



Center for Grøn Beton

Forskydningsbæreevne af bjælker Forankring af gevindstænger

Udført af:

Claus Vestergaard Nielsen

Teknologisk Institut, Beton, december 2002

Titel: Forskydningsbæreevne af bjælker
Forankring af gevindstænger

Udført af: Claus Vestergaard Nielsen

Dato: December 2002

ISBN: 87-7756-682-3

Reproduktion af dele af rapporten er tilladt, hvis kilde angives.

Indholdsfortegnelse

0. INDLEDNING	4
1. PRØVNINGSOMFANG	5
2. BETONRECEPTER.....	6
3. FORSKYDNINGSFORSØG	8
3.1 FORMÅL.....	8
3.2 METODEBESKRIVELSE	8
3.2.1 Forsøgsemner.....	8
3.2.2 Forsøgsopstilling.....	10
3.2.3 Udførelse af forsøg.....	11
4. FORSKYDNINGSGRESULTATER.....	13
4.1 MATERIALEEGENSKABER	13
4.2 FORSKYDNINGSBÆREEVNE.....	15
4.3 VURDERING	19
5. FORANKRINGSEVNE	22
5.1 FORMÅL.....	22
5.2 METODEBESKRIVELSE	22
5.3 TRYKSTYRKER.....	24
5.4 FORANKRINGSSTYRKER.....	26
5.5 VURDERING	28
6. KONKLUSIONER	30
6.1 FORSKYDNINGSBÆREEVNE.....	30
6.2 FORANKRINGSSTYRKER.....	30
7. REFERENCER.....	31

Appendiks oversigt

- APPENDIKS A EKSEMPLER PÅ LAST – UDBØJNINGSG KURVER FOR FORSKYDNINGSGFORSØG**
- APPENDIKS B BILLEDER AF FORSKYDNINGSGBJÆLKER**
- APPENDIKS C PRØVNINGSRAPPORT FOR ARMERING**

0. Indledning

I centerkontrakten *Ressourcebesparende betonkonstruktioner* (kaldet "Grøn Beton") er der i projektfasen *udvidet pakke* gennemført fire faglige aktiviteter:

- BK1: Mekaniske egenskaber
- BK2: Brand
- BK3: Udførelse
- BK4: Holdbarhed

Denne rapport indeholder delresultater fra prøvning udført i den faglige aktivitet BK1: Mekaniske egenskaber.

I *BK1 - udvidet pakke* udføres følgende undersøgelser:

Materialeundersøgelser

- Trykarbejdskurver
- Spaltetrækstyrke
- Temperaturudvidelseskoefficient
- Fugtbevægelser/svind
- Udmattelsesstyrker
- Krybning ved moderat lastniveau

Konstruktionsundersøgelser

- Armerings forankringsevne
- Bøjningsbæreevne af bjælker
- Forskydningsbæreevne af bjælker
- Instabilitet af bjælkesøjler

For en given beton vil det være relevant at udføre alle ovennævnte prøvninger afhængigt af det tiltænkte anvendelsesområde. Det er imidlertid ikke muligt indenfor rammerne af Grøn beton at gennemføre samtlige prøvninger for alle betoner udvalgt til stor pakke. Det er derfor valgt at begrænse prøvningerne for de enkelte betoner.

Denne rapport beskriver resultater fra den udførte prøvning vedr. forskydningsbæreevnen af bjælker med bøjlearmering samt forankringsbæreevnen.

De øvrige forsøgsresultater fra BK1 er rapporteret i Grøn Beton fagrapporterne:

- "BK1 – Stor Pakke, Mekaniske Egenskaber", Februar 2001.
- "Arbejdskurver, spaltetræksstyrke og udmattelsesundersøgelse", December 2002.
- "Bøjning af armerede bjælker. Instabilitet af søjler", December 2002.
- "Fugttransport, svind- og temperaturdeformationer samt krybning", December 2002.

1. Prøvningsomfang

På baggrund af resultater opnået i centerkontraktens første faser (*grundpakken* og *stor pakke*), har centerkontraktledelsen udvalgt et antal aggressive og passive betoner til udvidet pakke (se Tabel 1).

Beton	Cement	"Grønt" tiltag	Støbes hos
PR	NRC	-	Unicon, Horsens
P3	NRC	slamaske	Unicon, Horsens
P5	NRC	betonslam	Unicon, Horsens
P7	Bygg C	flyveaske fra bio.	Sydsten, Malmø
AR	SAC	-	Unicon, Horsens
A0	NRC	(cementen)	Unicon, Horsens
A1	NRC	højt flyveaskeindhold	Unicon, Horsens
A3	NRC	slamaske	Unicon, Horsens
A6	ANL	stenmel	Sydsten, Malmø

Tabel 1: Betoner udvalgt til udvidet pakke generelt.

I BK1, udvidet pakke er det valgt helt at udelade prøvning af betonerne A0 og A6 af økonomiske og tidsmæssige årsager. A0 er udeladt da denne umiddelbart er lovlig at anvende i henhold til gældende normer. A6 er udeladt da det er besluttet at denne ikke indgår i demobroen. Desuden er P3 udeladt af økonomiske og tidsmæssige årsager, da den ikke indgår i Demobroen.

Forskydningsbæreevne af bjælker bestemmes for alle øvrige betoner jf. Tabel 2.

	AR	A0	A1	A3	A6	PR	P3	P5	P7
Forskydningsbæreevne af bjælker	+	-	+	+	-	+	-	+	+
Forankring af gevindstang	+	-	+	+	-	+	-	+	+

Tabel 2: Prøvning af forskydningsbæreevne af bjælker i BK1, udvidet pakke.

2. Betonrecepter

Betonrecepterne for de betragtede betoner er angivet i Tabel 3 og Tabel 4.

Materiale	Type	AR-1 kg/m ³	AR-2 kg/m ³	A1 kg/m ³	A3 kg/m ³
cement	SAC	308,2	309,9	-	-
	NRC	-	-	206,9	304,1
mikrosilica	Pulver	17,7	17,4	17,2	17,3
flyveaske	Danaske B1	30,6	31,4	137,3	-
restprodukt	Slamaske, Avedøre	-	-	-	30,9
	Betonslam (tørstof)	-	-	-	-
vand	Vandværksvand	147,6	150,0	132,0	137,1
sand	0/2 A Vestbirk	650	642	662	613
sten 1	4/8 A Eikefet	230	229	230	227
sten 2	8/16 A Eikefet	368	343	339	329
sten 3	16/32 A Eikefet	546	572	577	566
Luftindbl.	Conplast AEA316 1:5	0,02	0,02	0,02	0,01
Plast	Conplast 212	0,90	0,91	0,88	1,11
Superplast	Strukturo BA1	-	-	0,81	-
	Conplast SP610	-	-	-	1,46
Målt luft		6,8	6,8	6,2	10,5
Ækv. v/c		0,411	0,416	0,426	0,387
Støbetidspunkt		20.03.01 kl. 13:56	21.03.01 kl. 15:00	06.06.01 kl. 11:56	28.06.02 kl. 13:16

Tabel 3: Recepter for aggressive betoner afprøvet mht. forskydnings- og forankringsforsøg. De angivne værdier er de faktiske værdier (VOT). Alle de aggressive betoner er støbt hos Unicon i Horsens.

Materiale	Type	PR kg/m ³	P5 kg/m ³	P7 kg/m ³
cement	SAC	-	-	-
	NRC	166,1	168,4	-
	Bygg C	-	-	194,0
mikrosilica	Pulver	12,4	12,5	-
flyveaske	Danaske B1	59,8	59,9	-
restprodukt	Specialfiller	-	-	-
	Slamaske Lynetten	-	-	-
	Betonslam (tørstof)	-	18,5	-
	Stenmel 0/2 Dalby	-	-	-
	Flyveaske fra bio.	-	-	79,0
vand	Vandværksvand	147,6	156,3	166,6
sand	0/2 SC Vestbirk	737	692	-
	0/8 Östervang	-	-	1008
sten 1	4/8 SC Århus	199	202	-
	8/16 Dalby	-	-	227
sten 2	8/16 SC Århus	398	403	-
	16/25 Dalby	-	-	677
sten 3	16/32 SC Århus	545	567	-
Luftindbl.	Conplast AEA316 1:5	-	0,01	-
Plast	Conplast 212	0,70	0,71	-
	Peramin V	-	-	0,45
Superplast	Strukturo BA1	-	-	-
	Peramin F	-	-	0,72
Målt luft		4,6	3,5	2,0 %
Ækv. v/c		0,669	0,699	0,713
Støbetidspunkt		23.04.01	25.06.01	05.11.01
		kl. 12.43	kl. 17.14	kl. 9.25

Tabel 4: Recepter for passive betoner afprøvet mht. forskydnings- og forankringsforsøg. De angivne værdier er de faktiske værdier (VOT). PR og P5 er støbt hos Unicon i Horsens, mens P7 er støbt hos Sydsten i Malmø.

3. Forskydningsforsøg

3.1 Formål

Forskydningsbæreevnen af armerede betonbjælker kan i henhold til DS 411:1999 baseres på en stringeranalogi kaldet diagonaltrykmetoden [1,2]. I beregningen skal det eftervises, at den skrå betontrykspænding er mindre end den effektiv trykstyrke af størrelsesordenen 40-64 % af den målte trykstyrke. I DS 411 ses effektivitetsfaktoren at falde med voksende trykstyrke. Dette skyldes, at betonens sejhed generelt mindskes med højere styrke.

Fastlæggelsen af effektivitetsfaktoren i DS 411 baserer sig hovedsagligt på eksperimentelle undersøgelser. Formålet med nærværende eksperimenter er at undersøge, om diagonaltrykmetoden kan anvendes for de grønne betoner, herunder om effektivitetsfaktorerne angivet i DS 411 kan regnes gældende.

3.2 Metodebeskrivelse

3.2.1 Forsøgsemner

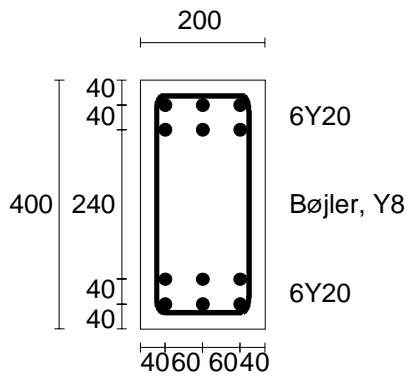
Da det normalt gælder, at tværsnitsgeometri og hovedarmering har mindre betydning for forskydningsbæreevnen fastholdes disse, mens bøjleafstanden varieres.

Forsøgene udføres på bjælker med dimensioner 200×400×4000 mm. For hver betontype udføres forsøg med 2-3 bøjleafstande. Emnernes geometri og armeringsforhold er vist i Figur 1 og Figur 2 for hhv. A- og P-betonerne. For at sikre forankringen af armeringen er der i hver ende af bjælkerne indlagt U-bøjler.

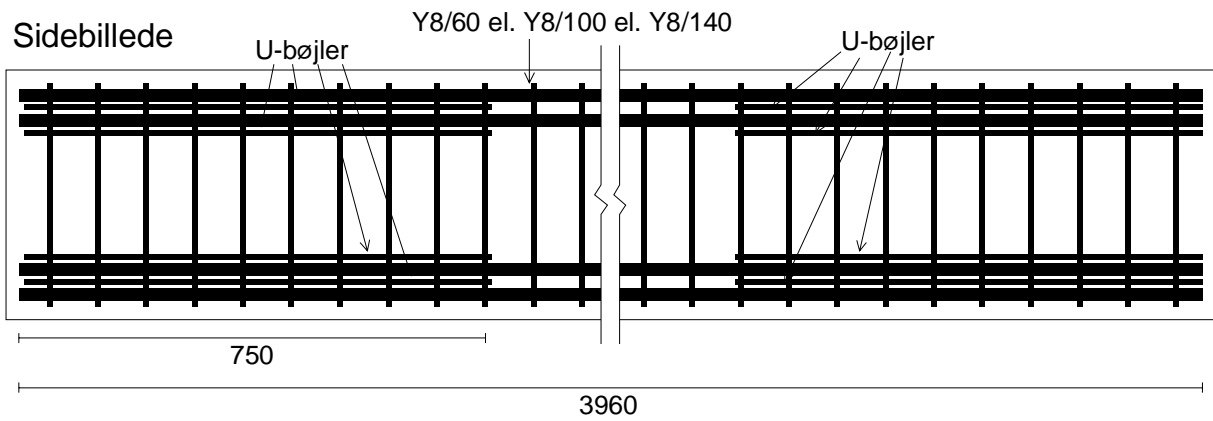
Den anvendte armering er leveret færdiglavet af FUNDIA i henhold til kravene i DS 13080-1 og DS 13080-2. Stålet tilhører gruppe B3 og har en karakteristisk flydespænding på mindst 550 MPa. Den jævnt fordelte brudforlængelse er på minimum 3 % og forholdet mellem brudspænding og flydespænding er mindst 1,08.

Udover bjælkerne er desuden udstøbt 5 stk. Ø150×300 mm standardcylindre til bestemmelse af trykstyrken i henhold til DS 423.23:1984. Alle prøveemner for en given beton er støbt med beton fra samme læs.

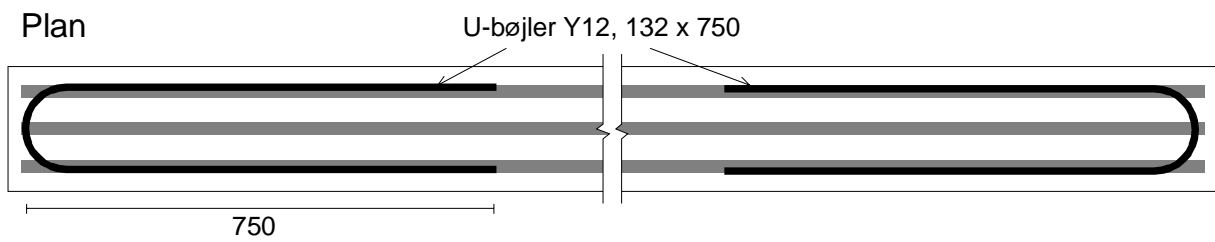
Tværsnit



Sidebillede

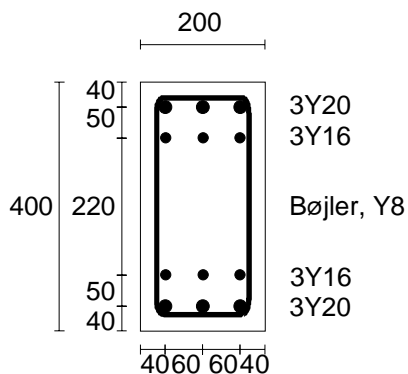


Plan

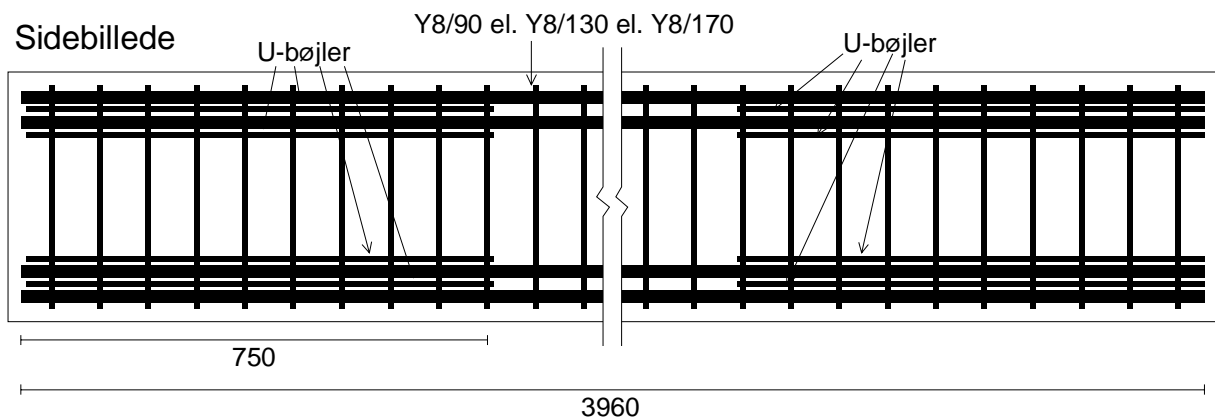


Figur 1: Prøvemner med armeringsarrangement til aggressive betoner. Alle mål i mm.

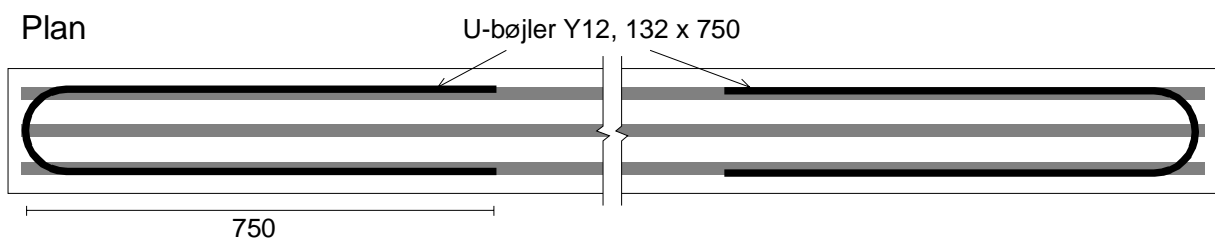
Tværsnit



Sidebillede



Plan

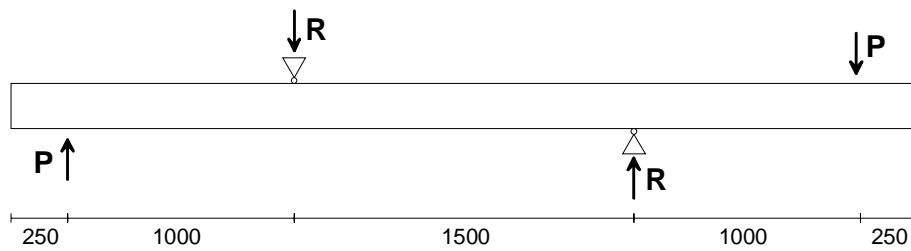


Figur 2: Prøvemner med armeringsarrangement til passive betoner. Alle mål i mm.

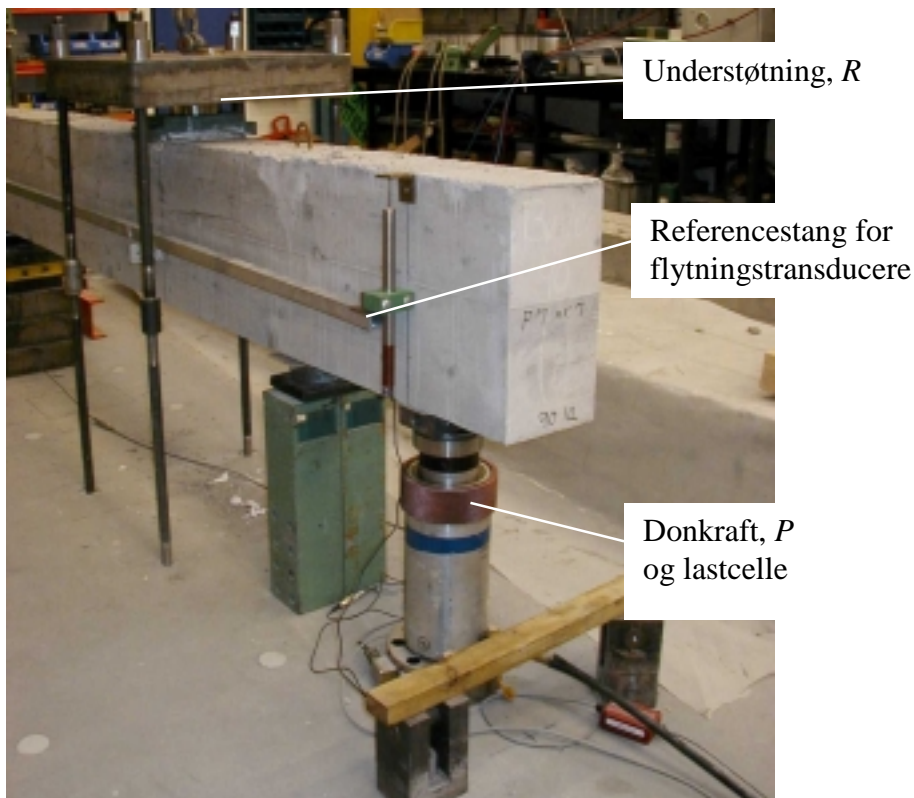
3.2.2 Forsøgsopstilling

Forsøgsopstillingen er indrettet med 4 punktlaster som vist i Figur 3. I forskydningspændet l , som har længden 1 m, opbygges et bøjningsmoment Pl under konstant forskydningskraft lig med P . Forskydningskraften i midterspændet, som måler 1,5 m, er konstant lig med $1\frac{1}{3}P$.

Ved den venstre donkraft måles den påførte last vha. en lastcelle (Figur 4). Deformationen af belastningspunkterne i forhold til understøtningspunkterne måles vha. elektroniske flytnings-transducere. Transducerne er monteret på en vandret referencestang, der ligger på to vinkelbeslag fastgjort til bjælken ud for understøtningerne (Figur 4). Derved måles belastningspunkternes udbøjning ift. understøtningspunkterne.



Figur 3: Principskitse af forsøgsopstilling med $l = 1\text{ m}$. Lasten P fåføres samtidigt via to forbundne hydrauliske donkrafte. Statisk ligevægt giver $R = 2\frac{1}{3}P$. Alle mål i mm.



Figur 4: Venstre bjælkeende med donkraft og trykcelle.

3.2.3 Udførelse af forsøg

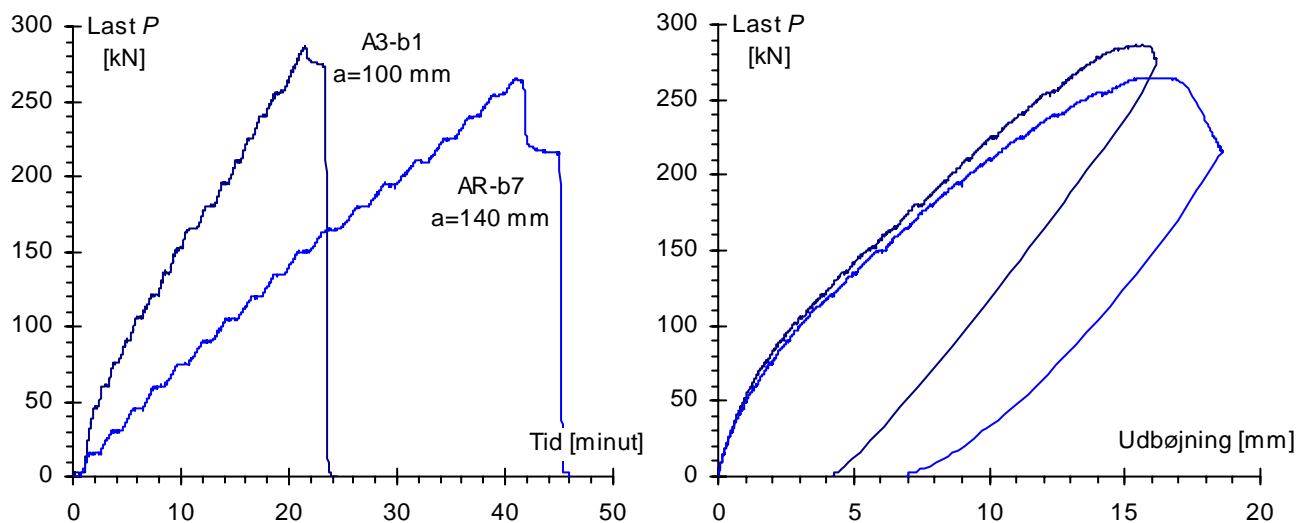
Lasten blev påført i trin á ca. 15 kN svarende til en forskydningskraft i midterfaget på 20 kN . Hvert lasttrin blev påført i løbet af ca. 1 min . Herefter blev lasten holdt konstant i ca. 1 min , mens bjælken blev inspiceret for revner. Under oplastningen blev last og deformationer målt hvert sekund. Figur 6 viser et par typiske eksempler på lastpåføringen.



Figur 5: Højre bjælkeende med donkraft virkende nedad.

I forbindelse med prøvningen blev trykstyrken bestemt på standardcylindre $\text{Ø}150 \times 300$ mm. For at sikre at styrkeudviklingen i cylindrene svarer til udviklingen i bjælkerne til forskydningsforsøgene blev cylindrene opbevaret under samme forhold som bjælkerne. Cylindrene blev holdt forseglede fra støbning til prøvning. Tilsvarende var bjælkerne tildækket med plast.

Forsøgene er udført 34-41 døgn efter støbning.



Figur 6 Eksempler på lastpåføring samt tilhørende lastarbejdskurver.

4. Forskydningsresultater

4.1 Materialeegenskaber

De målte trykstyrker er vist i Tabel 5 og Tabel 6. Trykstyrkebestemmelsen er udført i henhold til DS 423.23:1984.

Beton	Emne	Alder [dage]	Densitet [kg/m ³]	Trykstyrke [MPa]
AR	AR-150-20	34	2299	43,3
	AR-150-21	35	2302	43,8
	AR-150-19	36	2311	43,1
	AR-150-22	38	2321	42,3
	AR-150-23	41	2320	43,5
	Middel		2310	43,2
	Spredning Var.koeff. [%]		10,0 0,4	0,56 1,3
A1	A1-150-20	34	2352	66,8
	A1-150-21	35	2347	68,2
	A1-150-19	36	2355	64,2
	Middel		2352	66,4
	Spredning Var.koeff. [%]		4,1 0,2	2,03 3,1
A3	A3-150-19	39	2230	47,3
	A3-150-20	39	2241	45,6
	A3-150-21	40	2219	46,8
	A3-150-22	41	2236	46,5
	A3-150-23	41	2213	46,3
	Middel		2228	46,5
	Spredning Var.koeff. [%]		12,0 0,5	0,63 1,4

Tabel 5: A-betoner. Trykstyrker bestemt på Ø150×300 mm standardcylindre, der er holdt forseglede indtil prøvning og lagret under samme betingelser som bjælkerne. For A1 blev 2 cylindre kasseret pga. skævheder.

Beton	Emne	Alder [dage]	Densitet [kg/m ³]	Trykstyrke [MPa]
PR	PR-150-23	35	2276	39,4
	PR-150-22	36	2292	39,3
	PR-150-20	37	2310	39,4
	PR-150-19	38	2297	40,1
	PR-150-21	38	2303	40,1
	Middel Spredning Var.koeff. [%]			2296 13,0 0,6
P5	P5-150-23	35	2291	34,3
	P5-150-22	36	2281	34,8
	P5-150-19	39	2282	31,3 ^{a)}
	Middel Spredning Var.koeff. [%]			2285 5,6 0,2
P7	P7-150-22	35	2388	33,6
	P7-150-21	36	2389	34,1
	P7-150-20	37	2403	32,7
	P7-150-19	38	2392	34,0
	P7-150-23	38	2391	34,4
	Middel Spredning Var.koeff. [%]			2393 5,8 0,2

Tabel 6: P-betoner. Trykstyrker bestemt på Ø150×300 mm standardcylindre, der er holdt forseglede indtil prøvning og lagret under samme betingelser som bjælkerne. For P5 blev 2 cylindre kasseret pga. skævheder. ^{a)}Emnet var afrettet med gips.

Armeringens egenskaber er dokumenteret i Appendiks C, hvor flydespænding og E-modul er angivet. I næste afsnits analyse af forskydningsbæreevnen er benyttet flydespændingen 609 MPa for både hoved- og bøjlearmering.

4.2 Forskydningsbæreevne

Resultaterne af de udførte forskydningsforsøg er vist i Tabel 7-Tabel 12 og i Appendiks A er eksempler på lastarbejdskurver angivet. Tabellerne angiver den maksimale last for hvert forsøg samt den tilsvarende forskydningskraft V i midterfaget. Forskydningskraften beregnes ud fra den påførte last:

$$V = \frac{4}{3}P$$

Det skal bemærkes at spredningen på forskydningsbæreevnerne er bemærkelsesværdig lav med variationskoefficienter på 1-5 %.

Lastarbejdskurverne i Appendiks A indikerer forløbet af forskydningsforsøgene. Den første del af kurven svarer til urevnet tværsnit. Normalt indtræffer de første revner ved $P = 50-60$ kN som små bøjningsrevner ved understøtningerne. I løbet af de efterfølgende 40-50 kN begynder skrårevner at optræde i midterfaget. Disse skrårevner udvikler sig fra understøtningspunkterne mod hhv. bjælkeover- og -underside. I takt med at lasten øges, vokser både antallet og længden af skrårevnerne, og desuden dannes der også mindre skrårevner i sidefagene. Forskydningsbæreevnen er karakteriseret ved, at lastarbejdskurven flader ud som tegn på at bøjlerne begynder at flyde. Den afsluttende del af kurverne i Appendiks A svarer til at der aflastes. I Appendiks B ses fotos af bjælkerne efter brud, hvor ovennævnte revnemønstre kan iagttages.

Den plasticitetsteoretiske løsning til forskydningsproblemet er givet i [1]. Denne løsning danner grundlag for dimensioneringsproceduren givet i DS 411:1999. Det antages at bøjlerne flyder samtidig med, at de skrå tryklameller knuses under den effektive trykstyrke νf_c . Derved fås følgende nedreværdiløsning for forskydningsbæreevnen:

$$\frac{\tau}{\nu f_c} = \sqrt{\frac{\Psi}{\nu} \left(1 - \frac{\Psi}{\nu}\right)}, \quad \begin{cases} \tau = \frac{V}{bh_i} \\ \Psi = \frac{A_{sw}}{ab} \frac{f_{yw}}{f_c} \end{cases}$$

hvor

A_{sw} er snitarealet for en bøjle = 100 mm² for Y8 bøjler

a er bøjleafstanden

b er bjælkebredden = 200 mm

f_{yw} er flydespændingen for bøjlerne = 609 MPa.

f_c er trykstyrken

h_i er den indre momentarm defineret ud fra et bøjningsbrud = $\frac{M_u}{A_s f_y}$

Ψ er det mekaniske bøjlearmeringsforhold

τ er forskydningspændingen i tværsnittet

ν er effektivitetsfaktoren

Ovenstående kvadratudsudtryk danner et kvart cirkelslag i et $\tau/(v f_c) - \psi/v$ koordinatsystem med centrum beliggende på ψ -aksen i $\psi = v/2$. For $\psi > v/2$ fås konstant bæreevnen $\tau/f_c = v/2$ svarende til det overarmerede tilfælde.

a [mm]	Emne	Alder [dage]	Max. P [kN]	V [kN]	Brudtype
60	AR-b2	35	349	465	Bøjning
	AR-b3	35	353	471	Bøjning, tryk
	Middel		351	468	
	Spredning		-	-	
		Var.koeff. [%]	-	-	
100	AR-b1	34	291	388	Forskydning
	AR-b5	36	296	395	Forskydning
	AR-b8	41	300	400	Forskydning, tryk
	Middel		296	394	
		Spredning	4,5	-	
		Var.koeff. [%]	1,5	-	
140	AR-b4	36	253	337	Forskydning, tryk
	AR-b6	37	249	332	Forskydning
	AR-b7	38	265	353	Forskydning
	Middel		256	341	
		Spredning	8,3	-	
		Var.koeff. [%]	3,3	-	

Tabel 7: Målte forskydningsbæreevner for AR-beton. Den mindste bøjleafstand medførte bøjningsbrud over understøtningen i stedet for et forskydningsbrud. Dette medførte en beslutning om ikke at benytte $a = 60$ mm i de følgende forsøgsserier.

a [mm]	Emne	Alder [dage]	Max. P [kN]	V [kN]	Brudtype
100	A1-b2	34	317	423	Forskydning
	A1-b3	35	308	410	Forskydning, tryk
	A1-b5	36	309	412	Forskydning, tryk
	Middel		311	415	
	Spredning		4,9	-	
	Var.koeff. [%]		1,6	-	
140	A1-b1	34	251	334	Forskydning
	A1-b4	35	256	341	Forskydning, tryk
	A1-b6	36	268	357	Forskydning
	Middel		258	344	
	Spredning		8,7	-	
	Var.koeff. [%]		3,4	-	

Tabel 8: Målte forskydningsbæreevner for A1-beton.

a [mm]	Emne	Alder [dage]	Max. P [kN]	V [kN]	Brudtype
100	A3-b1	40	286	381	Forskydning
	A3-b2	41	299	399	Forskydning
	A3-b3	41	270	360	Forskydning
	Middel		285	380	
	Spredning		14,5	-	
	Var.koeff. [%]		5,1	-	
140	A3-b4	39	263	351	Forskydning
	A3-b5	39	250	333	Forskydning
	A3-b6	40	257	343	Forskydning
	Middel		257	342	
	Spredning		6,5	-	
	Var.koeff. [%]		2,5	-	

Tabel 9: Målte forskydningsbæreevner for A3-beton.

a [mm]	Emne	Alder [dage]	Max. P [kN]	V [kN]	Brudtype
90	PR-b2	36	290	387	Forskydning, tryk
	PR-b5	37	274	365	Forskydning, tryk
	PR-b7	38	297	396	Forskydning
	Middel Spredning Var.koeff. [%]		287 11,8 4,1	383 - -	
130	PR-b1	35	250	333	Forskydning, tryk
	PR-b4	37	240	320	Forskydning, tryk
	PR-b6	38	250	333	Forskydning, tryk
	Middel Spredning Var.koeff. [%]		247 5,8 2,4	329 - -	
170	PR-b3	36	214	285	Forskydning
	PR-b8	56	214	286	Forskydning
	Middel Spredning Var.koeff. [%]		214 - -	285 - -	

Tabel 10: Målte forskydningsbæreevner for PR-beton.

a [mm]	Emne	Alder [dage]	Max. P [kN]	V [kN]	Brudtype
90	P5-b2	35	293	391	Forskydning
	P5-b5	37	292	389	Forskydning
	P5-b8	38	293	391	Forskydning
	Middel Spredning Var.koeff. [%]		293 0,8 0,3	390 - -	
130	P5-b1	35	247	329	Forskydning
	P5-b4	36	239	319	Forskydning
	P5-b7	38	247	330	Forskydning
	Middel Spredning Var.koeff. [%]		244 4,6 1,9	326 - -	
170	P5-b3	35	215	286	Forskydning
	P5-b6	37	200	267	Forskydning
	P5-b9	39	210	280	Forskydning, tryk
	Middel Spredning Var.koeff. [%]		208 7,4 3,5	278 - -	

Tabel 11: Målte forskydningsbæreevner for P5-beton.

a [mm]	Emne	Alder [dage]	Max. P [kN]	V [kN]	Brudtype
90	P7-b2	35	274	365	Forskydning
	P7-b5	37	271	361	Forskydning
	P7-b7	38	281	375	Forskydning
	Middel Spredning Var.koeff. [%]		275 5,1 1,9	367 - -	
130	P7-b1	35	216	288	Forskydning
	P7-b4	36	224	299	Forskydning
	P7-b6	37	230	307	Forskydning
	Middel Spredning Var.koeff. [%]		223 7,0 3,1	298 - -	
170	P7-b3	36	201	268	Forskydning
	Middel Spredning Var.koeff. [%]		201 - -	268 - -	

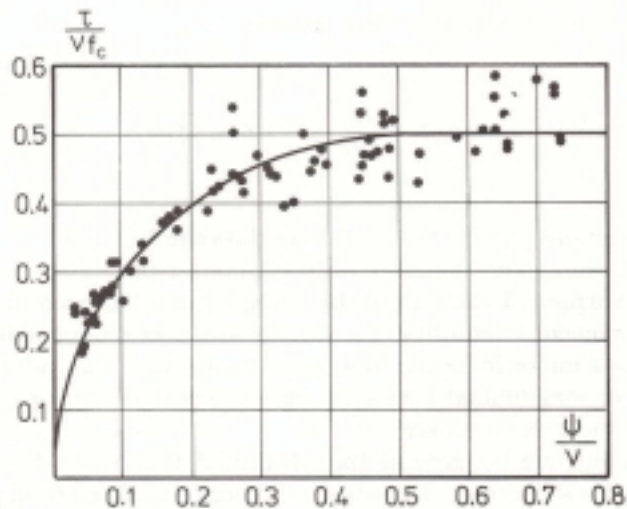
Tabel 12: Målte forskydningsbæreevner for P7-beton.

4.3 Vurdering

Sammenhængen mellem betontrykstyrke og effektivitetsfaktoren er fundet på basis af laboratorieforsøg [1]:

$$v = 0,8 - \frac{f_c}{200 \text{ MPa}}$$

I Figur 7 ses forsøgsresultater sammenlignet med kvadratrodsudtrykket, hvor effektivitetsfaktoren er givet ved ovenstående udtryk.



Figur 7: Overensstemmelse mellem teori og forsøg for normalstyrkebeton. Figuren er taget fra [1], side 228.

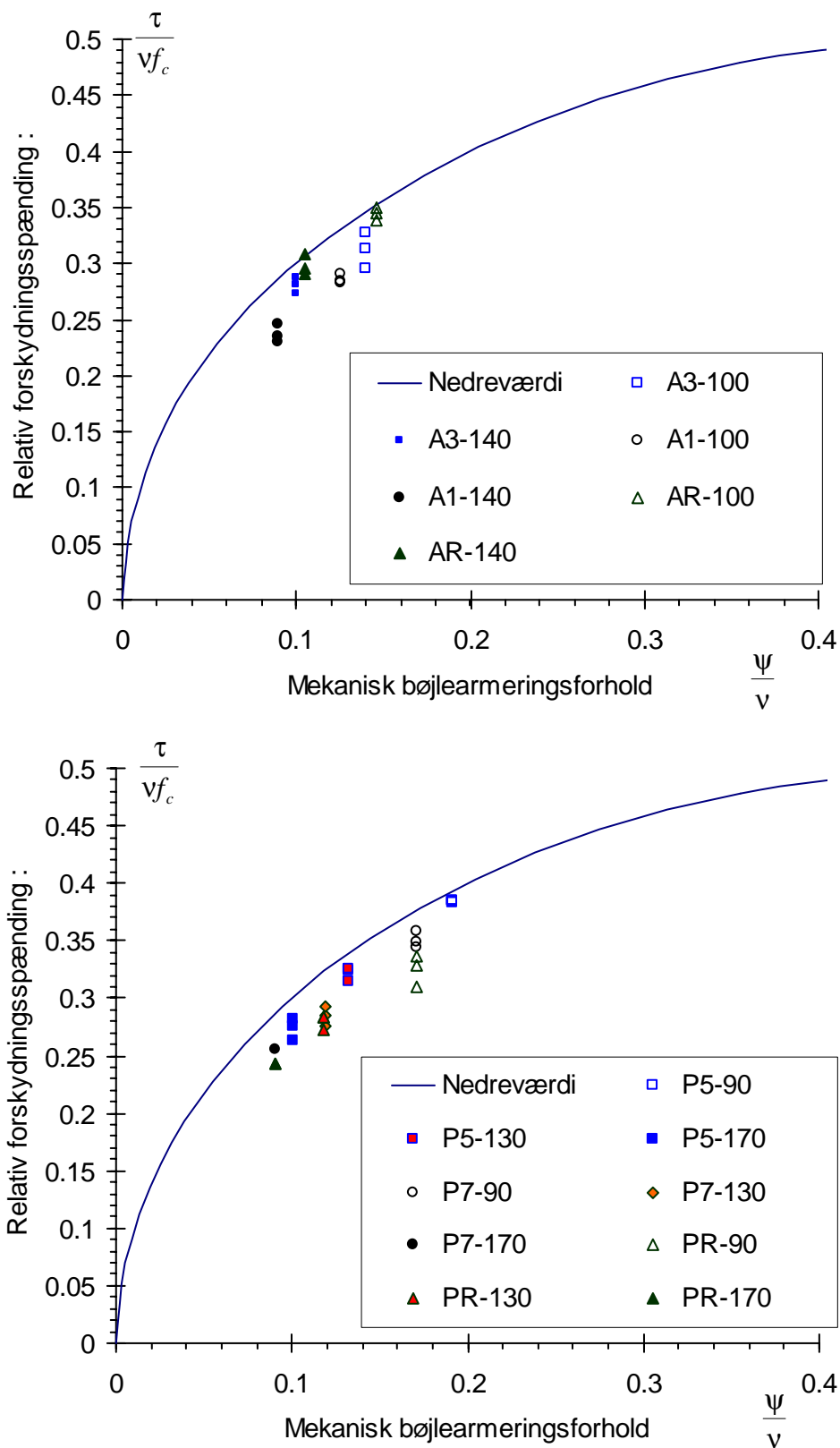
DS 411:1999 angiver følgende sammenhæng på den sikre side

$$v = 0,7 - \frac{f_c}{200\text{MPa}}$$

I Figur 8 er alle forsøgsresultaterne (Tabel 7 - Tabel 12) optegnet sammen med det teoretiske kvadratrodsudtryk med effektivitetsfaktoren givet ved ovenstående udtryk fra DS 411. Ved beregning af forskydningsspændingen er benyttet nominelle værdier for bjælkernes bredde og højde.

Som det ses ligger de målte bæreevner generelt lavere end den teoretiske forudsigelse på trods af, at v skulle være på den sikre side ifølge DS 411. Dette er et udtryk for, at normens effektivitetsfaktor er for høj i forhold til måleresultaterne. Det ses af Figur 8, at specielt A1 ligger markant under kurven, hvilket kan forklares ved, at netop A1 er en højstyrkebeton med $f_c = 66$ MPa (Tabel 5), som ligger udenfor normens gyldighedsområde. For P-betonerne ligger alle 3 typer omtrent ens i forhold til kvadratrodsudtrykket og dermed altså også referencebetonen.

Det kan vises, at hvis 0,7 reduceres til 0,6 i ovenstående udtryk for v ligger den teoretiske forudsigelse ganske tæt på de målte bæreevner. Det skal dog hertil siges, at resultaterne i nærværende forsøgsserie kun dækker et forholdsvist lille spektrum af de indgående parametre og derfor vil det være uvidenskabeligt at basere et nyt udtryk på disse forsøg alene.



Figur 8: Forsøgsresultater sammenlignet med teoretisk bæreevneudtryk med $v = 0,7 \cdot f_c / 200$. Tallene i signaturforklaringen angiver bøjleafstanden i mm.

5. Forankringsevne

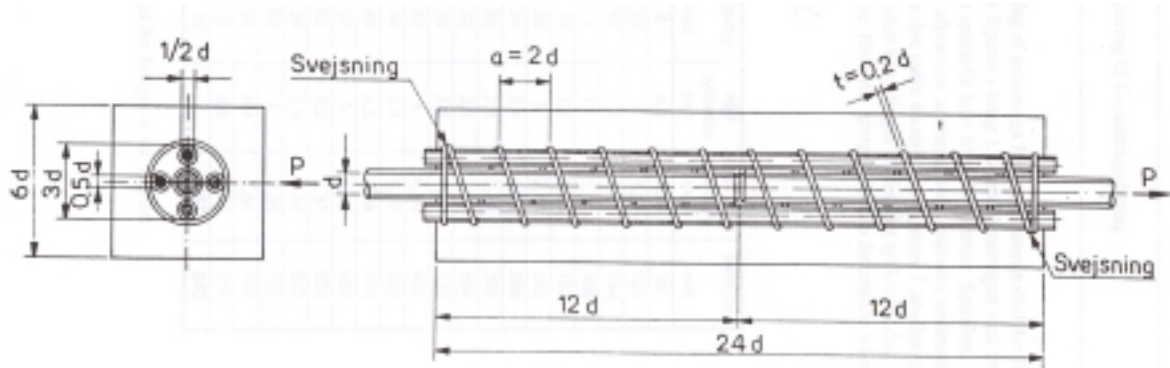
5.1 Formål

Forankringsbæreevnen af hver betontype er undersøgt på prøveemner identiske med dem, som benyttes i DS 2082:1980. Derved opnås en vurdering af hvorvidt de grønne betoners forankringsevne er anderledes end referencebetonerne.

5.2 Metodebeskrivelse

Fremgangsmåden for forsøgene følger i store træk DS 2082:1980. Denne standard har til formål at afprøve en given armeringstypes forankringsevne, relateret til forankringsevnen af gevindstål. Den standardiserede afprøvning resulterer normalt i en forankringsfaktor for den pågældende armeringstype.

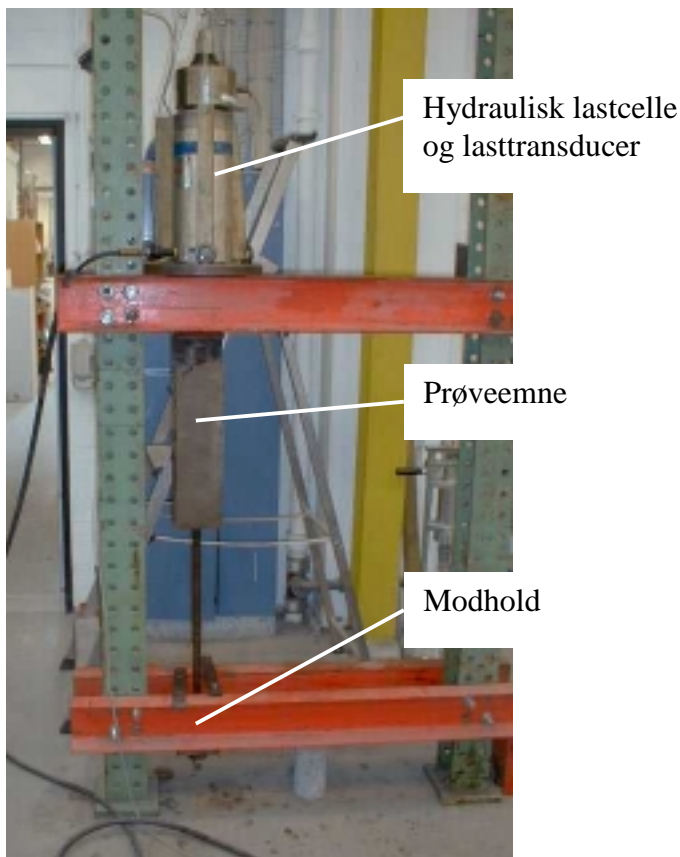
I nærværende prøvning benyttes metoden i stedet til at vurdere de forskellige grønne betontypers forankringsevne set i forhold til referencebetonerne. Forsøgene er udført med indstøbte gevindstænger (Figur 9) med $d = 20$ mm. I alt 4 forsøgsemner for hver beton er afprøvet. Prismerne er udstøbt med dimension $120 \times 120 \times 480$ mm og trækprøvet efter 29 døgnns forsejlet lagring. For hver beton er desuden trykprøvet 3 stk. standardcylindre $\text{Ø}150 \times 300$ mm i henhold til DS 423.23:1984.



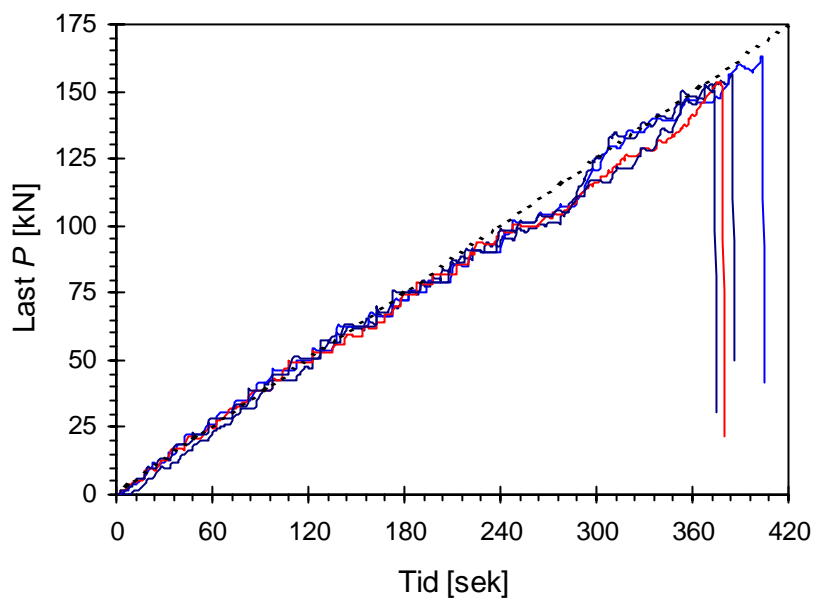
Figur 9: Forankringsforsøgsemne. Billede taget fra DS 2082. I den aktuelle forsøgsserie er benyttet $\text{Ø}20$ mm gevindstang, dvs. $d = 20$ mm.

Gevindstangsstålet har en garanteret trækstyrke på 688 MPa. Spiralarmeringen er 4 mm tråd og stødjern kamstål Y10 mm (Figur 9).

Trækopstillingen ses i Figur 10. Trækbelastningen P påføres manuelt med ca. 25 kN per minut indtil indtrædelse af et forankringsbrud. Kun belastningen registreres under forsøget, se eksempler på A3 forsøg i Figur 11. Typisk viser der sig trækrevner vinkelret på lastretningen på betonprismet der hvor de to gevindstænger støder sammen midt i emnet. Disse trækrevner opstår ca. ved den halve forankringsstyrke. På grund af de 4 gennemgående stødjern undgås et trækbrud. Når forankringsbæreevnen næsten er nået opstår der revner parallelt med gevindstangen startende ved prismets ender.



Figur 10: Forankringsforsøgsopstilling.



Figur 11: Eksempel på lasthistorien under forankringsforsøg med A3. Den stiplede diagonallinie angiver max. lasthastighed iht. DS 2082.

5.3 Trykstyrker

De målte trykstyrker er vist i Tabel 13 og Tabel 14.

Beton	Emne	Densitet [kg/m ³]	Trykstyrke [MPa]
AR	AR-150-16	2300	43,2
	AR-150-17	2309	43,3
	AR-150-18	2308	42,4
	Middel	2306	42,9
	Spredning	4,9	0,49
	Var.koeff. [%]	0,2	1,1
A1	A1-150-16	2370	63,9
	A1-150-17	2366	64,0
	A1-150-18	2371	64,4
	Middel	2369	64,1
	Spredning	2,6	0,28
	Var.koeff. [%]	0,1	0,4
A3	A3-150-16	2256	45,0
	A3-150-16	2241	42,4
	A3-150-16	2236	42,6
	Middel	2244	43,3
	Spredning	10,5	1,47
	Var.koeff. [%]	0,5	3,4

Tabel 13: A-betoner. Trykstyrker for forankringsforsøg. Styrken er bestemt på Ø150x300 mm cylindre, der er vandlagrede indtil prøvning ligesom prismerne.

Beton	Emne	Densitet [kg/m ³]	Trykstyrke [MPa]
PR	PR-150-16	2298	37,9
	PR-150-17	2320	39,1
	PR-150-18	2317	38,1
	Middel	2312	38,4
	Spredning	11,8	0,65
	Var.koeff. [%]	0,5	1,7
P5	P5-150-16	2313	32,9
	P5-150-17	2311	33,9
	P5-150-18	2321	33,7
	Middel	2315	33,5
	Spredning	5,0	0,54
	Var.koeff. [%]	0,2	1,6
P7	P7-150-16	2390	23,7
	P7-150-17	2392	23,2
	P7-150-18	2386	22,7
	Middel	2389	23,2
	Spredning	2,8	0,51
	Var.koeff. [%]	0,1	2,2

Tabel 14: P-betoner. Trykstyrker for forankringsforsøg. Styrken er bestemt på Ø150x300 mm cylindre, der er vandlagrede indtil prøvning ligesom prismerne.

Det skal bemærkes at styrken målt for P7 er fundet markant lavere end de styrker, der er registreret i forbindelse med forskydningsforsøgene (Tabel 6) og arbejdsurveforsøgene. Der er ikke umiddelbart fundet nogen påviselig grund hertil.

5.4 Forankringsstyrker

De maksimale belastninger målt under hvert forankringsforsøg er angivet i Tabel 15 og Tabel 16.

Beton	Emne	Brudlast P_{max} [kN]	Relativ
AR	AR-fo-1	141,6	-
	AR-fo-2	145,8	-
	AR-fo-3	139,2	-
	AR-fo-4	148,9	-
	Middel Spredning Var.koeff. [%]	143,9 4,3 3,0	1,00
A1	A1-fo-1	174,5	-
	A1-fo-2	174,7	-
	A1-fo-3	177,2	-
	A1-fo-4	172,6	-
	Middel Spredning Var.koeff. [%]	174,7 1,9 1,1	1,21
A3	A3-fo-1	156,4	-
	A3-fo-2	163,0	-
	A3-fo-3	153,4	-
	A3-fo-4	152,6	-
	Middel Spredning Var.koeff. [%]	156,3 5,8 3,7	1,09

Tabel 15: A-betoner. Forankringsstyrker. Relativ styrke angivet ved division med middelværdien for AR.

Beton	Emne	Brudlast P_{max} [kN]	Relativ
PR	PR-fo-1	134,1	
	PR-fo-2	136,2	
	PR-fo-3	137,1	
	PR-fo-4	131,2	
	Middel	134,6	
	Spredning	2,6	
	Var.koeff. [%]	2,0	
P5	P5-fo-1	115,6	
	P5-fo-2	112,9	
	P5-fo-3	121,9	
	P5-fo-4	122,7	
	Middel	118,2	
	Spredning	4,8	
	Var.koeff. [%]	4,0	
P7	P7-fo-1	120,5	
	P7-fo-2	110,4	
	P7-fo-3	121,4	
	P7-fo-4	118,8	
	Middel	117,8	
	Spredning	5,0	
	Var.koeff. [%]	4,3	

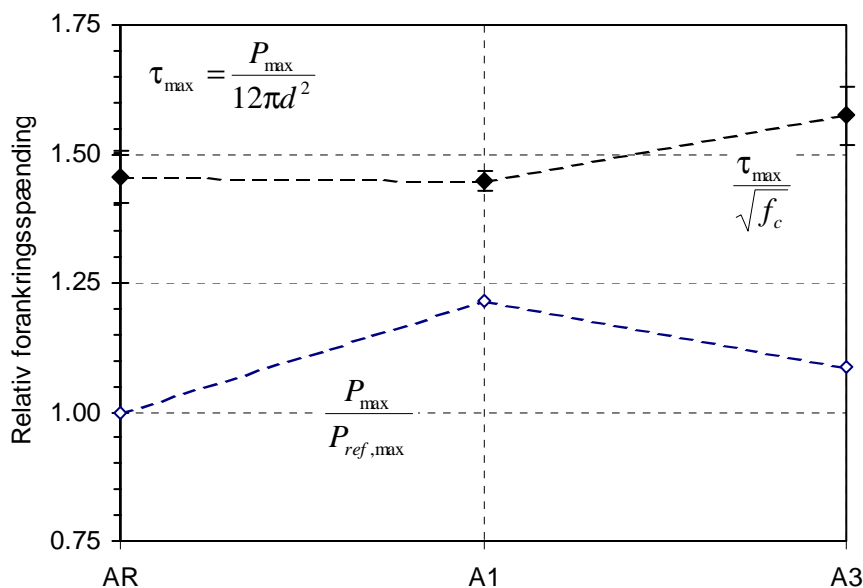
Tabel 16: P-betoner. Forankringsstyrker. Relativ styrke angivet ved division med middelværdien for PR.

5.5 Vurdering

Forankringsstyrkerne i Tabel 15 og Tabel 16 viser, at de grønne A-betoner er stærkere end referencebetonen, hvorimod det modsatte er tilfældet for de grønne P-betoner. Dette er afbilledet i Figur 12 og Figur 13 med åbne symboler.

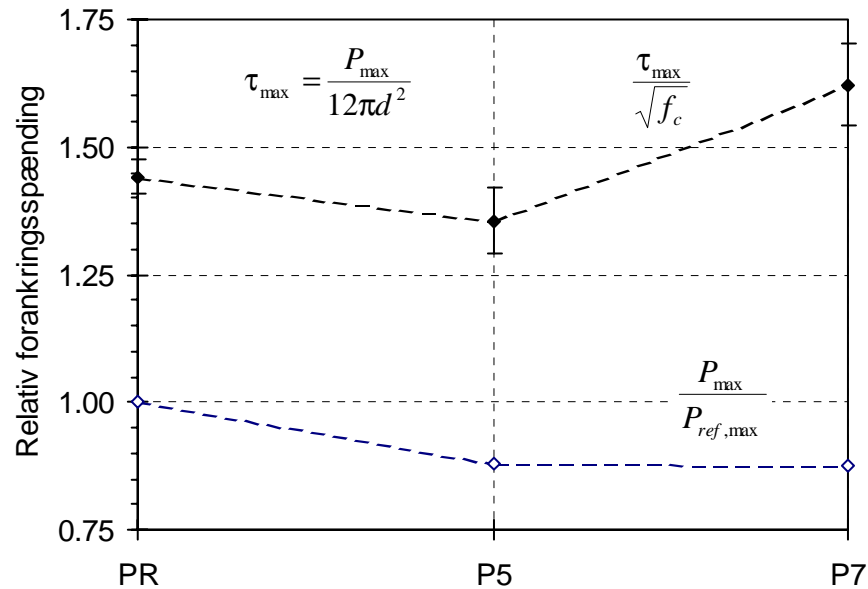
Det forudsættes almindeligvis, at betonens forankringsstyrke er proportional med dens trækstyrke. I henhold til DS 411:1999 varierer f_t som kvadratroden til f_c , hvilket også er tilfældet i henhold til CEB-FIP Model Code 1990 [3]. Den maksimale forankringslast P_{max} divideres med overfladearealet af den indstøbte gevindstang (Figur 9), hvorefter der opnås en nominal forskydningsspænding ensartet fordelt over forankringslængden. Denne forskydningsspænding divideres dernæst med $\sqrt{f_c}$ for at inkludere betonstyrkens indflydelse (afbilledet med udfyldte symboler i Figur 12 og Figur 13).

Det ses at både A1 og A3 har øget forankringsstyrke set i forhold til AR. Denne effekt kan dog især for A1's vedkommende tilskrives, at betonens styrkeniveau er øget.



Figur 12: Relative forankringsstyrker for A-betoner. Åbne symboler angiver middelbæreevner fra Tabel 15 divideret med referencebæreevnen for AR. Fyldte symboler angiver middelbæreevnen under hensyntagen til trykstyrken, inkl. dobbeltsidet 90 % konfidensintervaller på baggrund af 4 gentagelser for hver betontype.

For de passive betoners vedkommende ligger forankringsbæreevnen ca. 10 % lavere end referencebetonens (Figur 13). Når trykstyrkens indflydelse medregnes ses denne reduktion ikke at være signifikant og for P7 fås endda en lille forøgelse.



Figur 13: Relative forankringsstyrker for P-betoner. Åbne symboler angiver middelbæreevner fra Tabel 16 divideret med referencebæreevnen for PR. Fyldte symboler angiver middelbæreevnen under hensyntagen til trykstyrken, inkl. dobbeltsidet 90 % konfidensintervaller på baggrund af 4 gentagelser for hver betontype.

6. Konklusioner

6.1 Forskydningsbæreevne

Forskydningsforsøgene er sammenlignet med diagonaltrykmetoden benyttet i DS 411:1999. Det er fundet at den forskydningsbæreevne der opnås ved benyttelse af effektivitetsfaktoren i DS 411 generelt overstiger den målte en anelse og er derved på den usikre side. Dette er fundet at være mest markant for P-betonerne samt for A1, men ses også for referencebetonerne.

Forsøgsomfanget er imidlertid for lille til at korrigere normudtrykket.

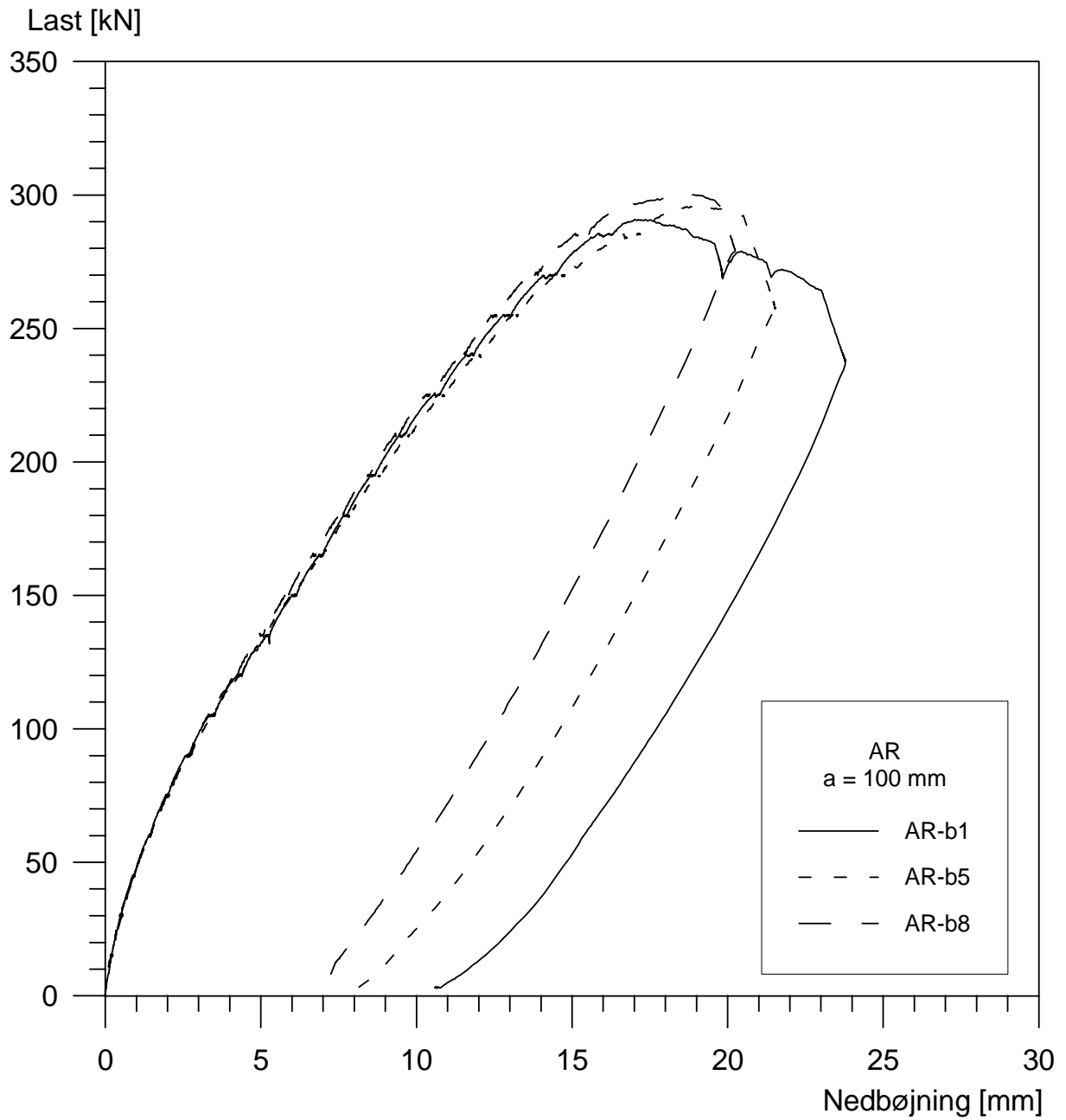
6.2 Forankringsstyrker

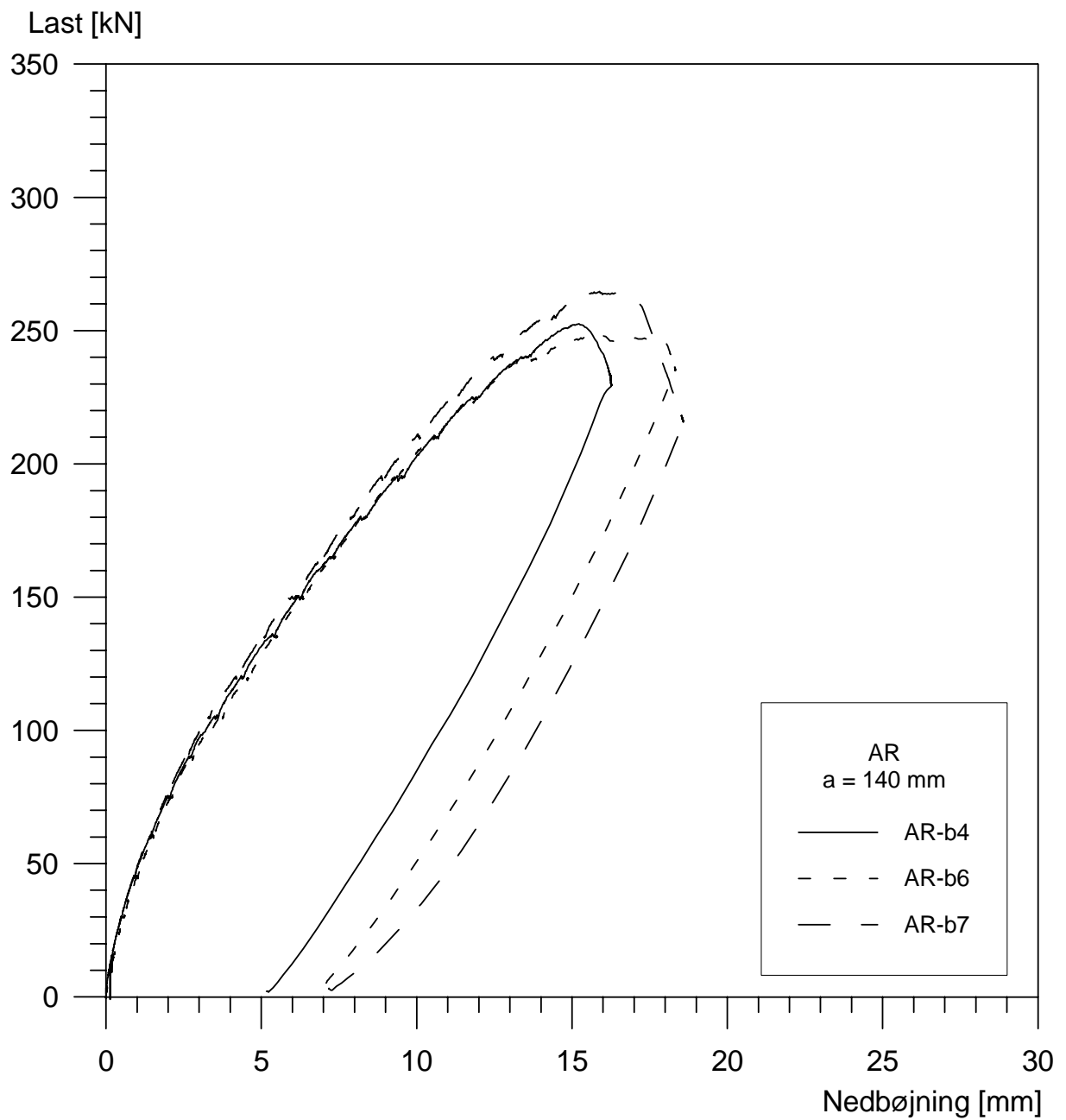
På baggrund af forankringsforsøgene kan det konkluderes, at der ikke er noget der tyder på, at de grønne betontyper har reduceret forankringskapacitet. Dette gælder for både de passive betontyper P5 og P7 samt de aggressive A1 og A3.

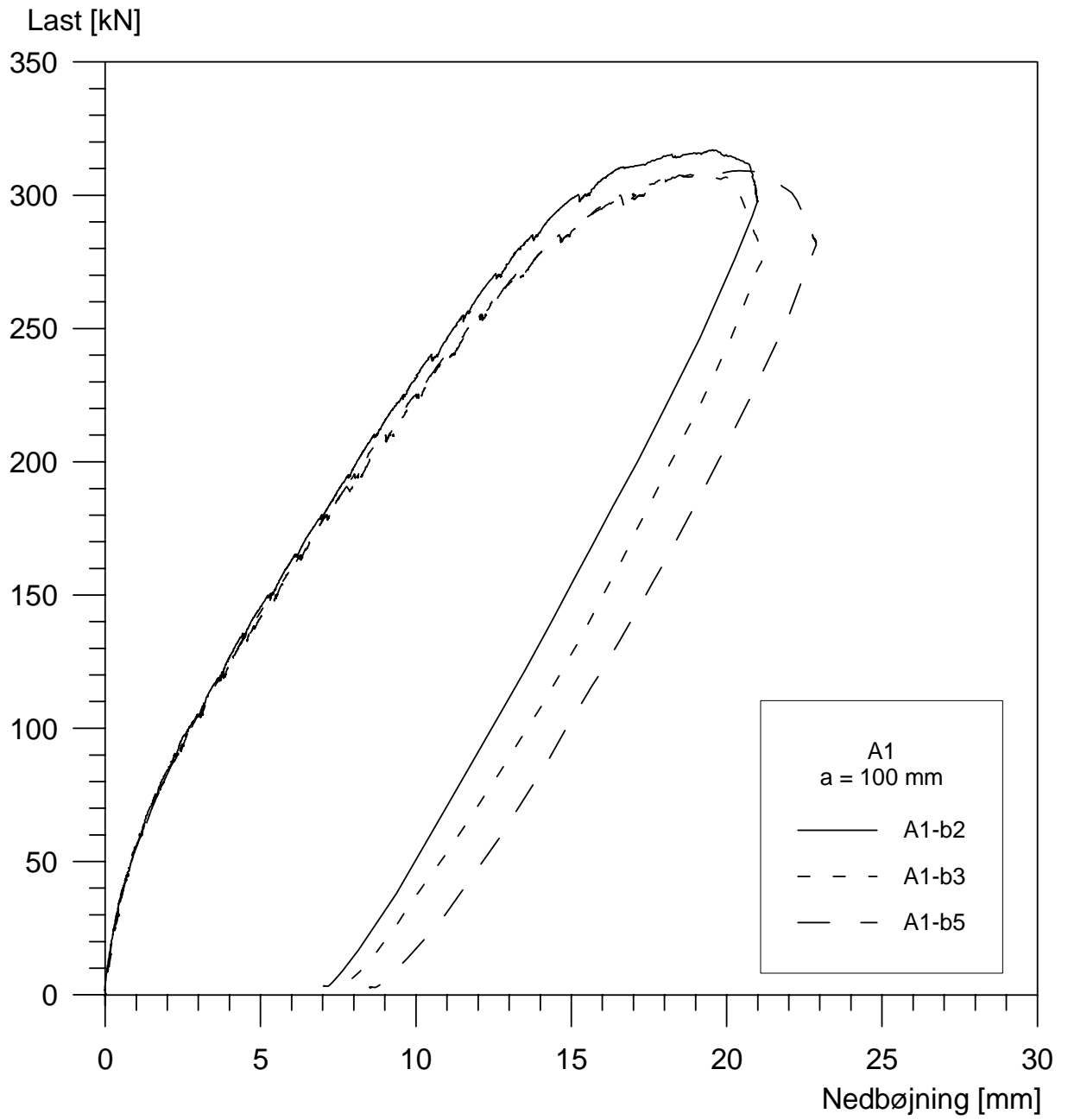
7. Referencer

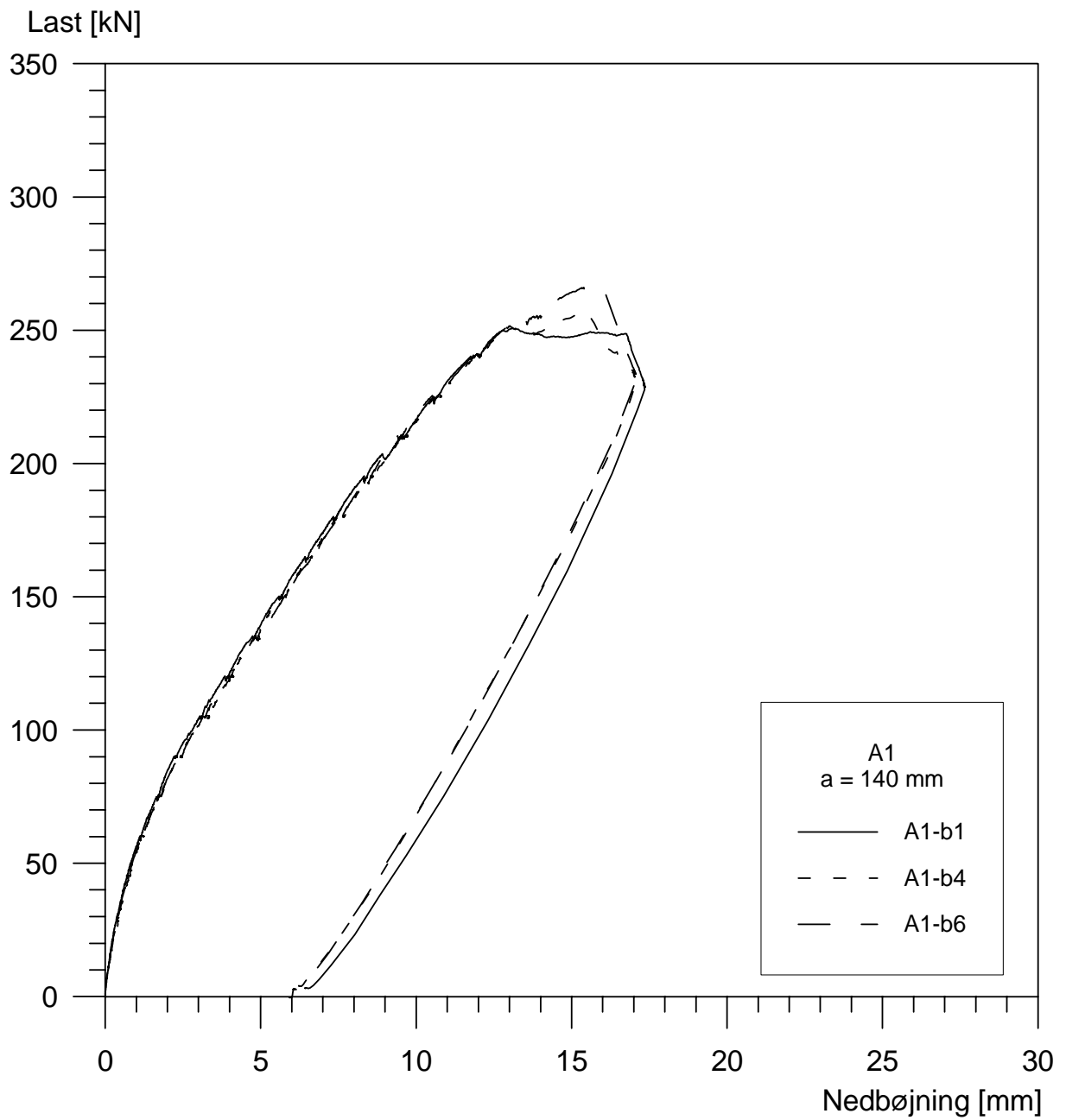
- [1] Nielsen, M.P. "Limit Analysis and Concrete Plasticity", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, U.S.A., 1984.
- [2] Christiansen, K. "Armerede Betonbjælker", Danmarks Ingeniørakademi, Bygningsafdelingen, Lyngby, 1983.
- [3] "CEB-FIP Model Code 1990", CEB-Bulletin No. 213/214, Comite Euro-International du Beton, 1993, pp. 82-85.

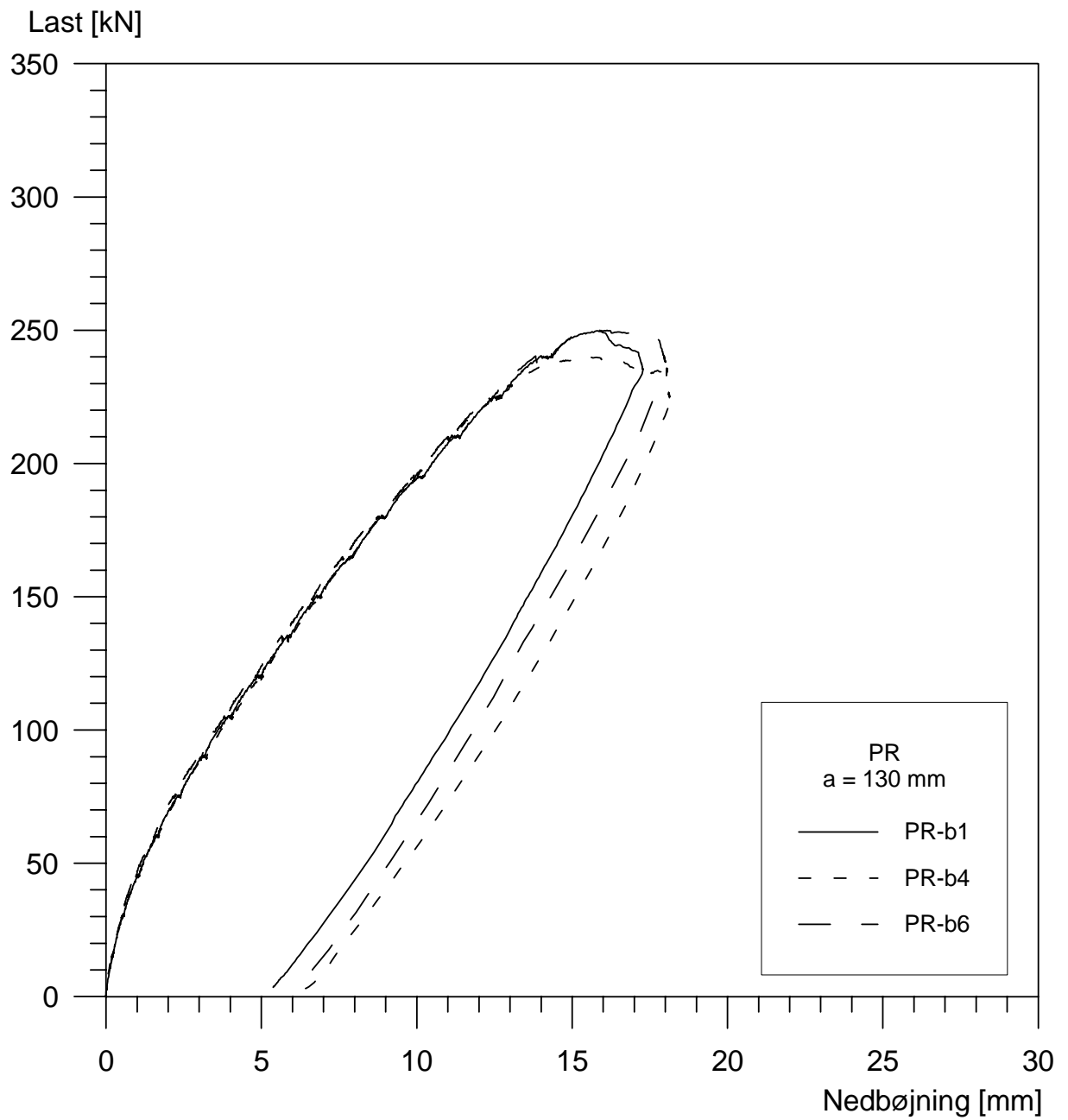
Appendiks A Eksempler på last – udbøjnings kurver for forskydningsforsøg

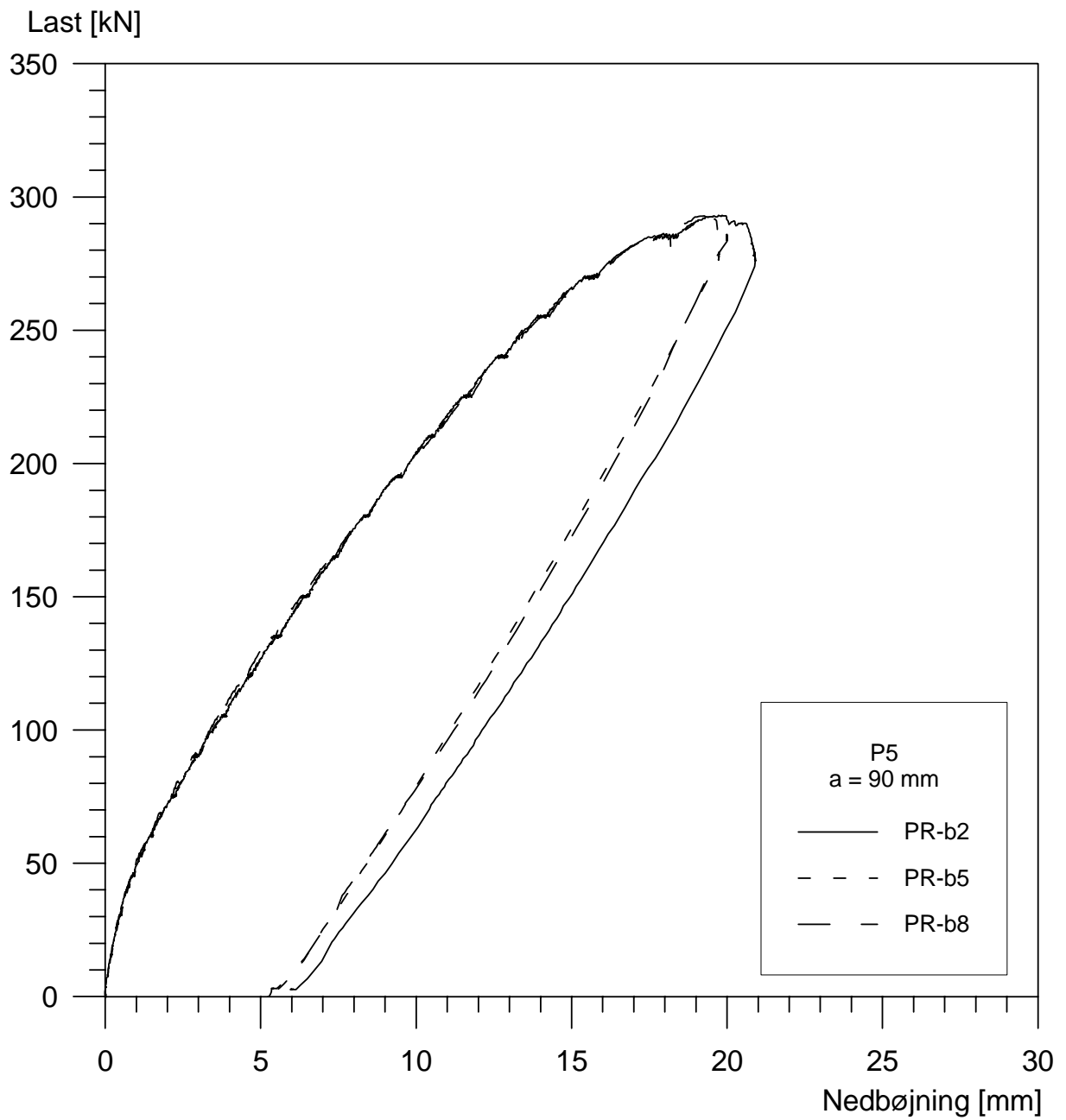












Appendiks B Billeder af forskydningsbjælker



Figur B-1: Bjælke AR-b2 efter bøjningsbrud over understøtningspunkt.



Figur B-2: Bjælke AR-b1.



Figur B-3: Bjælke AR-b5. Skrårevner stråler ud fra understøtningspunkt i bjælkens overside.



Figur B-4: Bjælke A1-b1.



Figur B-5: Bjælke A1-b3.



Figur B-6: Bjælke A3-b2.



Figur B-7: Bjælke A3-b3.



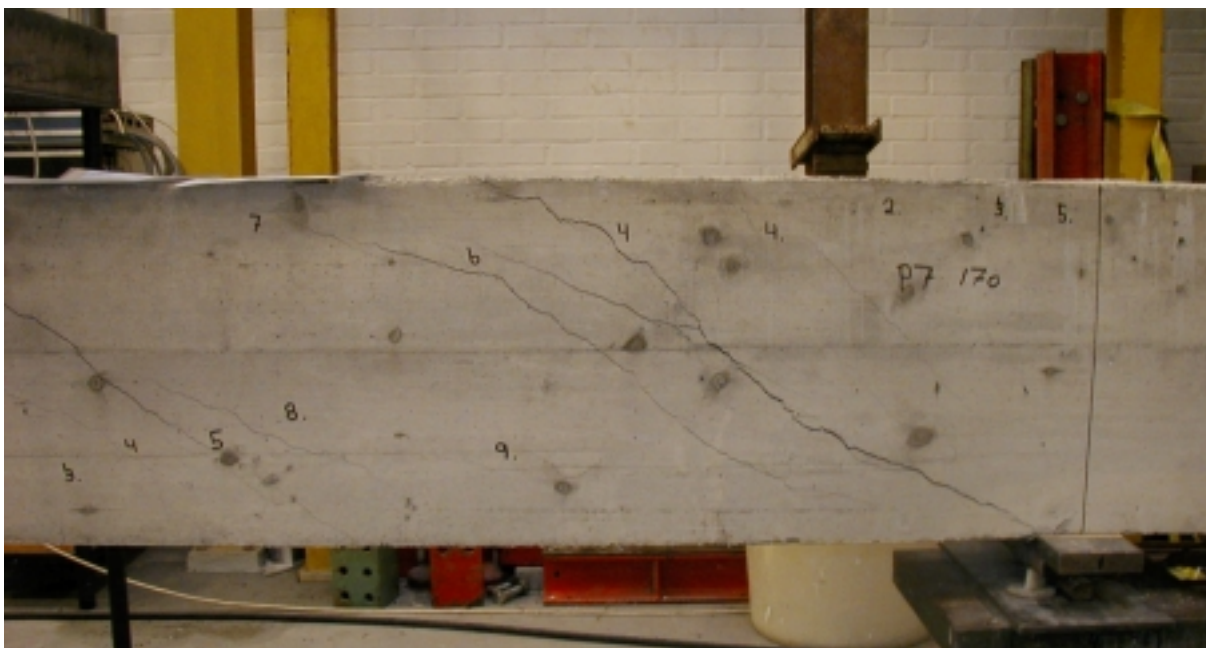
Figur B-8: Bjælke PR-b1.



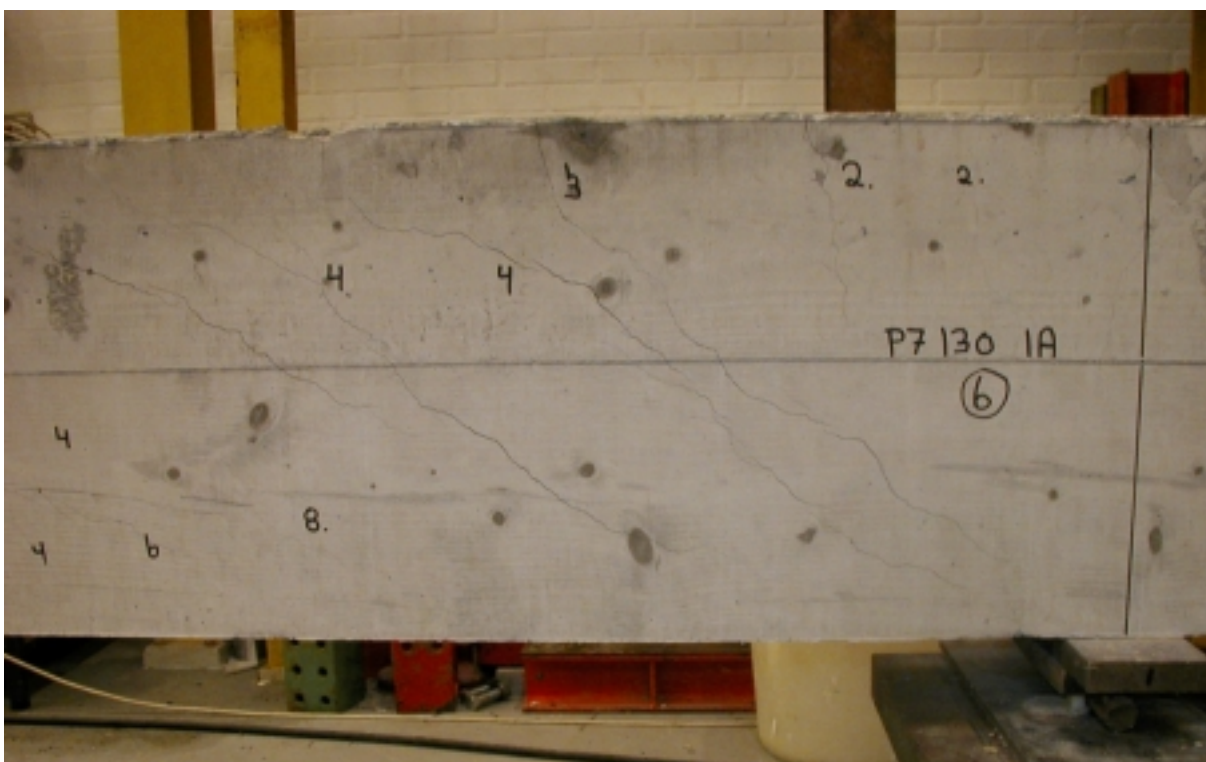
Figur B-9: Bjælke PR-b4.



Figur B-10: Bjælke P5-b3.



Figur B-11: Bjælke P7-b3.



Figur B-12: Bjælke P7-b6.

Appendiks C Prøvningsrapport for armering

Bilag kan rekvireres ved henvendelse til Teknologisk Institut, Beton.