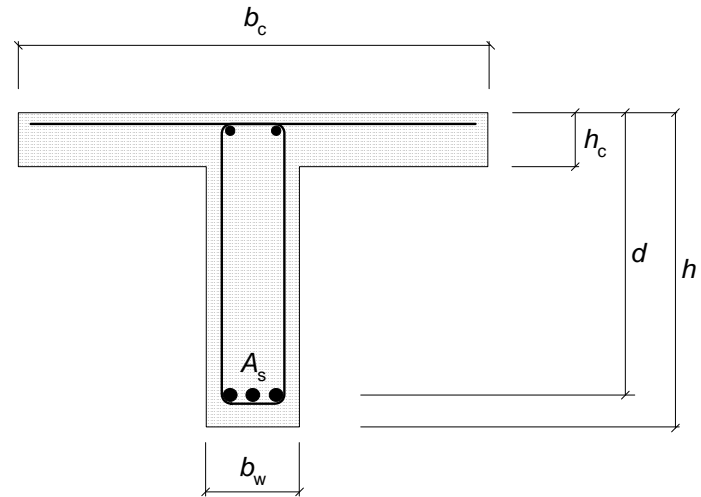
$$z \approx 0,9d = 0,81 \text{ m}$$

$$h_c = 0,2 \text{ m}$$

$$b_c = 1,5 \text{ m}$$

$$\rho = A_s / b_w d = 0,02 \text{ (slak + spänd arm.)}$$

$$A_s = 0,02 \cdot 0,3 \cdot 0,9 = 0,0054 \text{ m}^2$$



$$A_c = 0,54 \text{ m}^2$$

$$W_u = 0,0695 \text{ m}^3$$

$$y = 0,678 \text{ m}$$

$$e = 0,578 \text{ m}$$

3.2.1 BBK 94 + BRO 94

$$\gamma_F = 1,422$$

$$V_d = 1,422 \cdot 1,0 = 1,422 \text{ MN}$$

$$f_{ct} = 2,25 / 1,5 = 1,5 \text{ MPa}$$

$$f_v = \xi \cdot (1 + 50 \cdot \rho) \cdot 0,3 \cdot f_{ct} = 1,0 \cdot (1 + 50 \cdot 0,02) \cdot 0,3 \cdot 1,5 = 0,900 \text{ MPa}$$

$$V_c = b_w d f_v = 0,3 \cdot 0,9 \cdot 0,900 = 0,243 \text{ MN}$$

$$M_0 = P(e + W_u / A_c) = 4,0 \cdot (0,578 + 0,0695 / 0,54) = 2,83 \text{ MNm}$$

$$M_d = V_d \cdot a; \text{ antag att } a = 2,5 \cdot d = 2,5 \cdot 0,9 = 2,25 \text{ m}$$

$$V_p = \frac{1}{1,2} \cdot \frac{M_0}{M_d} \cdot V_d = \frac{1}{1,2} \cdot \frac{M_0}{V_d \cdot a} \cdot V_d = \frac{1}{1,2} \cdot \frac{M_0}{a} = \frac{1}{1,2} \cdot \frac{2,83}{2,25} = 1,048 \text{ MN}$$

$$\sigma_{cm} = \frac{1}{1,2} \cdot \frac{P}{A_c} = \frac{1}{1,2} \cdot \frac{4,0}{0,54} = 6,17 \text{ MPa}$$

$$V_{cw} = b_w d (f_{ct} + 0,3 \sigma_{cm}) = 0,3 \cdot 0,9 \cdot (1,5 + 0,3 \cdot 6,17) = 0,905 \text{ MN}$$

$$V_c = \min(0,243 + 1,048; 0,905) = 0,905 \text{ MN}$$

Erforderlig skjuvarmering:

$$V_s = V_d - V_c = 1,422 - 0,905 = 0,517 \text{ MN}$$

$$f_{sv} = 500 / 1,15 = 435 \text{ MPa}$$

$$\frac{A_{sv}}{s} = \frac{V_s}{z f_{sv}} = \frac{0,517}{0,81 \cdot 435} = 0,00147 \text{ m}^2/\text{m} = \underline{\underline{1470 \text{ mm}^2/\text{m}}}$$

Minimiarmring:

$$A_{sw, \min} / s = 0,0015 \cdot 0,3 \cdot 10^6 = 450 \text{ mm}^2/\text{m}$$

3.2.2 EC2

$$\gamma_F = 1,26 \quad (\text{jfr exempel 1})$$

$$V_{Ed} = 1,26 \cdot 1,0 = 1,26 \text{ MN}$$

$$f_{cd} = 40/1,5 = 26,7 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,6(1 - f_{ck}/250) = 0,504$$

$$\sigma_{cp} = P/A_c = 4,0/0,54 = 7,41 \text{ MPa}$$

$$\alpha_c = 1 + \sigma_{cp}/f_{cd} = 1 + 7,41/26,7 = 1,278 \leq \underline{1,25}$$

$$\text{Antag } \cot\theta = 2,5$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_c b_w z \nu f_{cd} / (\cot\theta + \tan\theta) = 1,25 \cdot 0,3 \cdot 0,81 \cdot 0,504 \cdot 26,7 / (2,5 + 0,4) = 1,409 \text{ MN}$$

$$V_{Rd,max} > V_{Ed}, \text{ vilket betyder att man kan utnyttja } \cot\theta = 2,5$$

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}}{z \cdot \cot\theta \cdot f_{ywd}} = \frac{1,26}{0,81 \cdot 2,5 \cdot 435} = 0,00143 \text{ m}^2/\text{m} = \underline{\underline{1430 \text{ mm}^2/\text{m}}}$$

Minimiarmering:

$$A_{sw,min} / s = b_w \cdot 0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}} / f_{yk} = 10^6 \cdot 0,3 \cdot 0,08 \cdot \sqrt{40} / 500 = 303 \text{ mm}^2/\text{m}$$

3.2.3 DIN

$$V_{Ed} = 1,395 \text{ MN}$$

$$f_{cd} = 40/1,5 = 26,7 \text{ MPa}$$

$$\alpha_c = 0,75$$

$$V_{Rd,c} = \beta_{ct} \cdot 0,10 \cdot 1,0 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot (1 - 1,2 \sigma_{cd}/f_{cd}) \cdot b_w \cdot z =$$

$$= 2,4 \cdot 0,10 \cdot 1,0 \cdot 40^{1/3} (1 - 1,2 \cdot 7,41/26,7) \cdot 0,3 \cdot 0,81 = 0,133 \text{ MN}$$

$$\cot\theta = \frac{1,2 + 1,4 \sigma_{cd} / f_{cd}}{1 - V_{Rd,c} / V_{Ed}} = \frac{1,2 + 1,4 \cdot 7,41 / 26,7}{1 - 0,133 / 1,3875} = 1,757$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_c b_w z f_{cd} / (\cot\theta + \tan\theta) = 0,75 \cdot 0,3 \cdot 0,81 \cdot 26,7 / (1,757 + 0,569) = 2,09 \text{ MN} > V_{Ed}$$

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}}{z \cdot \cot\theta \cdot f_{ywd}} = \frac{1,395}{0,81 \cdot 1,757 \cdot 435} = 0,00225 \text{ m}^2/\text{m} = \underline{\underline{2250 \text{ mm}^2/\text{m}}}$$

Minimiarmering:

$$A_{sw,min} / s = b_w \cdot 0,16 \cdot f_{ctm} / f_{yk} = 10^6 \cdot 0,3 \cdot 0,16 \cdot 3,5 / 500 = 336 \text{ mm}^2/\text{m}$$

3.2.4 BS

$$V = 1,255 \text{ MN}$$

$$M_{cr} = W_u \cdot 0,37 \sqrt{f_{cu}} + M_0 = 0,0695 \cdot 0,37 \sqrt{50} + 2,83 = 3,012 \text{ MNm}^8$$

$$M = V_d \cdot a = 1,238 \cdot 2,25 = 2,786 \text{ MNm}$$

$$V_{cr} = 0,037 \cdot b_w \cdot d \cdot \sqrt{f_{cu}} + \frac{M_{cr}}{M} \cdot V = 0,037 \cdot 0,3 \cdot 0,9 \cdot \sqrt{50} + \frac{3,012}{2,786} \cdot 1,238 = 1,409 \text{ MN}$$

$$f_t = 0,24 \sqrt{f_{cu}} = 0,24 \sqrt{50} = 1,697 \text{ MPa}$$

$$V_{c0} = 0,67 \cdot b_w \cdot h \cdot \sqrt{f_t^2 + \sigma_{cp} \cdot f_t} = 0,67 \cdot 0,3 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{1,697^2 + 7,41 \cdot 1,697} = 0,790 \text{ MN}$$

$$V_c = \min(V_{c0}; V_{cr}) = 0,790 \text{ MN}$$

$$f_{yv} = \text{högst } 460 \text{ MPa}$$

$$\frac{A_{sv}}{s} = \frac{V + 0,4bd - V_c}{0,87 f_{yv} d} = \frac{1,255 + 0,4 \cdot 0,3 \cdot 0,9 - 0,790}{0,87 \cdot 460 \cdot 0,9} = 0,00159 \text{ m}^2/\text{m} = \underline{\underline{1590 \text{ mm}^2/\text{m}}}$$

⁸ I BS 5400 finns en term $f_{pt} I/y = (P/A + P \cdot e/W) \cdot W$, vilken således är identisk med BBK:s M_0

Minimiarmering:

$$A_{sw,min} = b_w \cdot 0,4 / f_{yk} = 10^6 \cdot 0,3 \cdot 0,4 / 460 = 260 \text{ mm}^2/\text{m}$$

3.2.5 AASHTO

$$V_u = 1,400 \text{ MN}$$

$$\varphi = 0,9 \text{ (resistance factor)}$$

$$v = \frac{V_u}{\varphi \cdot b_w \cdot z} = \frac{1,400}{0,9 \cdot 0,3 \cdot 0,81} = 6,40 \text{ MPa}$$

$$v / f'_c = 6,40 / 40 = 0,160$$

$$M_u = V_u \cdot a = 1,400 \cdot 2,25 = 3,15 \text{ MNm}$$

Detta moment tillsammans med tvärkraften, samt $\cot\theta = 2,01$, ger $\varepsilon_x = 0,054 \cdot 10^{-3}$. Värdet $\cot\theta = 2,01$ ($\theta = 26,5^\circ$) har erhållits efter iteration och avläsning i diagram (se bilaga). Vidare erhålls $\beta = 2,5$, vilket ger

$$V_c = 0,083 \beta \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot z = 0,083 \cdot 2,5 \cdot \sqrt{40} \cdot 0,3 \cdot 0,81 = 0,319 \text{ MN}$$

Dimensioneringsvillkor:

$$V_u \geq \varphi V_n = \varphi (V_c + V_s)$$

$$V_s = V_u / \varphi - V_c = 1,400 / 0,9 - 0,319 = 1,237 \text{ MN}$$

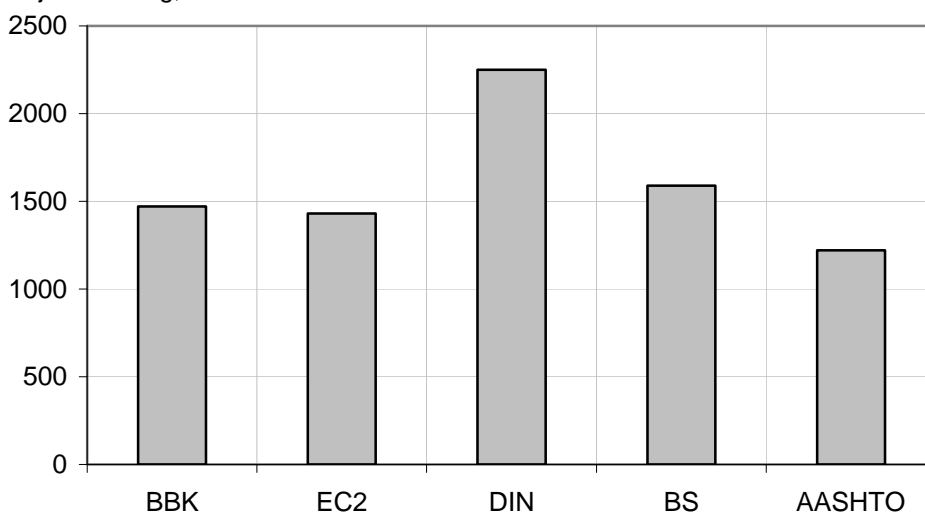
$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_s}{f_y \cdot z \cdot \cot\theta} = \frac{1,237}{500 \cdot 0,81 \cdot 2,5} = 0,00122 \text{ m}^2/\text{m} = \underline{\underline{1220 \text{ mm}^2/\text{m}}}$$

Minimiarmering:

$$A_{sw,min} / s = b_w \cdot 0,083 \cdot \sqrt{f_{ck}} / f_{yk} = 10^6 \cdot 0,3 \cdot 0,083 \cdot \sqrt{40} / 500 = 315 \text{ mm}^2/\text{m}$$

3.2.6 Sammanställning

Skjuvarmering, mm^2/m



4 Parameterstudier

4.1 Tvärsnitt utan skjuvarmering

Bärförmåga beräknas för rektangulärt tvärsnitt och T-tvärsnitt.

Bärförmåga anges som en nominell skjuvspänning $v_n = V_n/b_w d$, innehållande total säkerhetsmarginal på bärförmåga och last.

Tillsvi vidare förutsätts att $a/d = 2,5$, där $a = M/V$, det s.k. skjuvspannet.

4.1.1 Inverkan av armeringsinnehåll

Som huvudvariabel används här totala armeringsinnehållet $\rho = \frac{A_s}{b_w d}$

där

$A_s = A_{sl} + A_{sp}$ sammanlagd area för slakarmering och spännarmering

A_{sl} = area för slakarmering

A_{sp} = area för spännarmering

Fördelningen av den totala armeringen på slak respektive förspänd varierar via den genomsnittliga förspänningen:

$$\sigma_{pm} = \frac{0 \cdot A_{sl} + \sigma_p \cdot A_{sp}}{A_s}$$

Följande tre fall redovisas, alla baserade på $\sigma_p = 1000$ MPa:

- a) $\sigma_{pm} = 0 \quad \Rightarrow \quad A_{sl} = A_s \quad A_{sp} = 0$
- b) $\sigma_{pm} = 500 \quad \Rightarrow \quad A_{sl} = A_s/2 \quad A_{sp} = A_s/2$
- c) $\sigma_{pm} = 1000 \quad \Rightarrow \quad A_{sl} = 0 \quad A_{sp} = A_s$

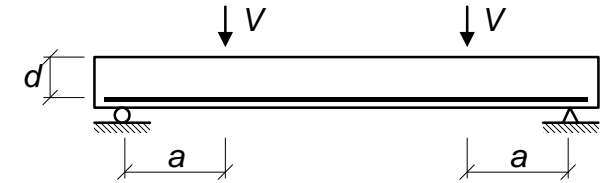
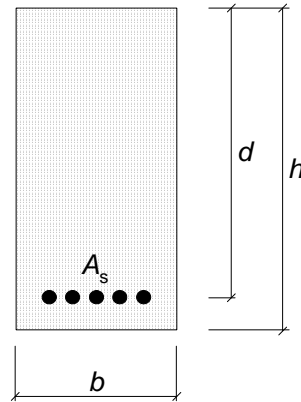
Liksom i exemplen ovan antas att det förekommer en permanent last G och en variabel last Q , samt att $Q/(G+Q) = 0,3$.

Alla normerna (utom DIN) ger en tvärkraftskapacitet även för $\rho = 0$. Att bärförmågan trots det går mot noll när ρ går mot noll, beror på att även böjmoment beaktats, för vilket kapaciteten går mot noll när armeringen går mot noll.

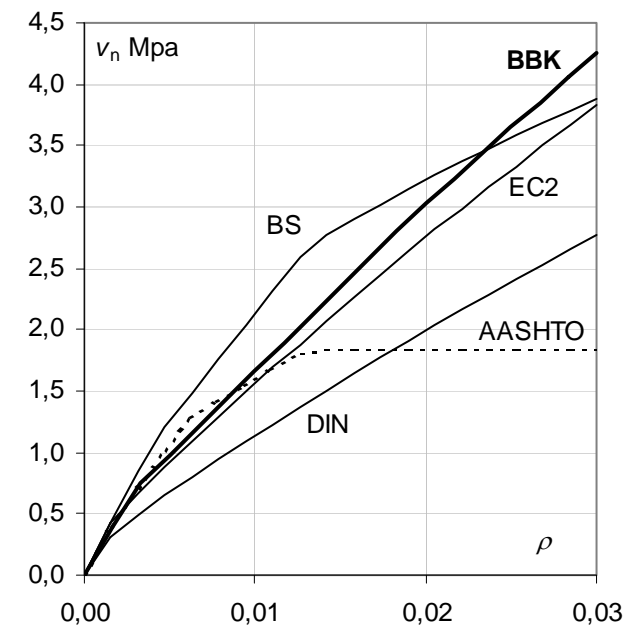
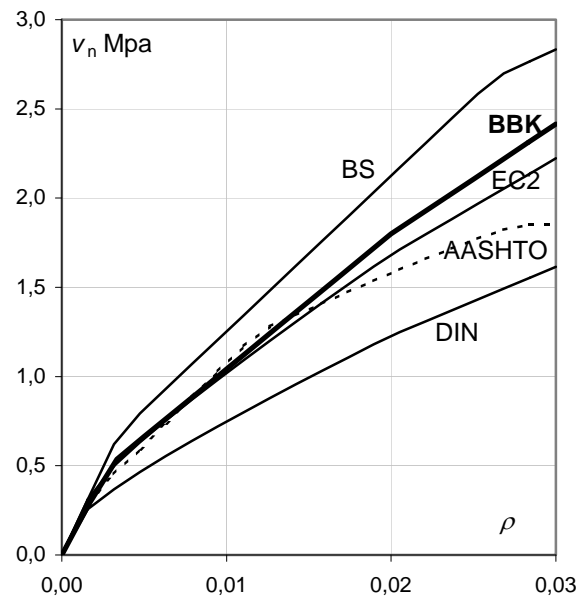
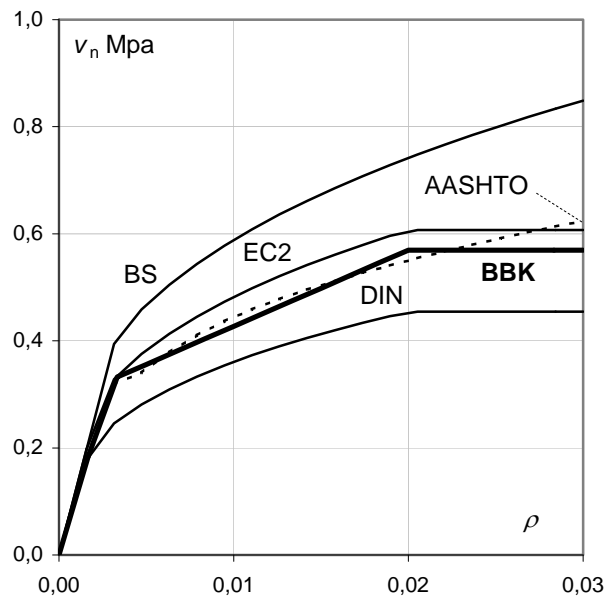
I det följande används genomgående tjock heldragen linje för BBK, tunna heldragna linjer för EC2, BS och DIN samt streckad linje för AASHTO. EC2, BS och DIN ligger i regel tillräckligt långt från varandra för att kunna särskiljas utan svårighet.

Rektangulärt tvärsnitt

Betong C40 (K50)

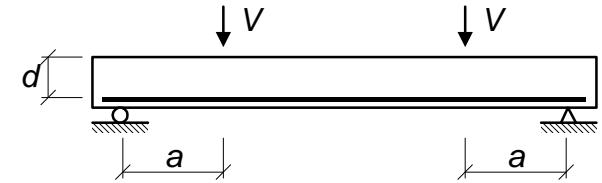
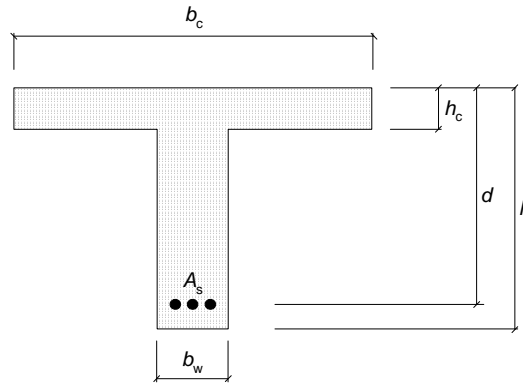
Slakarmering: $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ Spännarmering: $\sigma_p = 1000 \text{ MPa}$ $h = 1,0 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $d = 0,9 \text{ m}$ $Q/(G+Q) = 0,3$ 

$$a = 2,5 \cdot d = 2,25 \text{ m}$$

a) $\sigma_{pm} = 0$ b) $\sigma_{pm} = 500 \text{ MPa}$ c) $\sigma_{pm} = 1000 \text{ MPa}$ 

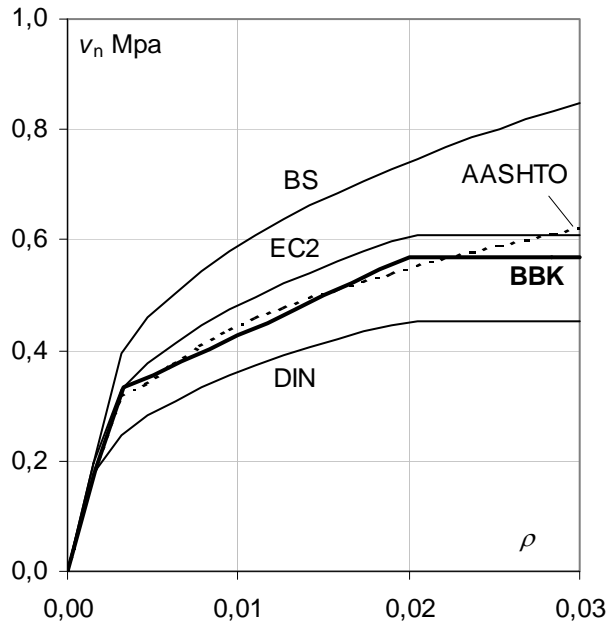
T-tvårsnitt

Betong C40 (K50)
 Slakarmering: $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$
 Spännarmering: $\sigma_p = 1000 \text{ MPa}$
 $h = 1,0 \text{ m}$
 $b_w = 0,3 \text{ m}$
 $d = 0,9 \text{ m}$
 $h_c = 0,2 \text{ m}$
 $b_c = 1,5 \text{ m}$
 $Q/(G+Q) = 0,3$

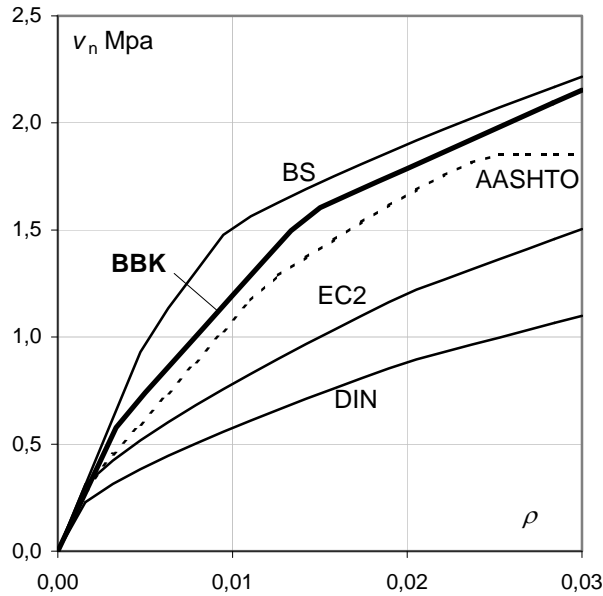


$a = 2,5 \cdot d = 2,25 \text{ m}$

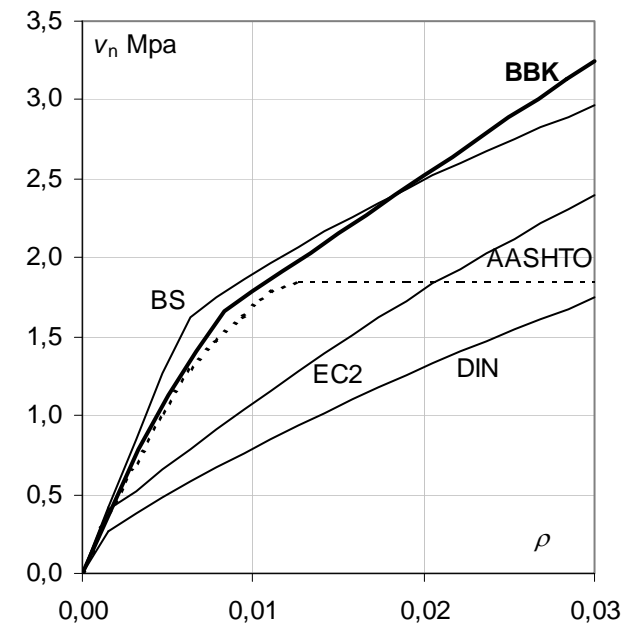
a) $\sigma_{pm} = 0$



b) $\sigma_{pm} = 500 \text{ MPa}$

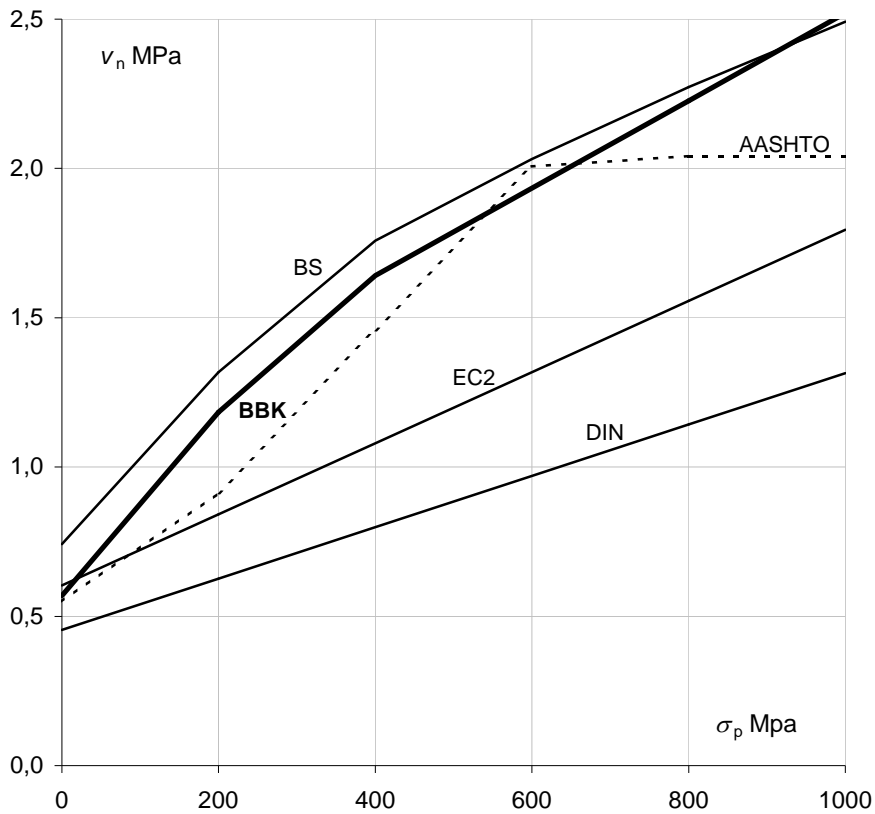


c) $\sigma_{pm} = 1000 \text{ MPa}$



4.1.2 Inverkan av förspänning

Inverkan av förspänning visas för T-tvårsnittet i nedanstående diagram. I detta fall är $\rho = 0,02$; i övrigt gäller samma förutsättningar som ovan. Exempelvis medelförspänning $\sigma_{pm} = 1000$ MPa betyder i detta fall $P = 5,4$ MN och $\sigma_{cm} = 10$ MPa. Beträffande fördelning på slak- armering och spännarmering, se ovan 4.1.1.



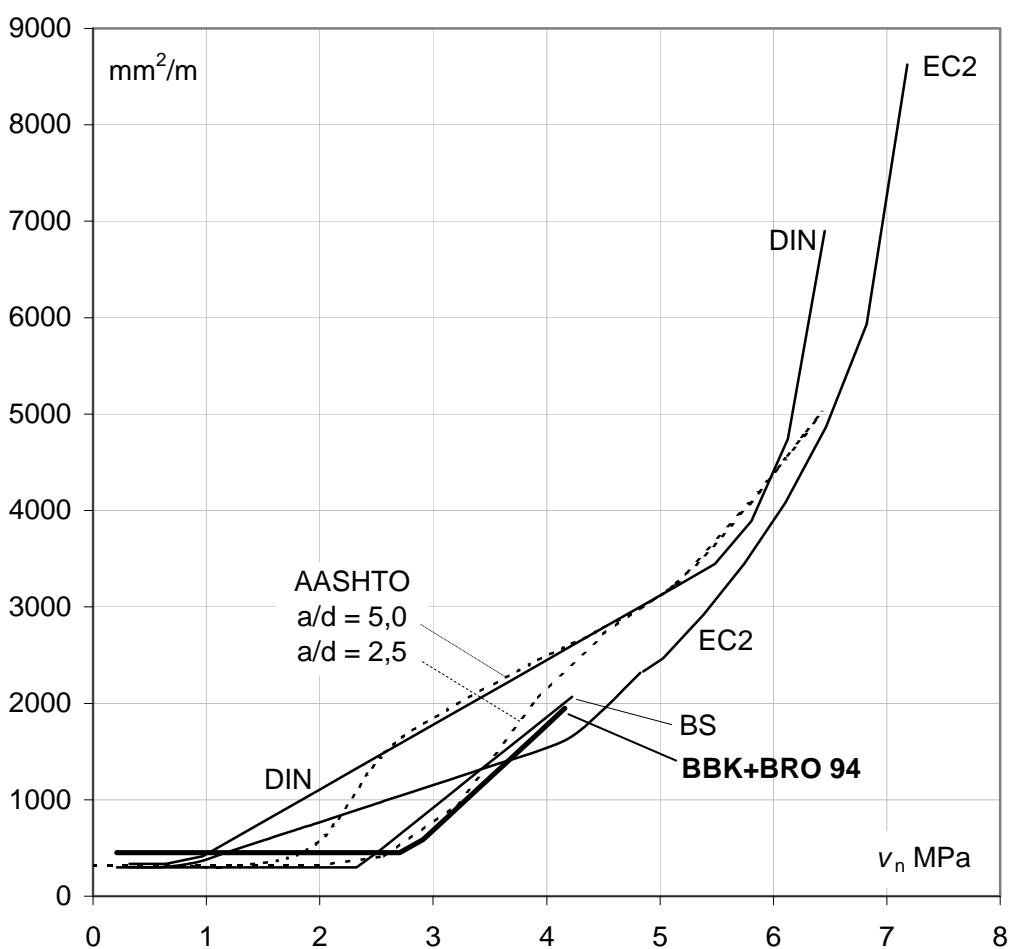
4.2 Tvärsnitt med skjuvarmering

4.2.1 T-tvärsnitt

$\rho = 0,015$, $\sigma_p = 1000$ MPa, $P = 4,1$ MN, $\sigma_{cm} = 7,5$ MPa; i övrigt enligt tidigare exempel.

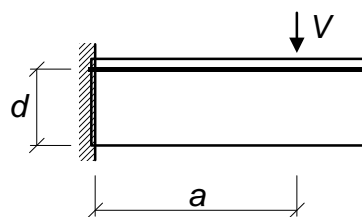
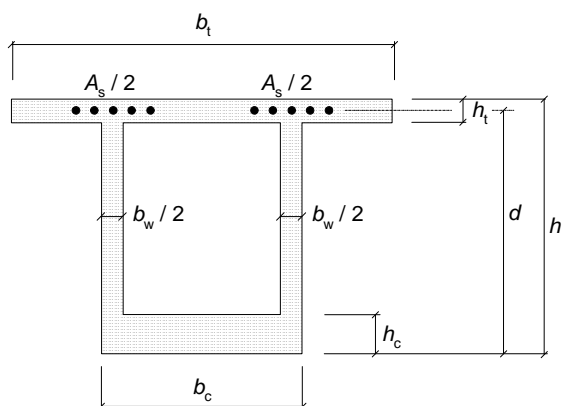
Diagrammet visar erforderlig skjuvarmering som funktion av nominell skjuvspänning $v_n = V_n/b_w d$ enligt tidigare (se 4.1).

För AASHTO:s del ges två kurvor, för $a/d = 2,5$ respektive 5,0. Anledningen är att momentets storlek inverkar via armeringstjockningen ε_x . (Vid lägre förspänning kan momentet få en inverkan även enligt BBK och BS. I fackverksmodell enligt EC2 eller DIN får däremot momentet aldrig någon inverkan.)



(Kurvorna slutar vid övre gränsen för tvärkraftskapacitet m.h.t. livtryckbrott. Se även kommentarer, sid 28.)

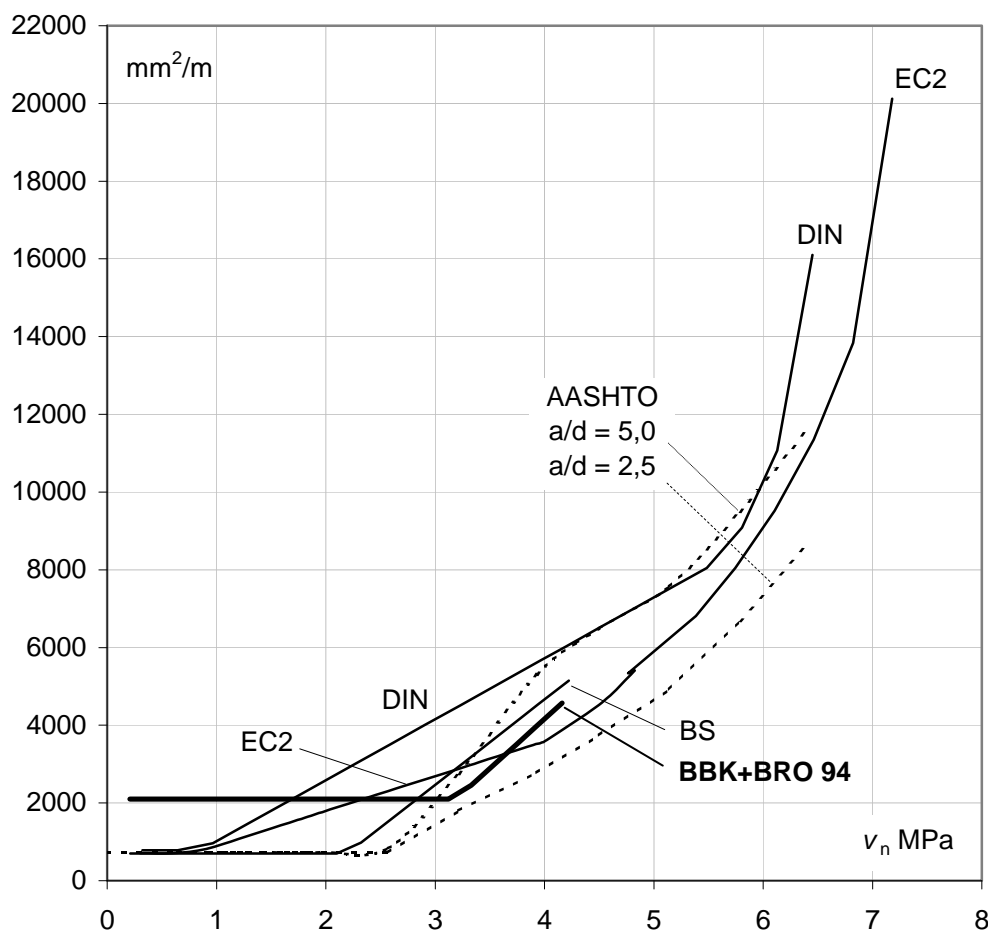
4.2.2 Lådtvärsnitt



$$a = 2,5 \cdot d = 7,13 \text{ m}$$

$h = 3,6 \text{ m}$ $b_w = 0,7 \text{ m}$ $d = 3,45 \text{ m}$ $h_t = 0,3 \text{ m}$ $b_t = 12,0 \text{ m}$ $h_c = 0,3 \text{ m}$ $b_c = 8,0 \text{ m}$
 C40 (K50) $\sigma_p = 1000 \text{ MPa}$ $P = 60,4 \text{ MN}$ $\rho = 0,025$ $a/d = 2,5$ $Q/(G+Q) = 0,3$

Diagrammet visar erforderlig skjuvarmering som funktion av nominell skjuvspänning $v_n = V_n/b_w d$, där V_n är nominell eller "tillåten" tvärkraft (utan lastfaktorer). Beträffande de två kurvorna för AASHTO, se föregående sida.



(Kurvorna slutar vid övre gränsen för tvärkraftskapacitet m.h.t. livtryckbrott. Se även kommentarer, sid 28.)

5 Kommentarer

5.1 Tvärsnitt utan skjuvarmering

Vid måttlig eller ingen förspänning ligger BBK, EC2 och AASHTO nära varandra, medan BS ger högre och DIN lägre bärförmåga.

Vid hög förspänning ligger omväxlande BBK och BS högst.

DIN ligger med få undantag lägst. Med hög förspänning hamnar både EC2 och DIN lågt i förhållande till de övriga. Att DIN ligger lägre än EC2, trots samma beräkningsmodell, beror på högre lastfaktor för egentygnd samt lägre koefficienter i modellen.

BBK och BS är mycket lika när det gäller förspänningens inverkan. AASHTO har en helt annan och mer avancerad beräkningsmodell [7], som dock för det mesta ger likartat resultat som BBK och BS. Det finns dock en begränsning i AASHTO, som gör att kapaciteten i vissa fall inte följer BBK och BS hela vägen vid ökande förspänning; undantagsvis kan den vid hög förspänning bli lägre än enligt EC2; i vissa fall t.o.m. lägre än enligt DIN.

Bortsett från denna begränsning i AASHTO, så är inverkan av förspänning normalt betydligt större enligt BBK, BS och AASHTO än enligt EC2 och DIN.

Detta framgår kanske tydligast av diagrammet i 4.1.2.

5.2 Tvärsnitt med skjuvarmering

För T-tvärsnittet ligger BBK+BRO 94 nära BS och AASHTO ifråga om erforderlig skjuvarmering. Vid låg nominell skjuvspänning ligger både EC2 och DIN högre. Vid hög nominell skjuvspänning ligger istället EC2 lägst.

För lådtvärsnittet är förhållandena likartade, även om det då är AASHTO som ligger lägst. Den fördubblade minimiarmeringen för lådtvärsnitt slår starkt igenom för BBK+BRO94:s del.

För AASHTO visas även en kurva för dubbelt så stort moment i förhållande till tvärkraften ($a/d = 5,0$ istället för 2,5 som gäller i övrigt). Ökat moment inverkar här på tvärkraftsdimensioneringen via ökad töjning ε_x . Enligt övriga normer har momentets storlek ingen inverkan i detta fall. Det beror i BBK:s och BS:s fall på att gränsen för livskjuvbrott (huvuddragspänningsbrott) blivit avgörande för ”betongens” tvärkraftskapacitet (i annat fall hade momentet haft en inverkan även här, via M_0/M_d respektive M_{cr}/M). I den renodlade fackverksmodellen enligt EC2 och DIN blir det överhuvudtaget aldrig någon inverkan av böjmoment.

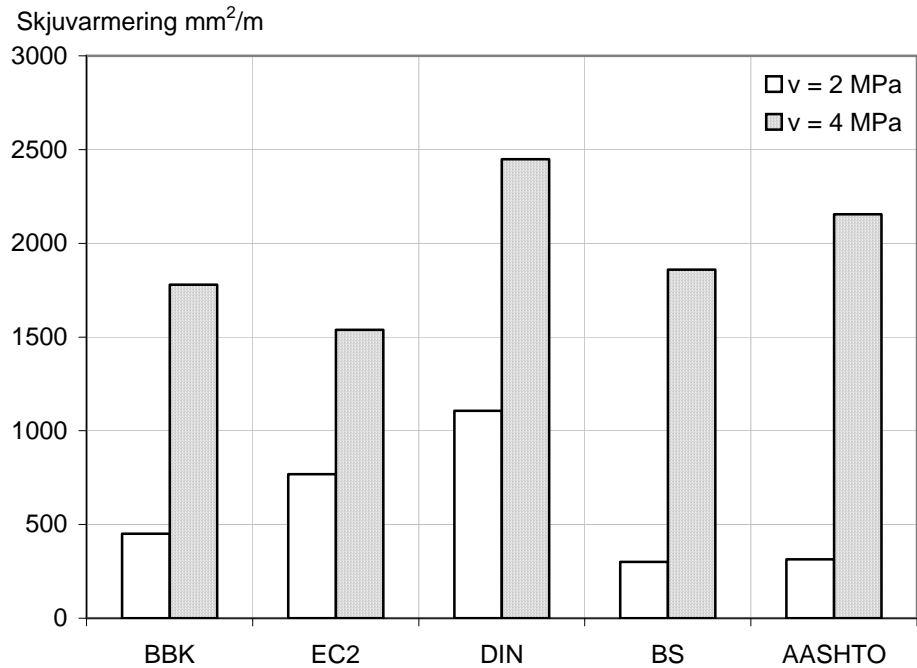
EC2 och DIN använder fackverksmodell med variabel trycksträvslutning, men med lite olika begränsningar. Således har DIN en övre gräns för $\cot\theta$ som beror av förspänningen, på ett sätt som gör att den ibland blir mer konservativ än EC2. Här inverkar dock framförallt att DIN har högre total lastfaktor än EC2.

AASHTO:s modell kan ses som en kombination av additionsmodell och fackverksmodell med variabel lutning. Således bestäms en lutning $\cot\theta$ som kan variera mellan 20 och 43°, samtidigt som det finns en ”betongterm” V_c , vars storlek beror av samma parametrar som påverkar

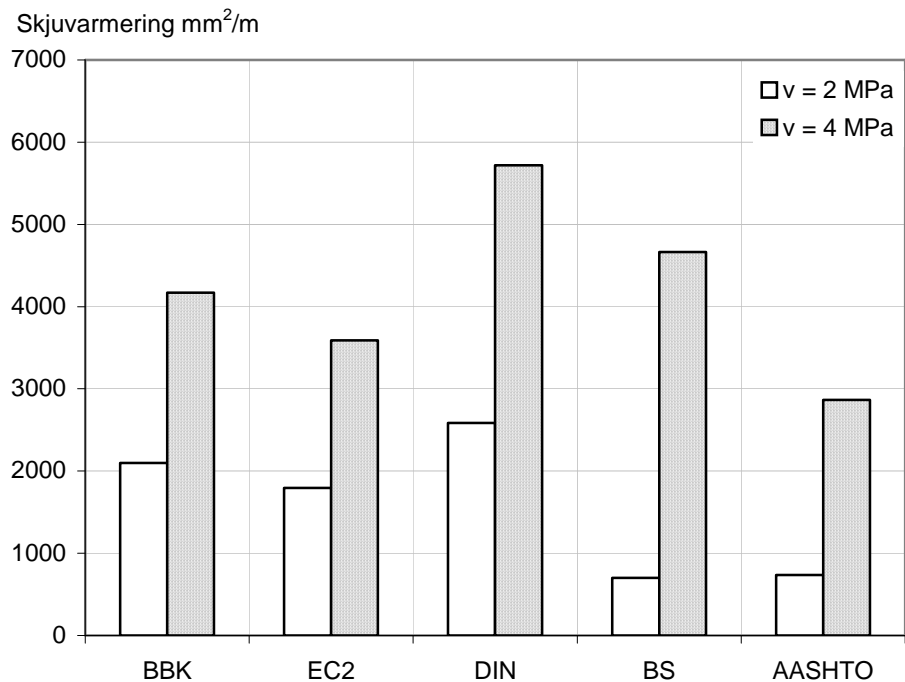
lutningen. Försättningar som ger ett gynnsammare värde på $\cot\theta$ ger samtidigt ett lägre värde på V_c , och tvärtom.

I efterföljande två diagram visas erforderlig skjuvarmering för de olika normerna vid en nominell skjuvspänning på 2 resp 4 MPa, med värden enligt ovanstående diagram. Diagrammen ger ingen ny information, men illustrerar kanske tydligare hur de olika normerna förhåller sig till varandra. Som synes varierar resultatet kraftigt, och ”rangordningen” blir olika beroende på lastnivå. (För AASHTO anges här endast värden för $a/d = 2,5$; som framgick tidigare så ökar armeringsbehovet när a/d , och därmed momentet, ökar.)

a) T-tvårsnittet



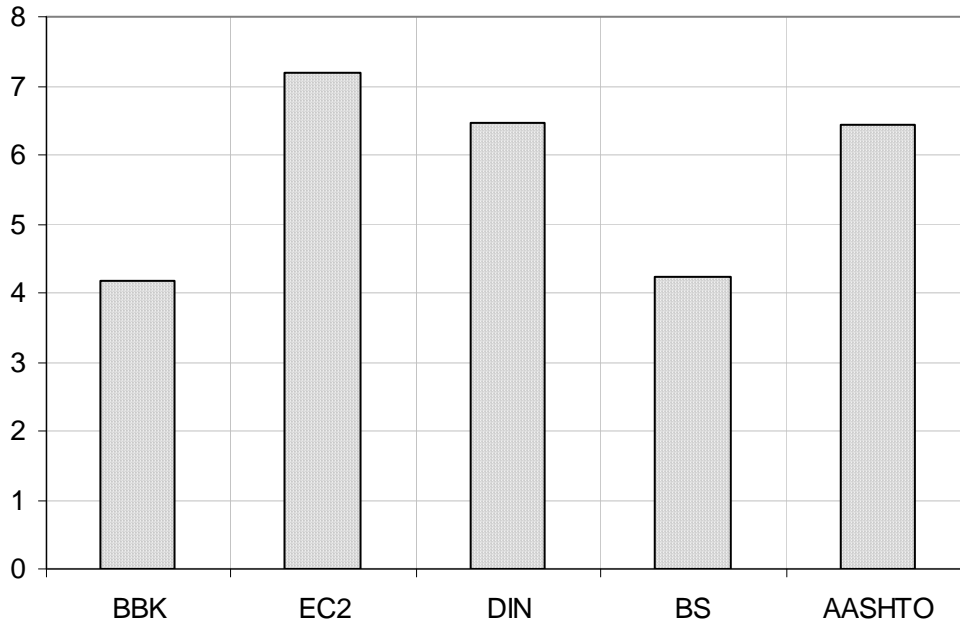
b) Lådtvårsnittet



Både BBK och BS är jämförelsevis konservativa när det gäller den övre gränsen m.h.t. livtryckbrott; gränsen ligger kring en nominell skjuvspänning på 4,2 MPa. För DIN, AASHTO och EC2 ligger gränsen på 6,4 – 7,2 MPa, dvs upp till 70 % högre. Se nedanstående diagram.

Denna skillnad beror inte på att BBK och BS använder additionsmodell (vid maximal kapacitet m.h.t livtryckbrott är $\theta = 45^\circ$ även enligt fackverksmodellen): Skillnaden beror istället på ett försiktigare utnyttjande av betongens tryckhållfasthet.

Övre gräns m.h.t. livtryckbrott, $V_{Rd,max}$ MN



6 Bruksgränstillstånd

Utmärkande för de studerade normerna är att bruksgränstillstånd behandlas knapphändig eller inte alls när det gäller tvärkraft. Här redogörs för de regler som finns respektive saknas.

6.1 BBK 94 + BRO 94

I princip ska sprickbredder alltid kontrolleras när det finns krav på sprickbredds begränsning. Varken BBK eller BRO 94 medger något särskilt avsteg för balkliv utsatta för tvärkraft. Se t.ex. första stycket i 4.5.4 i BBK, samt 42.321 i BRO 94.

Vad som saknas är anvisningar om *hur* sprickbredd ska beräknas i sådana fall. Metoden i BBK 4.5.5 gäller endast för sprickor p.g.a. böjande moment med eller utan normalkraft, och BRO 94 ger inga anvisningar därutöver. Metoden skulle i princip kunna tillämpas även för skjuvarmering, men det saknas ändå anvisningar bl.a. för beräkning av spänning i skjuvarmering. Hur detta ska göras är långt ifrån självklart.

6.2 EC2

I EC2, sista stycket i 7.3.3 (4), sägs att ”*cracking due to tangential effects may be assumed to be adequately controlled if the detailing rules given in 9.2.2, 9.2.3, 9.3.2 and 9.4.4.3 are observed*”. Detta innebär att sprickbredder inte behöver kontrolleras så länge man uppfyller ett visst krav på minimiarmering, se avsnitt 2.2.4 ovan. Denna minimiarmering är ganska måttlig, bl.a. klart mindre än enligt BRO 94, se t.ex. exempel 2 ovan, avsnitt 3.2. För lådtvärsnitt enligt BRO 94 blir skillnaden ännu större; BRO 94:s minimiarmering är då ca 3 ggr så stor som EC2:s.

I det första utkast av prEN 1992-2 (EC2:s brodel) som kommit ut under våren 2002 görs inga avsteg eller tillägg i förhållande till del 1 när det gäller bruksgränstillstånd och tvärkraft.

6.3 DIN

DIN är i dessa avseenden mycket lik EC2. Enda skillnaden är ett annat uttryck för minimiarmering, som dock ger ungefär densamma mängd som EC2.

6.4 BS

BS säger ingenting om skjuvsprickor och bruksgränstillstånd.

6.5 AASHTO

AASHTO säger ingenting om skjuvsprickor och bruksgränstillstånd.

7 Referenser

- [1] *Boverkets Handbok för Betongkonstruktioner*. BBK 94
- [2] *Allmän teknisk beskrivning för broar*. BRO 94
- [3] *Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings*. PrEN 1992-1-1, Stage 49 draft, July 2002-05-02
- [4] *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion*. DIN 1045-1, juli 2001
- [5] *Steel, concrete and composite bridges – Part 4: Code of practice for design on concrete bridges*. BS 5400-4:1990
- [6] *LRFD Bridge Design Specifications*. AASHTO, 1998
- [7] Collins, M P & Mitchell, D: *Prestressed Concrete Structures*. Prentice Hall: Englewood Cliffs, New Jersey, 1991. Se även:
- [8] Collins, M P, Mitchell, D, Adebar, P & Vecchio, F J: *A General Shear Design Method*. ACI Structural Journal, Jan/Feb 1996
- [9] CEB-FIP. *Model Code 1990*.
- [10] Westerberg B. *Kontrollberäkning av tvärkraftskapacitet – 1. Bro över Stora Hammar-sundet*. Rapport utarbetad för Vägverkets räkning, 2002-04-08.
- [11] Leonhardt F und Walther R. *Schubversuche an Plattenbalken mit unterschiedlicher Schubbewehrung*. Deutscher Ausschuss für Stahlbetong, Heft 156. Berlin 1963.

8 Bilaga. Diagram ur AASHTO LRFD

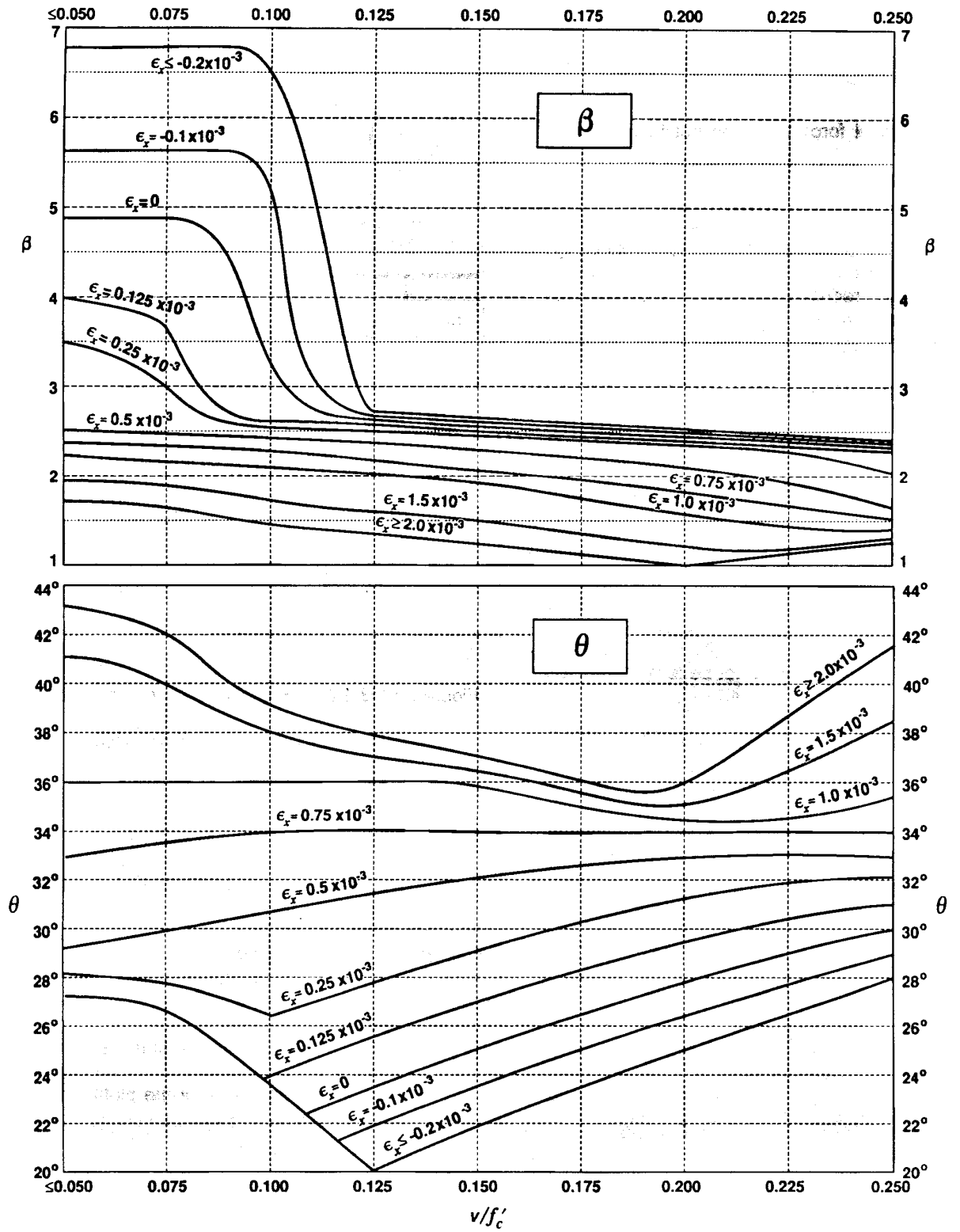


Figure 5.8.3.4.2-1 Values of θ and β for Sections with Transverse Reinforcement

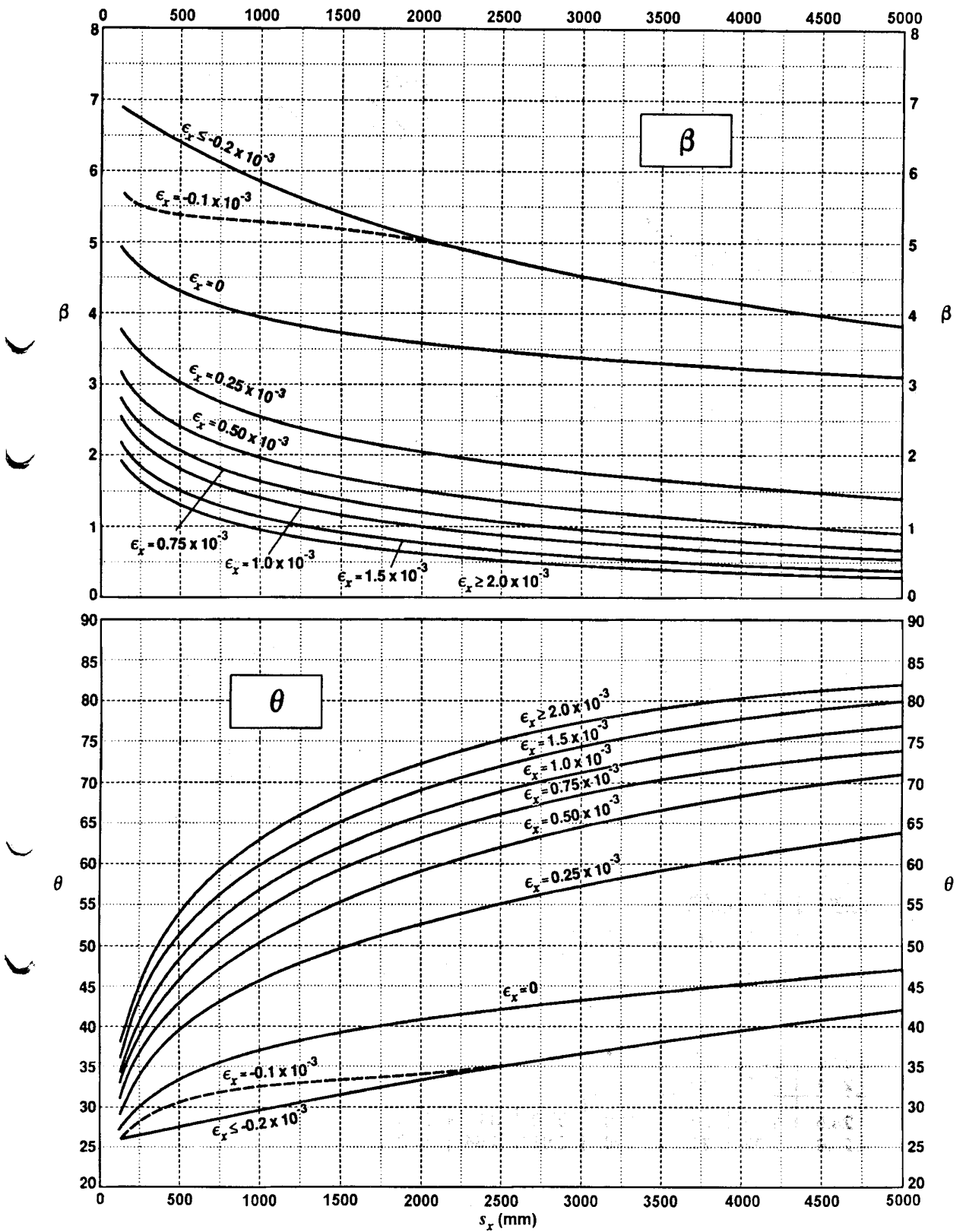


Figure 5.8.3.4.2-2 Values of θ and β for Sections without Transverse Reinforcement