



Center for Grøn Beton

Arbejdskurver, spaltetrækstyrke og udmattelsesundersøgelse

Udført af:

Claus Vestergaard Nielsen

Teknologisk Institut, Beton, december 2002

Titel: Arbejdskurver, spaltetrækstyrke og udmattelsesundersøgelse

Udført af: Claus Vestergaard Nielsen

Dato: December 2002

ISBN: 87-7756-679-3

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

Indholdsfortegnelse

0.	INDLEDNING	5
1.	PRØVNINGSOMFANG.....	6
2.	BETONRECEPTER	7
3.	ARBEJDSKURVER I ENAKSET TRYK	9
3.1	FORMÅL	9
3.2	METODEBESKRIVELSE.....	9
3.3	RESULTATER.....	10
3.4	TRYKSTYRKEUDVIKLING	18
3.5	VURDERING AF E-MODUL	19
4.	SPALTETRÆKSTYRKE	22
4.1	FORMÅL	22
4.2	METODEBESKRIVELSE.....	22
4.3	RESULTATER.....	22
4.4	VURDERING AF TRÆKSTYRKE	24
5.	UDMATTELSESUUNDERSØGELSE	26
5.1	FORMÅL	26
5.2	METODEBESKRIVELSE.....	26
5.3	RESULTATER.....	26
6.	KONKLUSIONER.....	28
6.1	TRYKARBEJDSKURVER.....	28
6.2	TRÆKSTYRKER.....	28
6.3	UDMATTELSE	28
7.	REFERENCER	29

Appendiks oversigt

APPENDIKS A MIDDELARBEJDSKURVER FOR A-BETONER

APPENDIKS B MIDDELARBEJDSKURVER FOR P-BETONER

APPENDIKS C ARBEJDSKURVER FOR AR

APPENDIKS D ARBEJDSKURVER FOR A1

APPENDIKS E ARBEJDSKURVER FOR A3

APPENDIKS F ARBEJDSKURVER FOR PR

APPENDIKS G ARBEJDSKURVER FOR P5

APPENDIKS H ARBEJDSKURVER FOR P7

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. arbejdskurver og spaltetrækstyrke, jf. tilsvarende rapport for *stor pakke*, samt udmattelsesforsøg.

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

- "BK1 – Stor Pakke, Mekaniske Egenskaber", Februar 2001.
- Forskydningsbæreevne af bjælker. Forankring af gevindstænger", 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 (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.

Arbejdskurver og spaltetrækstyrke bestemmes for 7 betoner, mens udmattelsesforsøg kun er gennemført for 2 A-beton (Tabel 2).

	AR	A0	A1	A3	A6	PR	P3	P5	P7
Arbejdskurve / spaltetrækstyrke	+	-	+	+	-	+	+	+	+
Udmattelse	+	-	+	-	-	-	-	-	-

Tabel 2: Prøvning af arbejdskurve og spaltetrækstyrke i BK1, *udvidet pakke*.

2. Betonrecepter

Betonrecepterne for de betragtede betoner er angivet i Tabel 3 og Tabel 4. Alle prøveemner for en given beton er støbt med beton fra ét læs.

Materiale	Type	AR-1 kg/m ³	AR-2 kg/m ³	A1 kg/m ³	A3 kg/m ³
cement	SAC NRC	308,2 -	309,9 -	- 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 Lynetten Betonslam (tørstof)	- -	- -	- -	30,9 -
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 Conplast SP610	- -	- -	0,81 -	- 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. arbejdskurve og spaltetrækstyrke. 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. arbejdskurve og spaltetrækstyrke. 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. Arbejdskurver i enakset tryk

3.1 Formål

Beregninger af betonkonstruktioners bæreevne baserer sig på en forudsætning om formen på betonens arbejdskurve. For at undersøge om de betragtede betoners arbejdskurver afviger fra det forløb, som normalt antages, udføres forsøg til bestemmelsen af disse. Prøvningen er en gentagelse af prøvning i stor pakke, dog ved en anden prøvningstermin.

3.2 Metodebeskrivelse

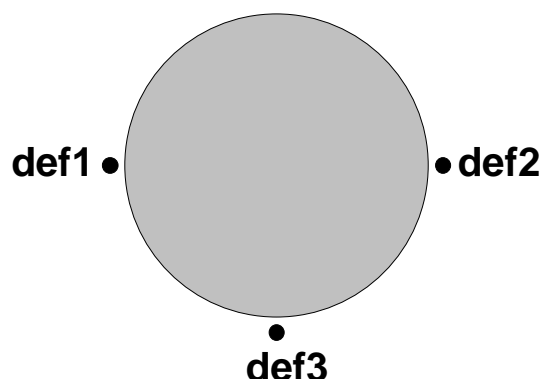
Arbejdskurverne er bestemt efter en modificeret DS 423.25:1984.

Forsøgene udføres på standardcylindre $\text{Ø}100 \times 200 \text{ mm}$, der er holdt forseglede fra afformnings- til prøvningstidspunktet. Forsøgene udføres ved 28 døgn. For hver beton er arbejdskurven bestemt på 5 emner.

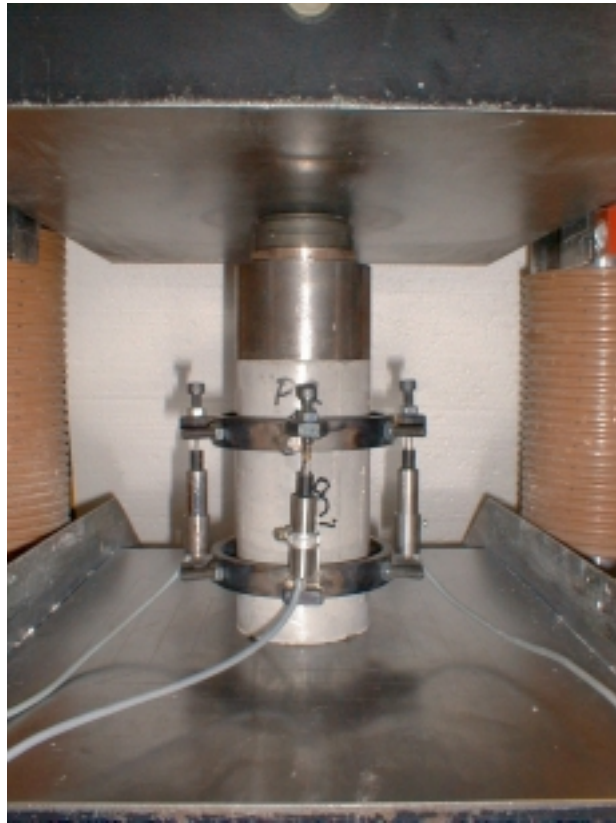
For at bestemme den nedadgående del af arbejdskurven efter trykstyrken er opnået, påføres lasten med konstant deformationshastighed i stedet for med konstant lasthastighed som foreskrevet i DS 423.25:1984. Trykprøvemaskinens stempel vandrer nedad med en konstant hastighed på ca. $0,0025 \text{ mm/sek.}$, svarende til ca. $0,4 \text{ MPa/sek.}$, hvis hele deformationen overføres til prøveemnet. En del af deformationen optages imidlertid i prøvemaskinen, idet prøvemaskine og prøveemne virker som to fjedre i serieforbindelse. Prøvemaskinen virker som en elastisk fjeder, hvorimod betonen afviger fra lineær opførsel, når belastningen nærmer sig brud. Målingerne viser at med den anvendte deformationshastighed på $0,0025 \text{ mm/sek.}$ fås ca. $0,1 \text{ MPa/sek.}$

Ved bestemmelse af E-moduler efter DS423.25:1984 skal lasthastigheden være $0,8 \pm 0,2 \text{ MPa/sek.}$ Det var dog ikke muligt at anvende en hastighed i dette område pga. betonernes skørhed.

Deformationerne måles vha. 3 flytnings-transducere over de midterste 100 mm af prøveemnet (Figur 1 og Figur 2). Det anvendte udstyr er en modificering af eksisterende udstyr til E-modul bestemmelse, hvor kun to transducere anvendes. Arbejdskurverne præsenteres som lasten divideret med cylinderens tværsnitsareal afbilledet som en funktion af tøjningen af cylinderens midterakse, dvs. middelværdien af def1 og def2. Den tredje deformationsmåling benyttes til at vurdere, hvorvidt tøjningerne er ensformig fordelt.



Figur 1: Placering af transducere.



Figur 2: Prøveemne til bestemmelse af arbejdskurve monteret med flytningstransducere.

3.3 Resultater

I Appendiks ses de målte arbejdskurver for hhv. aggressive og passive betoner. For at lette sammenligningen indeholder Figur 3 - Figur 8 dimensionsløse kurver for hver betontype, hvor spænding og tøjning er gjort dimensionsløse ved at dividere med værdierne svarende til toppunktet.

Spændings – tøjnings diagrammerne (Figur 3 - Figur 8) indeholder endvidere en parabelkurve samt en analytisk kurve anbefalet af CEB-FIP Model Code 1990 [2]:

$$\frac{\sigma}{f_c} = \frac{A \frac{\epsilon}{\epsilon_c} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c} \right)^2}{1 + (A-2) \frac{\epsilon}{\epsilon_c}}, \quad A = \frac{E_0}{f_c} \epsilon_c \geq 1$$

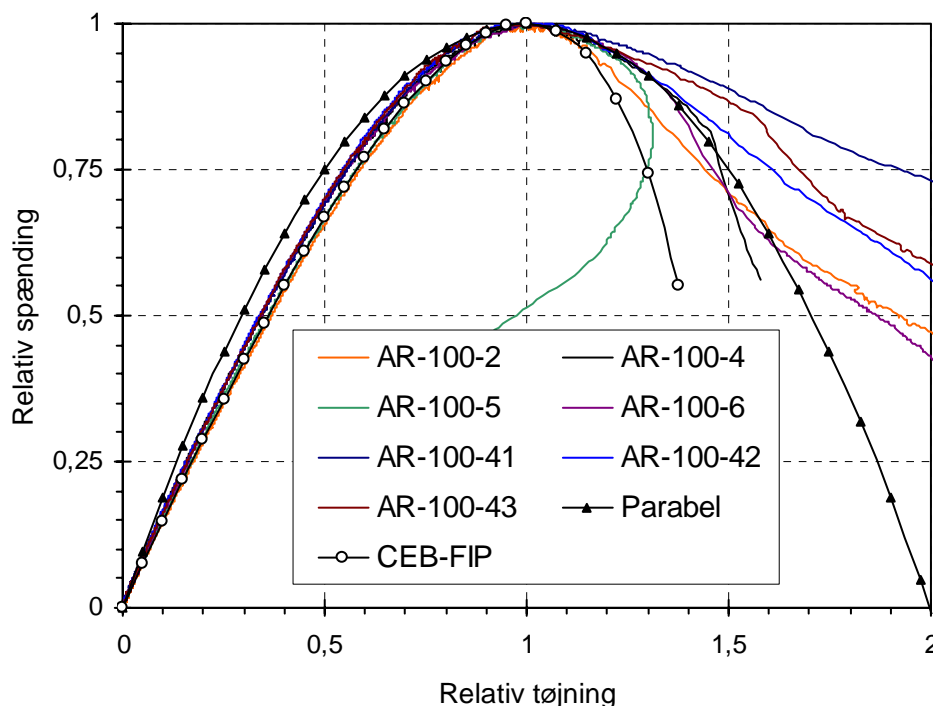
hvor A = forholdet mellem begyndelses E-modulet og sekant E-modulet svarende til kurvens toppunkt og (ϵ_c, f_c) = samhørende tøjning og spænding i toppunktet. Ovenstående udtryk har vandret tangent i toppunktet og kan benyttes så længe arbejdskurvens nedadgående del er højere end $f_c/2$ ifølge [2]. For den resterende nedadgående del anviser et asymptotisk udtryk i [2], som ikke skal gengives her.

CEB-FIP Model Code 1990 forudsætter, at $\epsilon_c = 2,2 \text{ ‰}$ uafhængig af betontrykstyrken, hvilket er analogt til DS 411:1999, hvor $\epsilon_c = 2 \text{ ‰}$ er forudsat. Arbejdskurverne i Appendiks A viser, at denne værdi er i udmærket overensstemmelse med målingerne undtaget for PR, hvor ϵ_c ligger lavere.

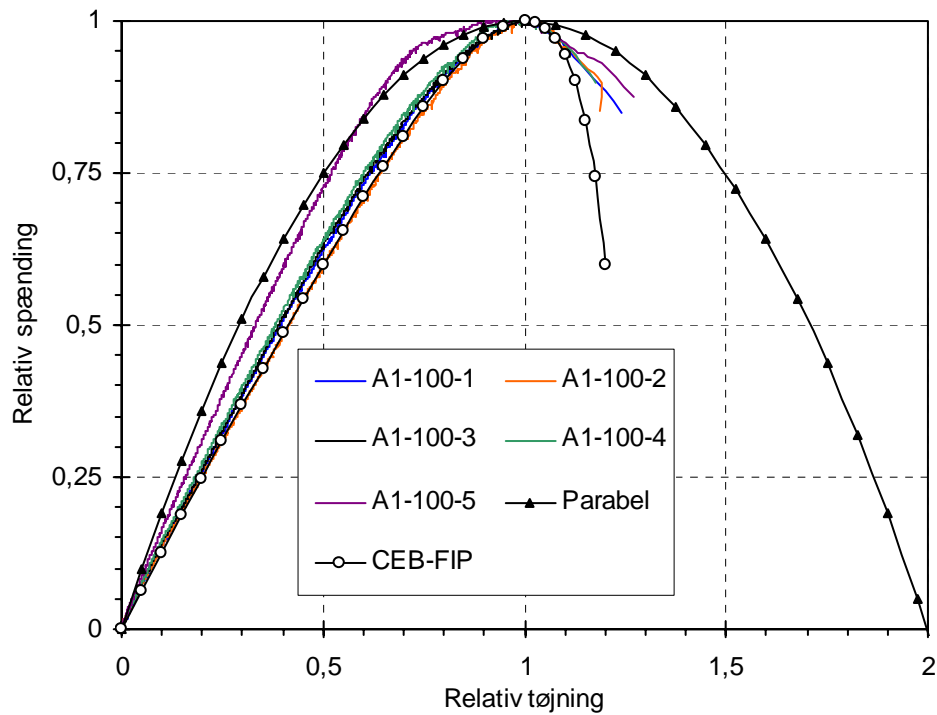
Reference [2] angiver værdier for parameteren A svarende til forskellige betonkvaliteter, faldende fra 3 for en lavstyrke beton til 1,7 for en normal beton (40 MPa) og til 1,1 for en højstyrke beton (80 MPa). Bemærk at i grænsen $A = 1$ fås en lineær-elastisk opadgående arbejdskurve samt en lodret nedadgående del, svarende til et skørt brud. For $A = 2$ fås sammenfald med parabelkurven.

I diagrammerne er CEB-FIP udtrykket optegnet med værdier af parameteren A svarende til en middelværdi af målingerne for hver enkelt betontype. Det er fundet, at A falder med trykstyrken i store træk som angivet i [2]. For P-betonerne betyder dette, at arbejdskurven stort set følger parabeln undtaget for P7, som opfører sig mere sejt. Desuden ses det, at CEB-FIP udtrykket generelt undervurderer den nedadgående del af arbejdskurven.

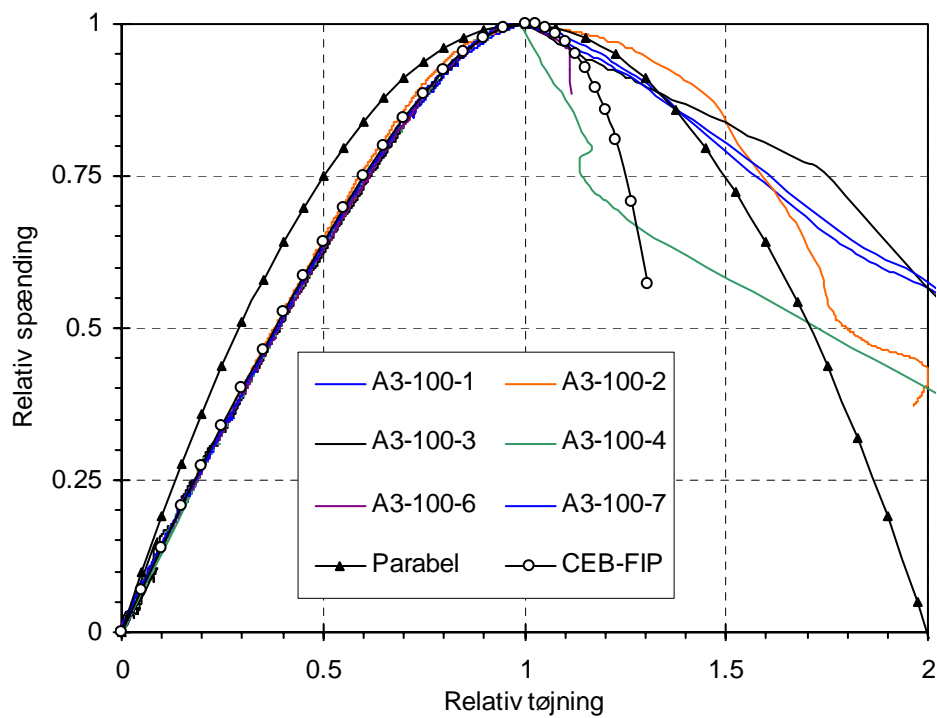
DS 411:1999 tillader kun at bruge tøjninger op til 3,5 ‰ på den nedadgående del af arbejdskurven, svarende til en dimensionsløs tøjning på ca. 1,75 på diagrammernes vandrette akser.



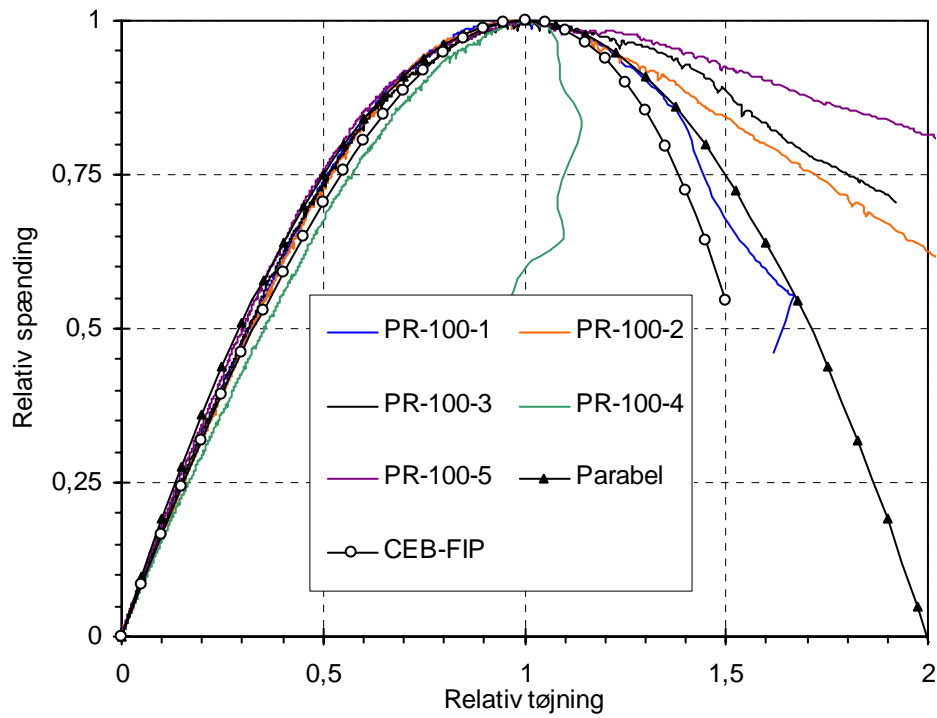
Figur 3: Dimensionsløse arbejdskurver, σ/f_c vs. ϵ/ϵ_c , for AR (jf. Appendiks A).



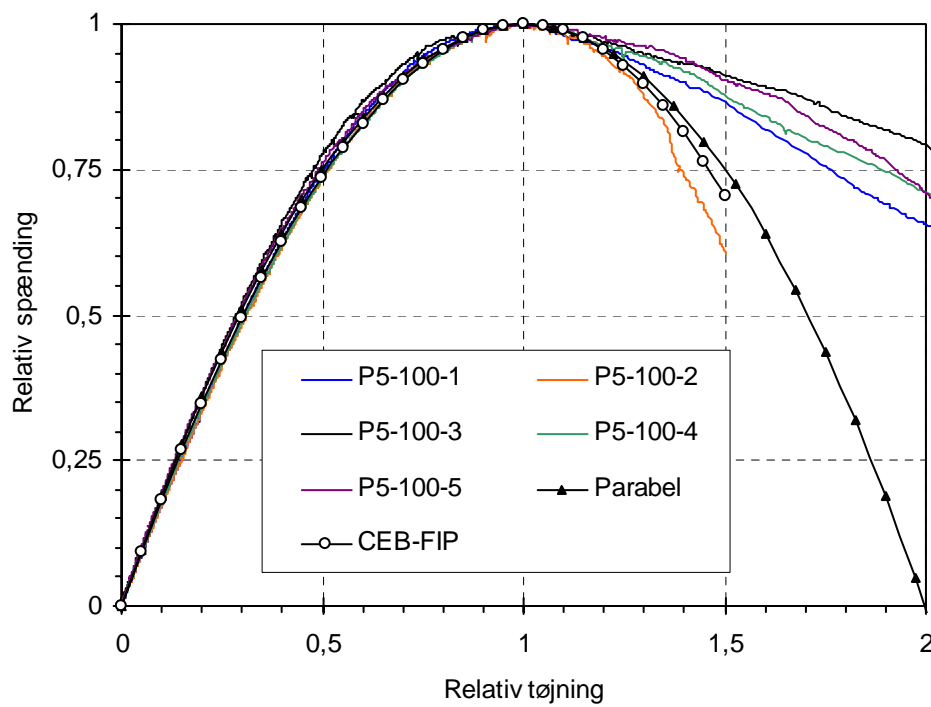
Figur 4: Dimensionsløse arbejdskurver, σ/f_c vs. ϵ/ϵ_c , for A1 (jf. Appendiks A). Kurverne stopper brat efter passage af toppunktet pga. eksplosivt brud.



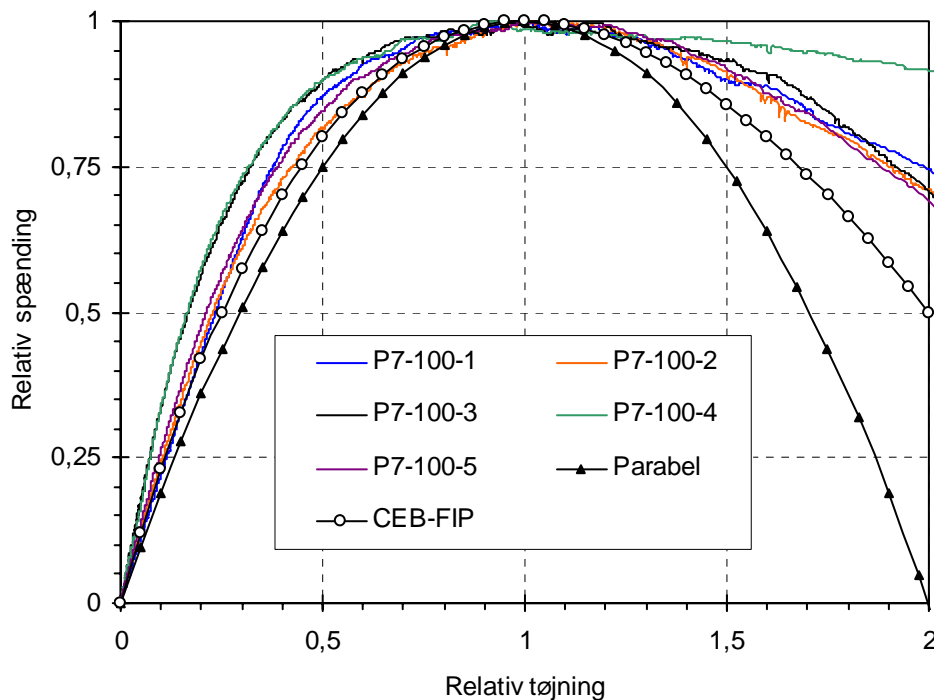
Figur 5: Dimensionsløse arbejdskurver, σ/f_c vs. ϵ/ϵ_c , for A3 (jf. Appendiks A).



Figur 6: Dimensionsløse arbejdskurver, σ/f_c vs. ϵ/ϵ_c , for PR (jf. Appendiks B).



Figur 7: Dimensionsløse arbejdskurver, σ/f_c vs. ϵ/ϵ_c , for P5 (jf. Appendiks B).



Figur 8: Dimensionsløse arbejdskurver, σ/f_c vs. ϵ/ϵ_c , for P7 (jf. Appendiks B).

Det kan konstateres, at beton A1 udviste eksplosiv opførsel kort efter passage af toppunktet (Figur 4), hvilket tilskrives utilstrækkelig stivhed af prøvningsmaskinens set i forhold til arbejdskurvens nedadgående hældning. Dette problem er dermed betinget af forsøgsopstillingen og ikke en materialeegenskab.

Begyndelses E-modulet er bestemt ved en lineær regressionsanalyse på målingerne foretaget mellem 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken. Resultatet af denne analyse er vist sammen med de opnåede trykstyrker og målte densiteter i Tabel 5 og Tabel 6.

Bemærk at forsøgsemne AR-100-1 er udeladt i Tabel 5. Dette skyldes, at forsøget forløb meget atypisk, jf. Appendiks C. Desuden ligger arbejdskurverne for både AR-100-5 og AR-100-6 relativt lavt, men der er ikke noget i disse forsøg, der indikerer uregelmæssigheder.

For at have et tilstrækkeligt stærkt statistisk grundlag for AR er supplerende arbejdskurver inkluderet i analysen (se Fig. A-1, A-2 og A-3 i Appendiks A). Af Tabel 5 fremgår det, at 3 prøveemner med løbenumre 41 til 43 er prøvet ved 30 døgn og endvidere er 5 prøveemner, udtaget fra en støbning til Demobroen, prøvet ved 32 døgn. Disse i alt 12 forsøg for beton AR er dermed ikke fuldstændig identiske hvad angår betonrecept og termin.

Beton	Emne	Densitet [kg/m ³]	E-modul [MPa]	Trykstyrke [MPa]
AR	AR-100-2	2342	27300	39,3
	AR-100-4	2324	27400	39,3
	AR-100-5	2320	25900	31,9
	AR-100-6	2301	25800	32,9
	AR-100-41*	2350	30100	38,3
	AR-100-42*	2351	28700	39,1
	AR-100-43*	2323	27900	37,5
	ARdemo-100-1**	2338	30800	38,8
	ARdemo-100-2**	2332	29600	38,0
	ARdemo-100-3**	2368	29400	37,9
	ARdemo-100-4**	2338	29900	39,9
	ARdemo-100-5**	2358	30500	40,5
	Middel	2337	28400	37,8
Spredning	17,8	1750	2,7	
Var.koeff. [%]	0,8	6,2	7,0	
A1	A1-100-1	2369	33100	59,5
	A1-100-2	2389	33900	57,9
	A1-100-3	2356	31000	59,7
	A1-100-4	2364	32200	59,5
	A1-100-5	2349	32800	55,0
	Middel	2365	32600	58,3
Spredning	15,4	1080	2,0	
Var.koeff. [%]	0,7	3,3	3,4	
A3	A3-100-1	2212	26800	41,1
	A3-100-2	2212	26000	39,2
	A3-100-3	2200	30000	39,3
	A3-100-4	2230	27500	40,6
	A3-100-6	2210	27600	40,7
	A3-100-7	2227	27000	41,6
	Middel	2215	27500	40,4
	Spredning	11,2	1370	0,97
Var.koeff. [%]	0,5	5,0	2,4	

Tabel 5: A-betoner. Trykstyrke og begyndelses E-modul bestemt ud fra arbejdskurver ved 28 døgn undtaget for AR, hvor 3 forskellige terminer er inkluderet, jf. arbejdskurver i Appendiks A. Note: * 30 døgn; ** 32 døgn.

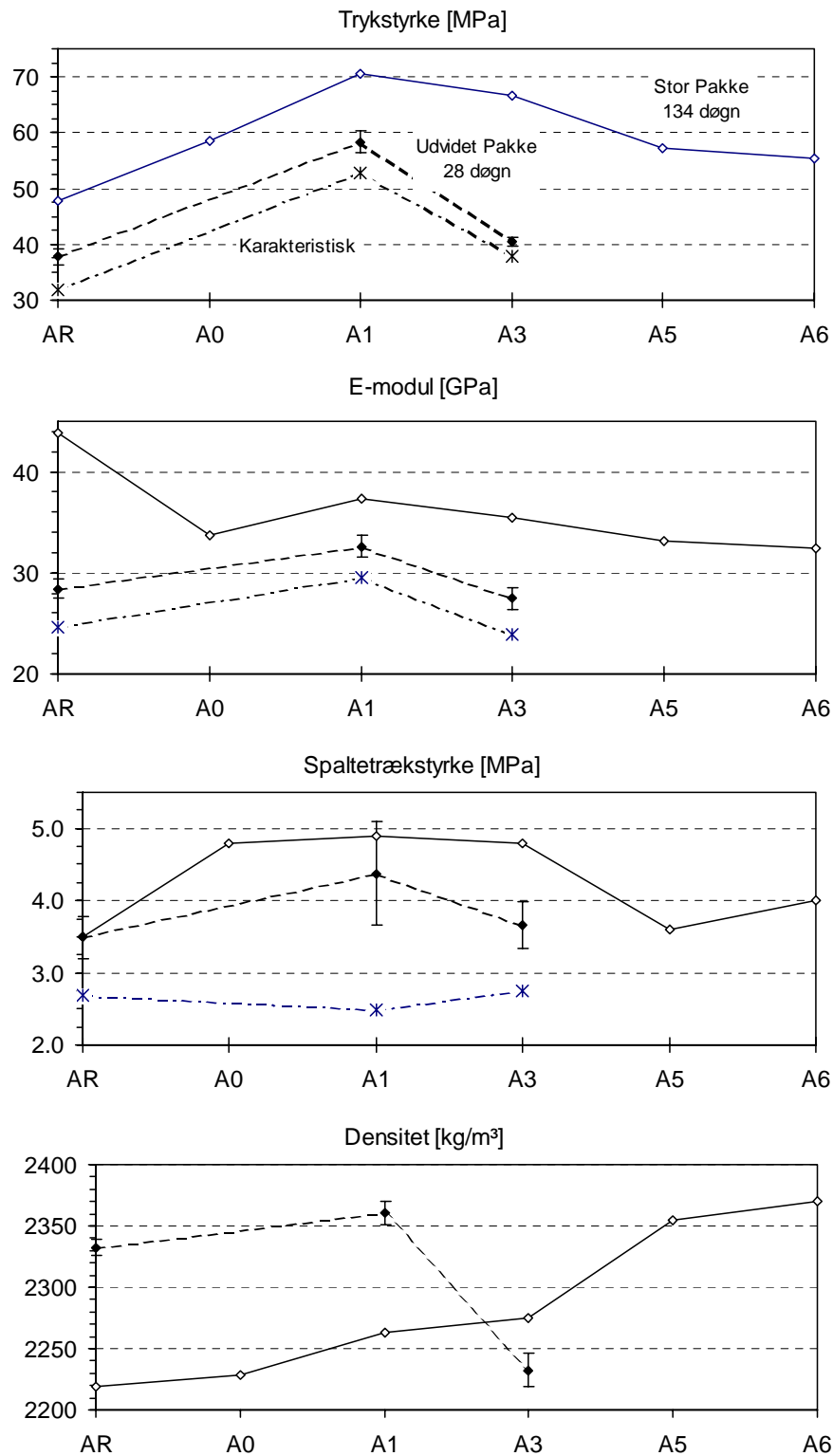
I Figur 9 og Figur 10 er middelværdier af 28 døgnns målingerne afbilledet sammen med 134 døgnns målingerne rapporteret under BK1, stor pakke. Desuden er der for resultaterne i udvidet pakke angivet dobbeltsidede konfidensintervaller for middelværdien svarende til et konfidensniveau på 90 %. Endelig indeholder Figur 9 og Figur 10 karakteristiske 28 døgnns værdier for trykstyrken, begyndelses E-modulet og spaltetrækstyrken. De karakteristiske værdier er tabelleret samlet i Tabel 9.

Beton	Emne	Densitet [kg/m ³]	E-modul [MPa]	Trykstyrke [MPa]
PR	PR-100-1	2327	32400	33,5
	PR-100-2	2321	30900	35,6
	PR-100-3	2335	33700	34,0
	PR-100-4	2344	37000	36,9
	PR-100-5	2312	30600	33,5
	Middel	2328	32900	34,7
	Spredning Var.koeff. [%]	12,6 0,5	2580 7,8	1,5 4,3
P5	P5-100-1	2291	29500	33,2
	P5-100-2	2301	30300	33,2
	P5-100-3	2299	29700	31,7
	P5-100-4	2305	31300	30,7
	P5-100-5	2295	27500	29,7
	Middel	2298	29700	31,7
	Spredning Var.koeff. [%]	5,2 0,2	1400 4,7	1,5 4,9
P7	P7-100-1	2401	29600	31,1
	P7-100-2	2401	32200	30,3
	P7-100-3	2393	29100	26,5
	P7-100-4	2381	29600	27,0
	P7-100-5	2399	32100	29,8
	Middel	2395	30500	28,9
	Spredning Var.koeff. [%]	8,6 0,4	1500 4,9	2,1 7,1

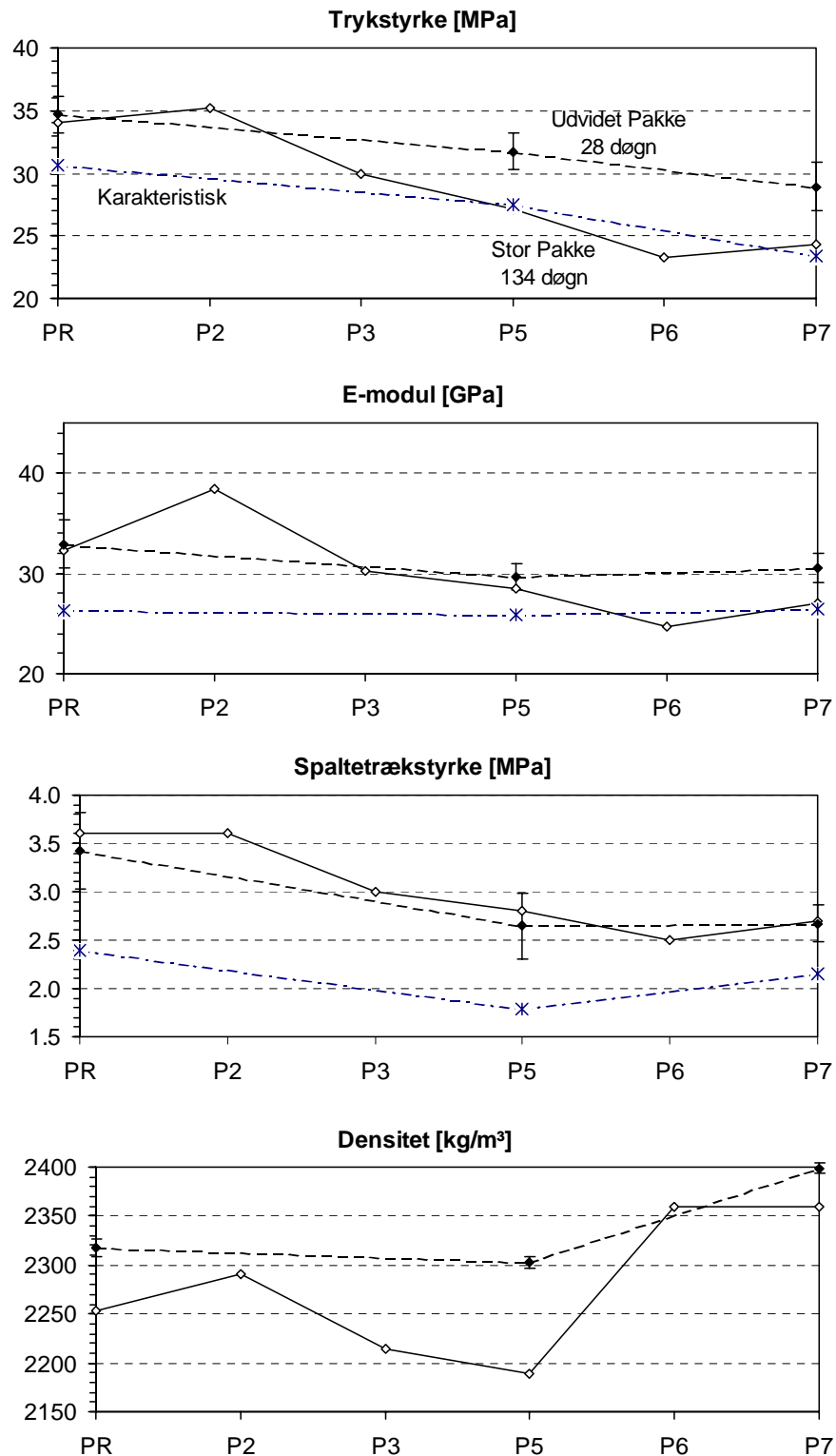
Tabel 6: P-betoner. Trykstyrker og begyndelses E-modul bestemt ud fra arbejdskurver ved 28 døgn.

Det ses af Figur 9, at referencebetonen AR ligger for lavt i forhold til DS 411's karakteristiske trykstyrkekrav på 35 MPa. Det er i den forbindelse konstateret, at trykstyrken bestemt i forbindelse med arbejdskurveforsøgene (Tabel 5) for AR ligger 5-6 MPa lavere end de trykstyrker, som er bestemt på Unicons fabrik i Horsens på vandlagrede Ø150×300mm standard-cylindre udstøbt fra samme støbning. Det skal bemærkes, at trykstyrkebestemmelsen udført i forbindelse med forskydnings- og forankringsforsøgene under BK1 – udvidet pakke, er i udmærket overensstemmelse med Unicons egne målinger. Dermed må det konkluderes, at ovennævnte forskel i de målte trykstyrker primært skyldes forskellige forsøgsmetoder, forsøgsudstyr, cylinderstørrelse, lagringsbetingelse mv. samt, at den pågældende støbning af AR var behæftet med markante styrkevariationer.

For de øvrige betontyper er der også fundet forskelle på trykstyrker målt under forskellige forsøgsbetingelser, men ikke så markante som beskrevet ovenfor.



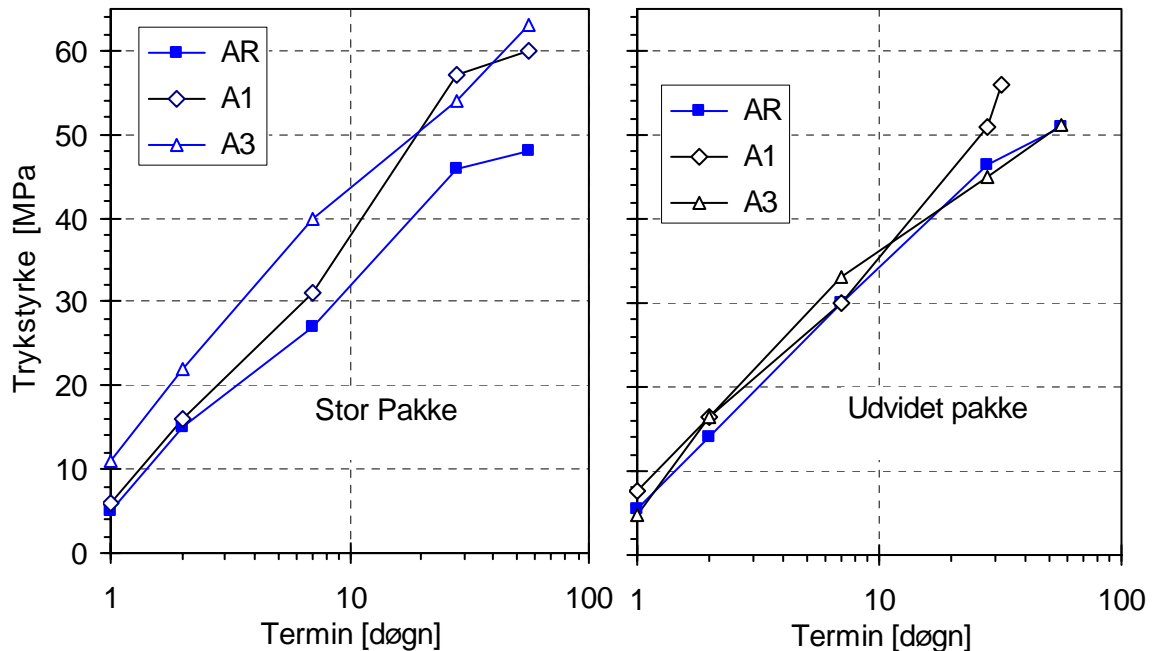
Figur 9: A-betoner. Sammenligning af middelværdier (28 døgner) fra Tabel 5 og Tabel 7 og karakteristiske værdier (Tabel 9) samt middelværdier fra stor pakke (134 døgner).



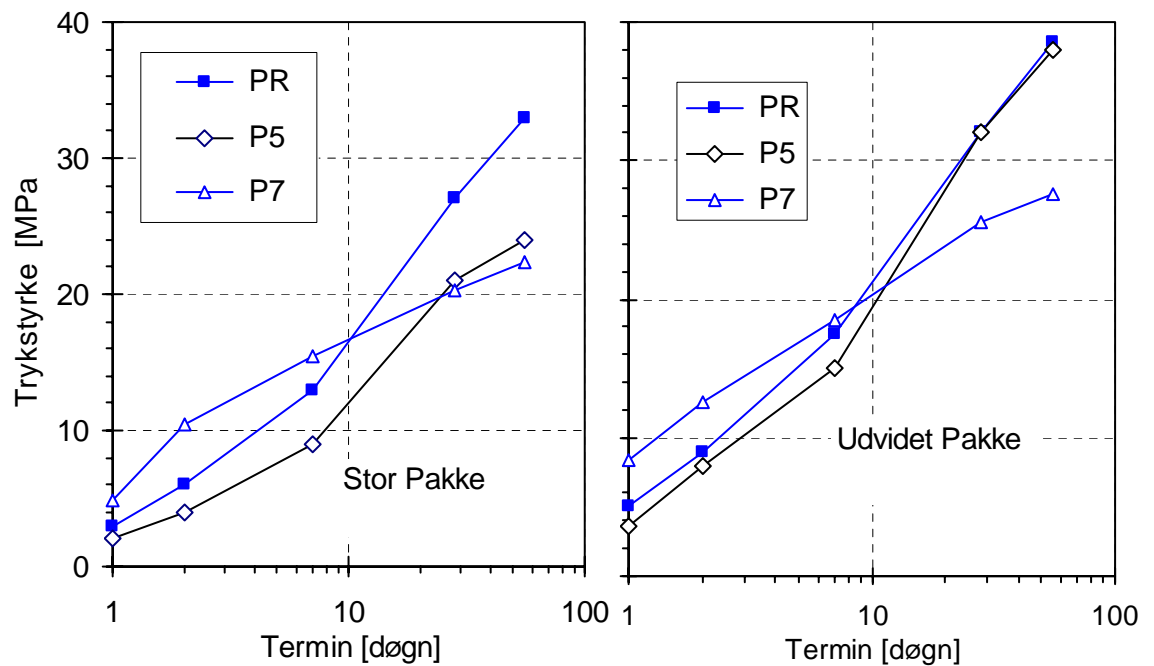
Figur 10: P-betoner. Sammenligning af middelfresultater (28 døgner) fra Tabel 6 og Tabel 8 og karakteristiske værdier (Tabel 9) samt middelværdier fra stor pakke (134 døgner).

3.4 Trykstyrkeudvikling

På basis af de målte trykstyrker, foretaget til terminerne 1, 2, 7, 28 og 56 døgn af betonleverandøren, ses i Figur 11 og Figur 12 styrkeudviklingen.



Figur 11: Målt trykstyrkeudvikling for A-betoner. Ved en fejl blev A1 målt ved 32 døgn i stedet for 56 døgn

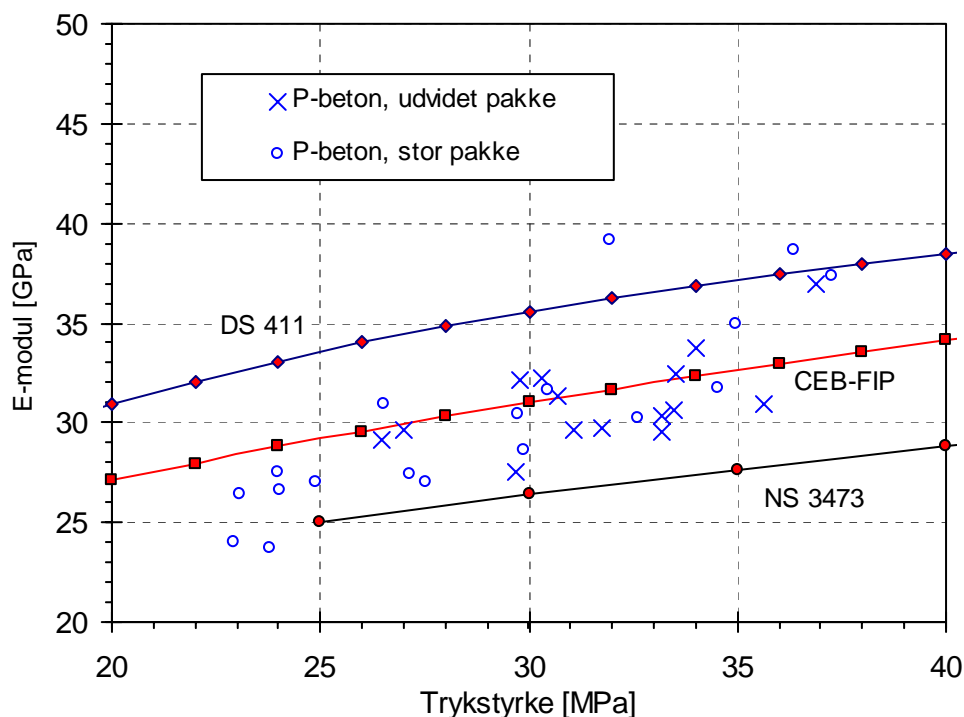


Figur 12: Målt trykstyrkeudvikling for P-betoner.

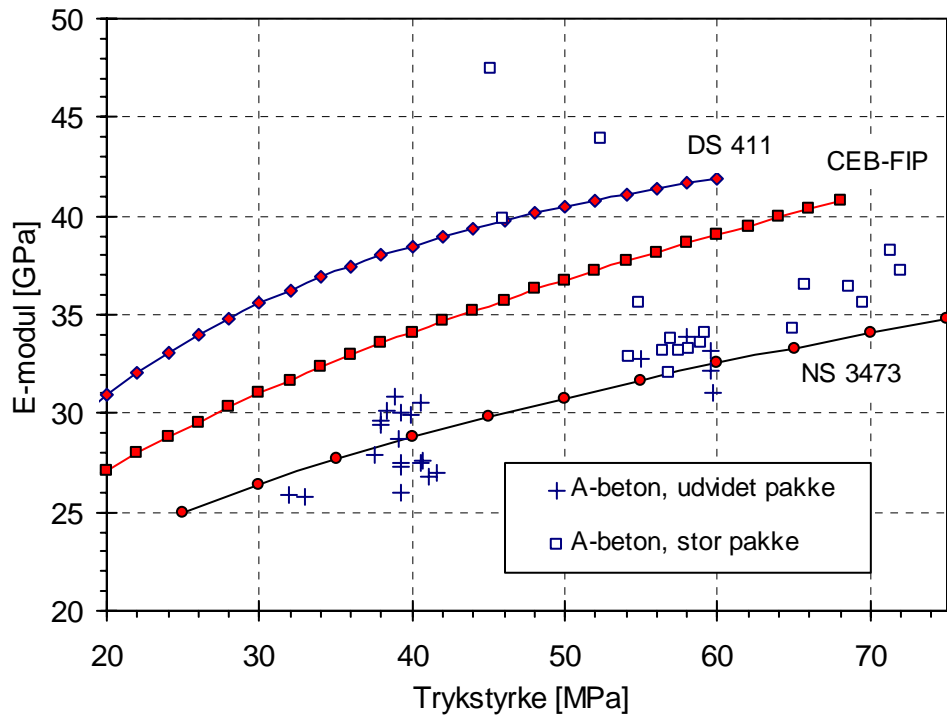
Trykstyrkerne er målt iht. DS 423.25:1984 på vandlagrede standardcylindre $\text{\O}150 \times 300$ mm undtaget P7, hvor styrkebestemmelsen er sket på 150 mm kuber og omregning til standardcylindre er sket med faktor 0,7 i overensstemmelse med DS 411:1999.

3.5 Vurdering af E-modul

I Figur 13 og Figur 14 er begyndelses E-modulet optegnet som funktion af styrken for alle prøveemner, inklusiv resultaterne fra BK1, stor pakke. Desuden er optegnet forskellige normudtryk for sammenhængen mellem E-modul og trykstyrke. Disse udtryk benyttes typisk, når der ikke findes relevante forsøgsdata. Foruden udtrykket givet af DS 411:1999 er optegnet et potensudtryk anbefalet af CEB-FIP Model Code 1990 [2] samt den norske betonnorm NS 3473 [3], hvor det anbefales, at E-modulet varierer med kubikroden af trykstyrken. Bemærk at DS 411 og NS 3473 begge gælder karakteristiske 28-døgns værdier. Det er åbenlyst, at en direkte kobling mellem trykstyrke og stivhed generelt er behæftet med en markant usikkerhed og uenighed.



Figur 13: P-betoner. Begyndelses E-modul som funktion af trykstyrken. De optegnede værdier for udvidet pakke er målte værdier ved 28 døgn, mens stor pakke resultaterne er målt ved 134 døgn.



Figur 14: A-betoner. Begyndelses E-modul som funktion af trykstyrken. De optegnede værdier for udvidet pakke er målte værdier ved 28 døgn, mens stor pakke resultaterne er målt ved 134 døgn.

Som det ses ligger de målte værdier markant lavere end DS 411 funktionsudtrykket, som er givet ved

$$E_{0k} = 51 \text{ GPa} \frac{f_{ck}}{f_{ck} + 13 \text{ MPa}}$$

Det skal dog bemærkes, at DS 411 anviser i forbindelse med beregninger i anvendelsestilstanden (revnevidder, nedbøjninger, etc.), at der benyttes en korttidsværdi for betonens E-modul, svarende til 70-75 % af den værdi, som fås af ovenstående funktionsudtryk, dvs. faktoren 51 GPa reduceres til 37 GPa. Derved falder kurven for DS 411 ned til et niveau ca. som det norske normudtryk, hvilket er en god nedre afgrænsning af forsøgsresultaterne (Figur 13 og Figur 14). Den relativt store forsøgsusikkerhed skal holdes for øje når trykstyrken benyttes til at forudsige E-modulet, se fx [1].

4. Spaltetrækstyrke

4.1 Formål

Det undersøges om spaltetrækstyrken for de betragtede betoner afviger fra de spaltetrækstyrker som traditionelt forventes som funktion af trykstyrken. Prøvningen er en gentagelse af prøvning i stor pakke, dog ved en anden prøvningstermin.

4.2 Metodebeskrivelse

Spaltetrækstyrken er bestemt efter DS 423.34:1984. Prøvningen er udført på standardcylindre Ø150x300mm, vandlagrede indtil prøvning efter 28 døgn. For hver beton er prøvet 5 emner.

4.3 Resultater

Tabel 7 og Tabel 8 viser de målte spaltetrækstyrker. Middelresultaterne for de enkelte betoner er desuden sammenlignet i Figur 9 og Figur 10.

Beton	Emne	Densitet [kg/m ³]	Spaltetrækstyrke [MPa]
AR	AR-150-11	2337	3,16
	AR-150-12	2330	3,32
	AR-150-13	2330	3,94
	AR-150-14	2320	3,34
	AR-150-15	2330	3,67
	Middel	2330	3,50
	Spredning Var.koeff. [%]	6,1 0,3	0,31 9,0
A1	A1-150-11	2336	4,74
	A1-150-12	2338	4,74
	A1-150-13	2365	5,03
	A1-150-14	2367	4,23
	A1-150-15	2378	3,14
	Middel	2357	4,35
	Spredning Var.koeff. [%]	18,6 0,8	0,75 17,2
A3	A3-150-11	2259	3,13
	A3-150-12	2263	3,67
	A3-150-13	2234	4,01
	A3-150-14	2241	3,57
	A3-150-15	2266	3,89
	Middel	2252	3,65
	Spredning Var.koeff. [%]	14,3 0,6	0,34 9,3

Tabel 7: A-betoner. Spaltetrækstyrker ved 28 døgn.

Beton	Emne	Densitet [kg/m ³]	Spaltetrækstyrker [MPa]
PR	PR-150-11	2298	3,06
	PR-150-12	2301	3,07
	PR-150-13	2304	3,84
	PR-150-14	2315	3,23
	PR-150-15	2319	3,92
	Middel	2307	3,40
	Spredning Var.koeff. [%]	9,0 0,4	0,42 12,3
P5	P5-150-11	2296	2,30
	P5-150-12	2302	2,80
	P5-150-13	2325	2,35
	P5-150-14	2312	2,63
	P5-150-15	2301	3,15
	Middel	2307	2,65
	Spredning Var.koeff. [%]	11,4 0,5	0,35 13,3
P7	P7-150-11	2390	2,49
	P7-150-12	2405	2,75
	P7-150-13	2412	2,49
	P7-150-14	2401	2,96
	P7-150-15	2405	2,68
	Middel	2403	2,65
	Spredning Var.koeff. [%]	8,2 0,3	0,20 7,4

Tabel 8: P-betoner. Spaltetrækstyrker ved 28 døgn.

Nedenfor i Tabel 9 er de karakteristiske værdier angivet for de mekaniske egenskaber. Det skal bemærkes, at de karakteristiske værdier ikke må forveksles med målinger foretaget under den løbende betonproduktion. Variationen hidhørende fra forskelle i materialeleverancer, blandings- og udstøbningsforskelle er ikke medtaget i de karakteristiske værdier i Tabel 9.

Beregning af de karakteristiske værdier følger DS 409:1999, Anneks A, hvor en logaritmisk normalfordeling ligger til grund for bestemmelsen. Udfra målte middelværdier og spredninger beregnes de karakteristiske værdier svarende til 5 % fraktilen med ukendt variationskoefficient.

Karakteristiske værdier iht. DS 409				
<i>p = 5 % fraktil, ukendt variationskoefficient</i>				
Beton	Egenskab	Middel [MPa]	Spredning [MPa]	Karakteristisk [MPa]
AR	Trykstyrke	37,8	2,7	32
	E-modul	28400	1750	24600
	Spaltetrækstyrke	3,50	0,31	2,7
A1	Trykstyrke	58,3	2,0	53
	E-modul	32600	1080	29600
	Spaltetrækstyrke	4,35	0,75	2,5
A3	Trykstyrke	40,4	0,97	38
	E-modul	27500	1370	23400
	Spaltetrækstyrke	3,65	0,34	2,8
PR	Trykstyrke	34,7	1,5	31
	E-modul	32900	2580	26300
	Spaltetrækstyrke	3,40	0,42	2,4
P5	Trykstyrke	31,7	1,5	28
	E-modul	29700	1400	25600
	Spaltetrækstyrke	2,65	0,35	1,8
P7	Trykstyrke	28,9	2,1	23
	E-modul	30500	1500	26500
	Spaltetrækstyrke	2,65	0,20	2,2

Tabel 9: Karakteristiske 28 døgns værdier. Karakteristiske trykstyrker afrundet til nærmeste MPa og karakteristiske E-moduler afrundet til nærmeste 100 MPa. Bemærk at for AR er benyttet forsøgsresultater med forskellig termin (Tabel 5).

4.4 Vurdering af trækstyrke

I Figur 15 er spaltetrækstyrken optegnet som en funktion af trykstyrken. Både de karakteristiske værdier samt middelværdierne er afbilledet, sidstnævnte med angivelse af konfidensintervaller.

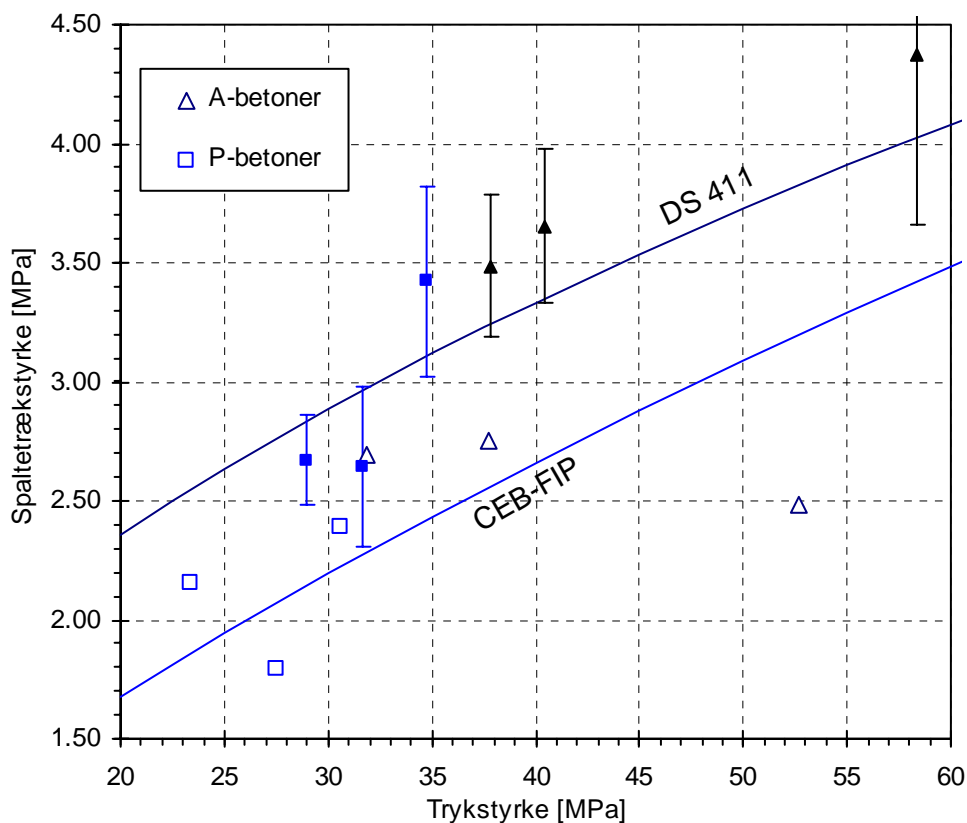
I DS 411:1999 er angivet et funktionsudtryk for betons enaksede trækstyrkes afhængighed af trykstyrken. Dette udtryk kan anvendes, hvis der ikke udføres forsøg og benytter en kvad-

ratrodsafhængighed af f_{ck} . Sammen med dette kvadratrodsudtryk er CEB-FIP Model Code's udtryk for minimum enakset trækstyrke optegnet som funktion af trykstyrken [2].

For at kunne sammenligne disse to udtryk med måledata er den enaksede trækstyrke omregnet til spaltetrækstyrke. For DS 411 er den enaksede trækstyrke er beregnet som 60 % af spaltetrækstyrken som det er normal praksis i Danmark ifølge [1]. For CEB-FIP benyttes faktor 0,9 ifølge [2].

Først og fremmest bemærkes det, at de karakteristiske forsøgsresultater ikke udviser nogen markant stigende sammenhæng mellem tryk- og trækstyrke og ydermere ligger de karakteristiske værdier markant lavere end DS 411's udtryk. Dette skyldes bl.a. at for A1 er forsøgsspredningen meget høj.

For de målte middelværdier er sammenhængen med DS 411's kvadratrodsudtryk meget bedre. En årsag til at de karakteristiske værdier passer dårligt ind i den normale sammenhæng kan være de høje variationskoefficienter på over 10 %, som også blev registreret i stor pakke forsøgene [4].



Figur 15: Spaltetrækstyrker som funktion af trykstyrken. De åbne symboler er karakteristiske værdier fra Tabel 9 og de fyldte symboler er middelværdier (Tabel 7 og Tabel 8) med angivelse af 90 % konfidensintervaller. Normudtrykkene for enakset trækstyrke er omregnet til spaltetrækstyrke ved at dividere med 0,6 for DS 411 og 0,9 for CEB-FIP Model Code 1990.

5. Udmattelsesundersøgelse

5.1 Formål

Det undersøges om de betragtede betoner kan modstå 2 mio. lastcykler uden brud iht. anvisningerne i DS 411:1999.

5.2 Metodebeskrivelse

Udmattelsesforsøgene udføres på standardcylindre Ø100x200mm, forsejlet indtil prøvning ved 48-55 døgn. For hver beton er prøvet 2 emner med hver sin spændingshistorie. Forsøgene er udført hos Træteknik, Teknologisk Institut, i en prøvemaskine, hvor trykbelastningen veksler mellem en forvalgt nedre og øvre værdi.

Belastningen veksler i tiden som en sinusfunktion med en frekvens på 10-11 Hz. Dette medfører at et forsøg til 2 mio. cykler tager næsten 2,5 døgn.

Der er ikke foretaget målinger af last eller deformationer i forbindelse med forsøget. Det er blot konstateret, hvorvidt prøveemnet overlever forsøget, samt observeret evt. revnedannelse. Desuden er trykstyrken bestemt for hver betontype på den dag, hvor udmattelsesforsøget for den pågældende beton er iværksat. Trykstyrken er bestemt iht. DS 423.23:1984 på 3 stk. standardcylindre Ø100x200mm.

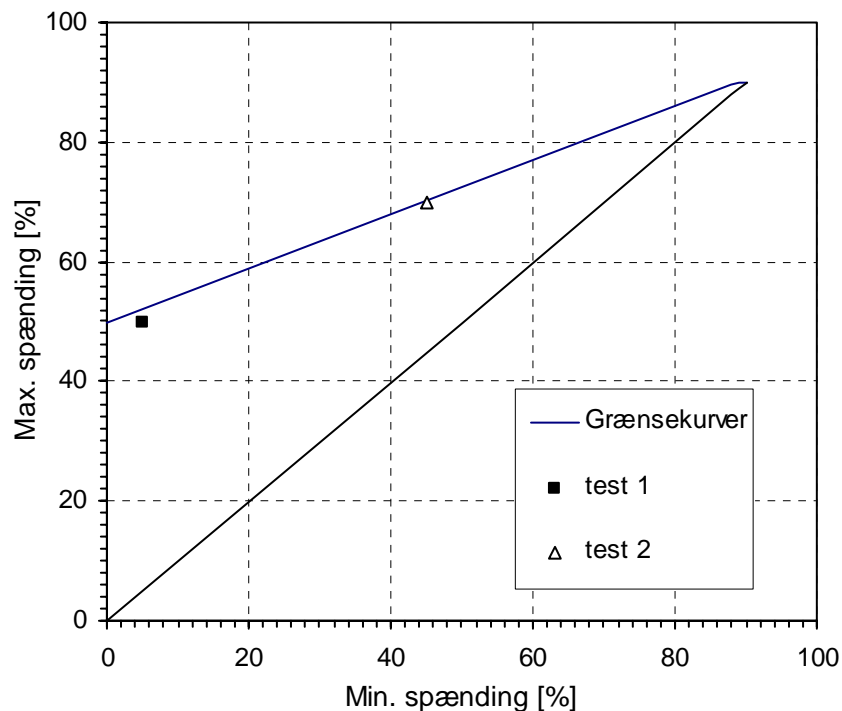
5.3 Resultater

Forsøgsresultaterne er givet i Tabel 10 og i Figur 16. For hver beton er prøvet to forskellige kombinationer af øvre og nedre spændingsgrænse: (i) dels vekslede mellem 5 og 50 % af trykstyrken og (ii) dels vekslede mellem 45 og 70 %. I Tabel 10 er resultaterne vist med angivelse af hvorvidt prøveemnet er synligt påvirket efter forsøget.

Som det fremgår af Tabel 10 er test 2 mest belastende for betonerne. Dette hænger sammen med at belastningsniveauet på 70 % initierer mikrorevner, som akkumuleres under de gentagne be- og aflastninger. Belastningsniveauet på 50 % af trykstyrken befinder sig derimod stadig på den overvejende lineær-elastiske del af trykarbejdslinien, jf. afsnit 3.3.

Det formodes at grunden til, at test 2 for A1 kun udholder 131.000 cykler inden et eksplosivt brud indtræffer skyldes, at A1 har mindre sejhed i forhold til AR, jf. Figur 3 og Figur 4.

Bemærk at lastraten under den cykliske belastning er op til 5000 gange højere end for arbejdsurvebestemmelsen i kapitel 3. Denne effekt anses normalt at medføre en styrkeforøgelse, men i nærværende undersøgelse er denne rateeffekt ikke medtaget.



Figur 16: Trekantsområdet angiver et sikkert spændingsområde iht. DS 411 ved trykspændinger vekslende mellem en maximums- og en minimumsværdi. Spændinger er normaliseret mht. den statiske trykstyrke. Spændingskombinationer indenfor grænsekurverne anses for at kunne modstå 2 mio. cykler og er derved udmattelsessikre.

Normalt er udmattelsesforsøg behæftet med en signifikant forsøgsusikkerhed og derfor kan ovennævnte forsøg blot bruges til at indikere at betontyperne AR og A1 opfører sig som forventet. Hvis forsøgene skal bruges til at verificere udmattelsesgrænsekurverne i DS 411 skal der udføres betydeligt flere forsøg med 4-5 gentagelser af hver lasthistorie.

Beton	Alder [døgn]	Densitet [kg/m ³]	Trykstyrke [MPa]	σ_{\min} [MPa]	σ_{\max} [MPa]	Antal cykler
AR test 1	48	2326 (14,0)	45,5 (1,4)	2,3	23	2,4 mio. (ingen revner)
AR test 2	55	2337 (25,1)	49,7 (2,7)	22	35	2,0 mio. (synlige revner)
A1 test 1	47	2384 (3,0)	68,7 (2,2)	3,4	34	2,0 mio. (ingen revner)
A1 test 2	58	2344 (21,9)	65,7 (3,0)	30	46	0,13 mio. (eksplosivt brud)

Tabel 10: Udmattelsesresultater. Tal i parentes angiver spredning.

6. Konklusioner

6.1 Trykarbejdskurver

Der er udført trykforsøg på standardcylindre Ø100×200 mm med 5 gentagelser for hver betontype. Forsøgene er udført deformationsstyret for at registrere arbejdskurvens toppunkt og den nedadgående del. Betonstyrkerne varierer fra 25-35 MPa for de undersøgte P-betoner og 40-60 MPa for A-betonerne. Desuden måles begyndelses E-modulet udfra hældningen på den retlinede del af trykarbejdskurven.

Hovedkonklusionen af forsøgene er at arbejdskurven hovedsageligt er fastlagt af betonens trykstyrke. Det vil sige, at jo stærkere betonen er jo mere lineær-elastisk og skørt opfører den sig. Denne sammenhæng er indbygget i CEB-FIP Model Code 1990 og der er fundet en tilfredsstillende overensstemmelse hermed.

Der er også fundet en voksende sammenhæng mellem trykstyrke og E-modul, om end den ikke er så entydig. Generelt overvurderer DS 411 E-modulet med 10-20 %, når det analytiske udtryk, som angives heri, benyttes. Dette gælder både for referencebetoner og grønne betoner. Et bedre bud på en analytisk sammenhæng mellem E-modul og trykstyrke gives af CEB-FIP Model Code 1990.

6.2 Trækstyrker

Trækstyrken er undersøgt vha. spaltetrækforsøg iht. DS 423.34:1984 med 5 gentagelser for hver betontype. Spaltetrækstyrken er derefter omsat til en enakset trækstyrke vha. relationen $f_t = 0,6f_{sp}$.

En sammenligning med kvadratudsudtrykket i DS 411:1999 mellem f_t og f_c viser tilfredsstillende overensstemmelse når middelværdierne benyttes. For de karakteristiske værdier fås imidlertid kun en svag sammenhæng mellem tryk- og trækstyrken pga. at trækforsøg er behæftet med stor forsøgsusikkerhed, som påvirker den karakteristiske trækstyrke.

Konklusionen er at alle de afprøvede betoners trækstyrke opfører sig som normalt antaget iht. DS 411.

6.3 Udmattelse

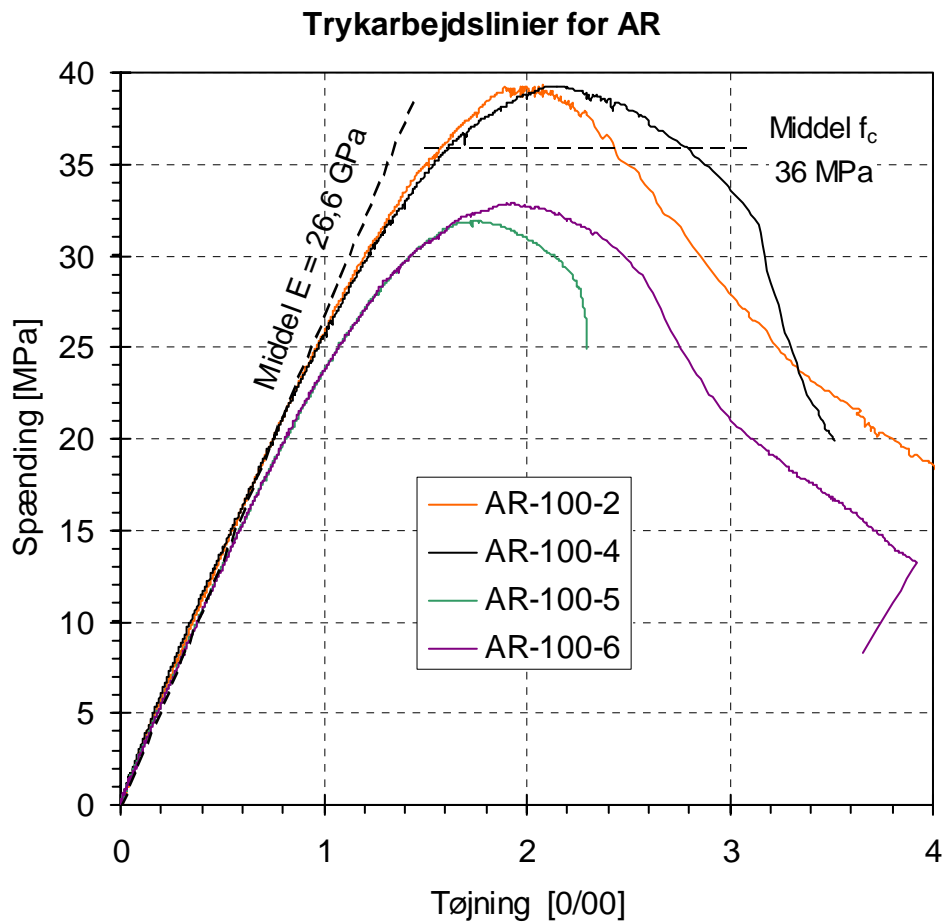
Der er kun foretaget ganske få udmattelsesforsøg med beton AR og A1. Der er således ikke foretaget nogen gentagelser til vurdering af forsøgsvariationen. Derved kan der ikke foretages nogen egentlige konklusioner herfra. Dette ville kræve en større forsøgsserie.

7. Referencer

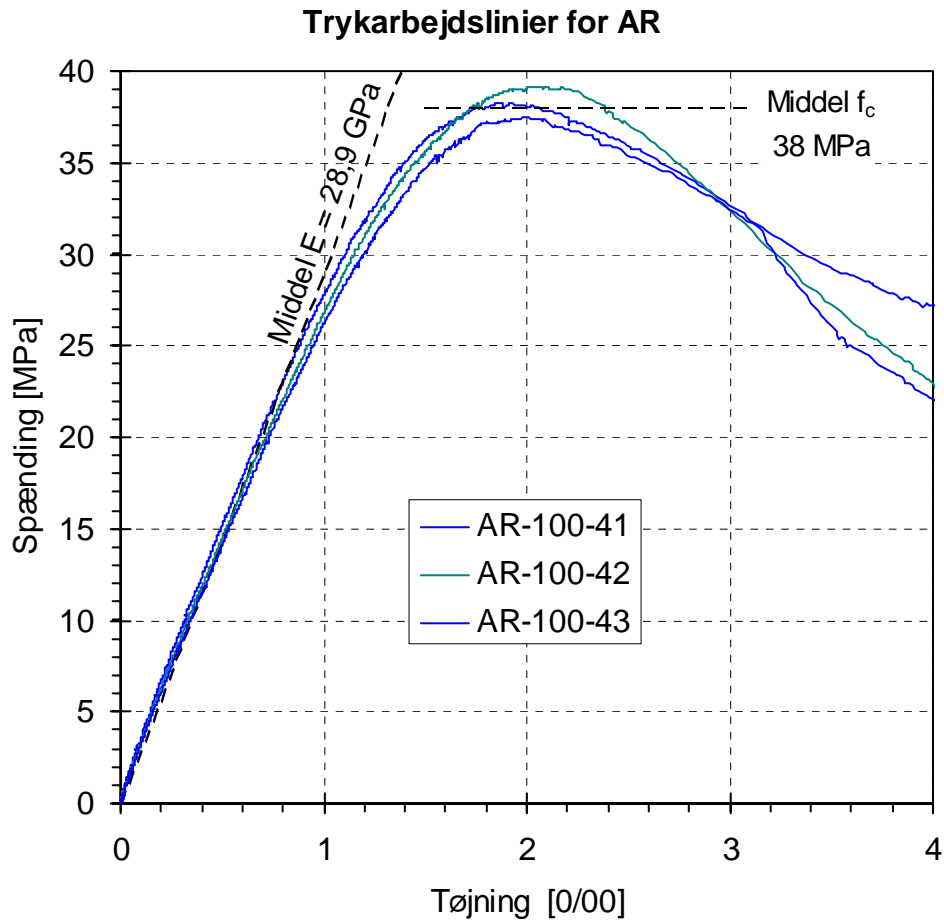
- [1] "Beton-Bogen", 2. udgave (Redigeret af Herholdt, Justesen, Nepper-Christensen & Nielsen), Cementfabrikkernes Tekniske Oplysningskontor, Aalborg Portland A/S, 1985.
- [2] "CEB-FIP Model Code 1990", CEB-Bulletin No 213/214, Comite Euro-International du Beton, 1993.
- [3] NS 3473, "Prosjektering av betongkonstruksjoner", Norges Standardiseringsforbund, 4. udgave, 1992.
- [4] "BK1 – Mekaniske Egenskaber, Stor pakke", Grøn Beton, Teknologisk Institut, Februar 2001.

Appendiks A Middelarbejdskurver for A-betoner

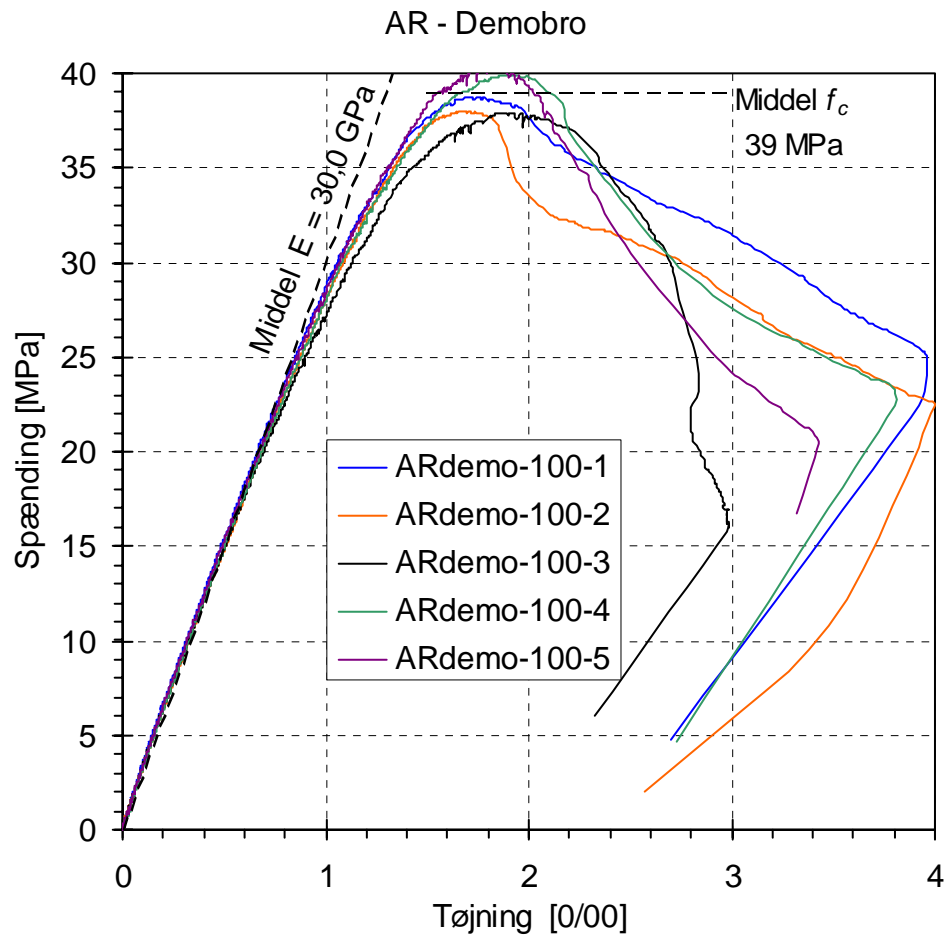
I dette appendiks vises arbejdskurverne samlet i et diagram for hver betontype. Tøjningerne svarer til sammentrykning af cylinderens midterakse taget som en middelværdi af målingerne def_1 og def_2 , se også de følgende Appendices, hvor de individuelle målinger er afbilledet.



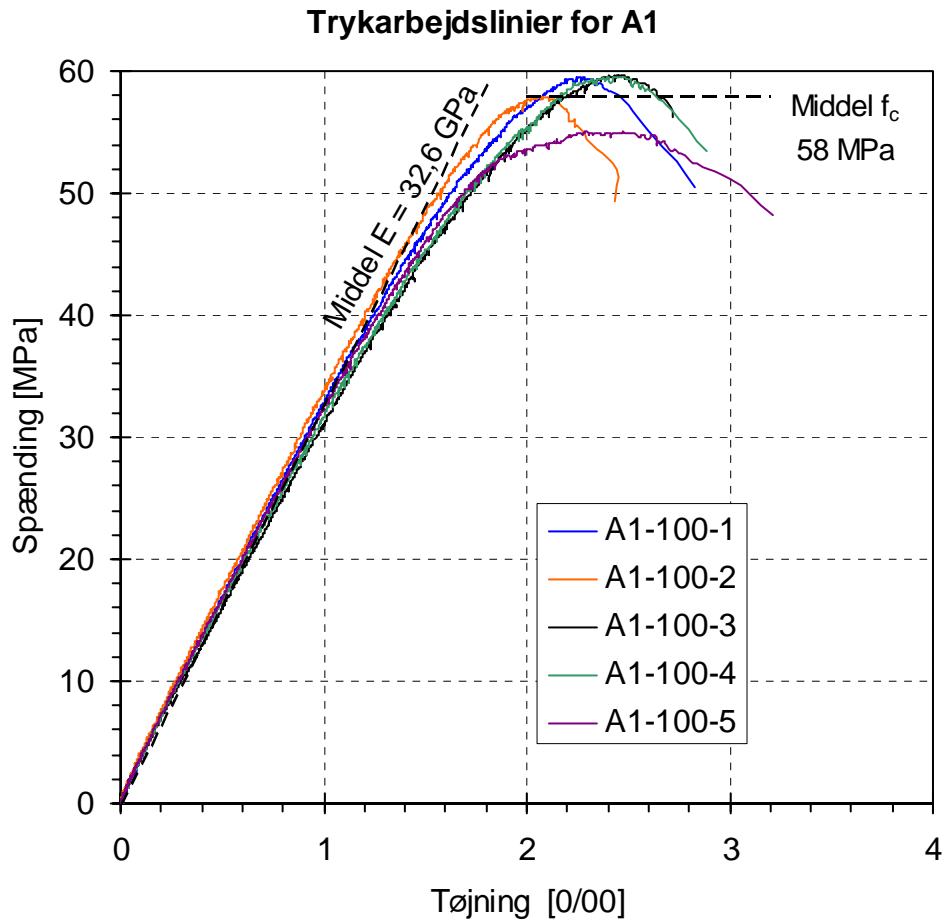
Figur A-1: Trykarbejdslinier for AR-beton ved 28 døgn, jf. Appendiks C.



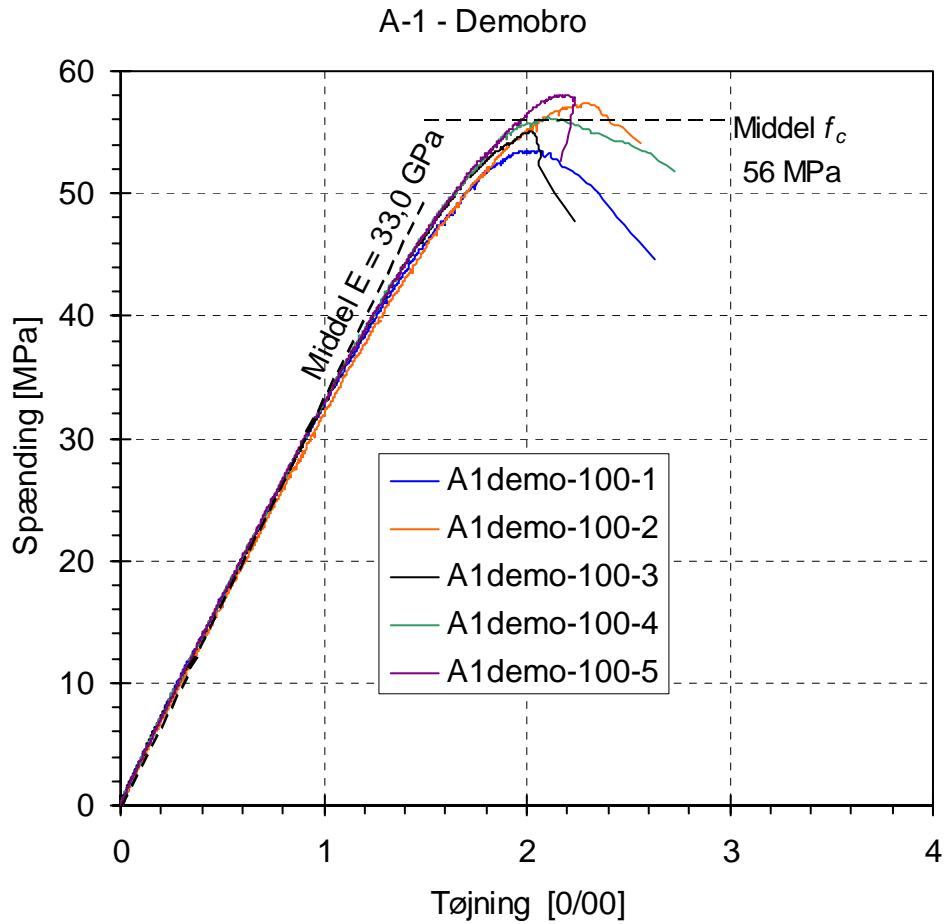
Figur A-2: Trykarbejdslinier for AR-beton ved 30 døg. Bemærk at prøveemnerne i Figur A-1 og Figur A-2 kommer fra hver sin betonblanding, hhv. AR-1 og AR-2 i Tabel 3



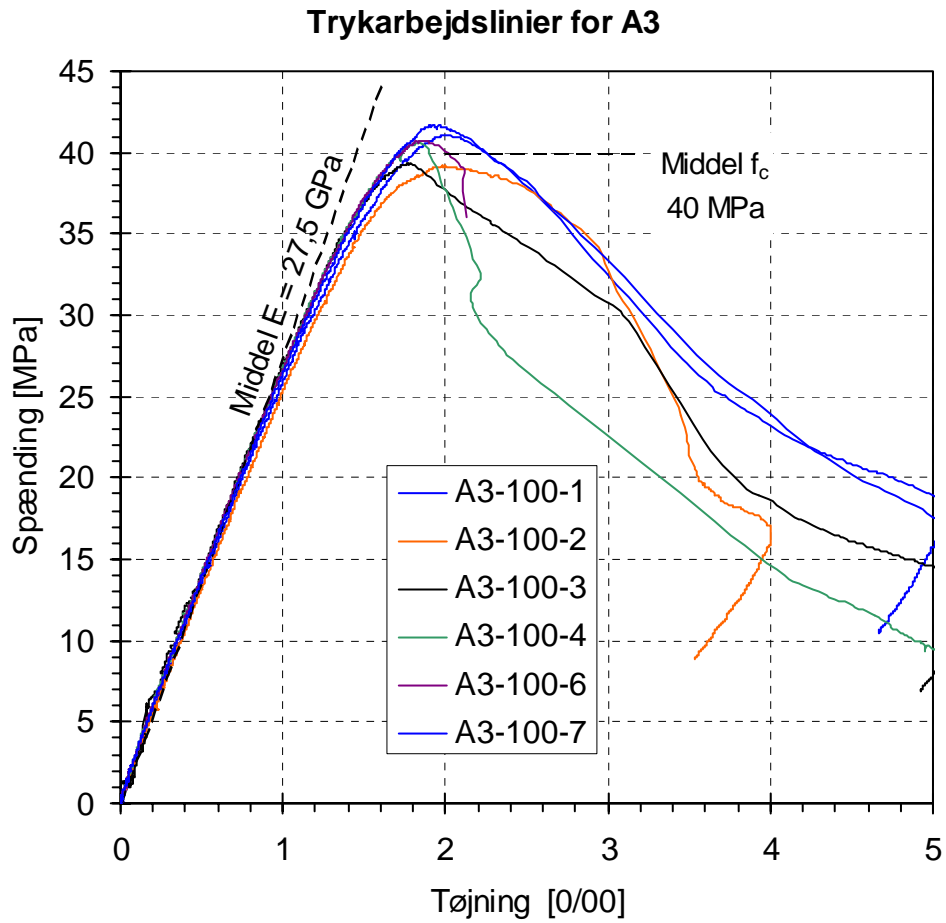
Figur A-3: Trykarbejdslinier for AR-beton ved 32 døgn. Prøveemner udstøbt af beton til demobroen. Den sidste del af kurverne svarer til aflastning.



Figur A-4: Trykarbejdslinier for A1-beton ved 28 døgn, jf. Appendiks D. Kurvernes slutpunkt svarer til pludseligt brud kort efter passage af toppunktet.



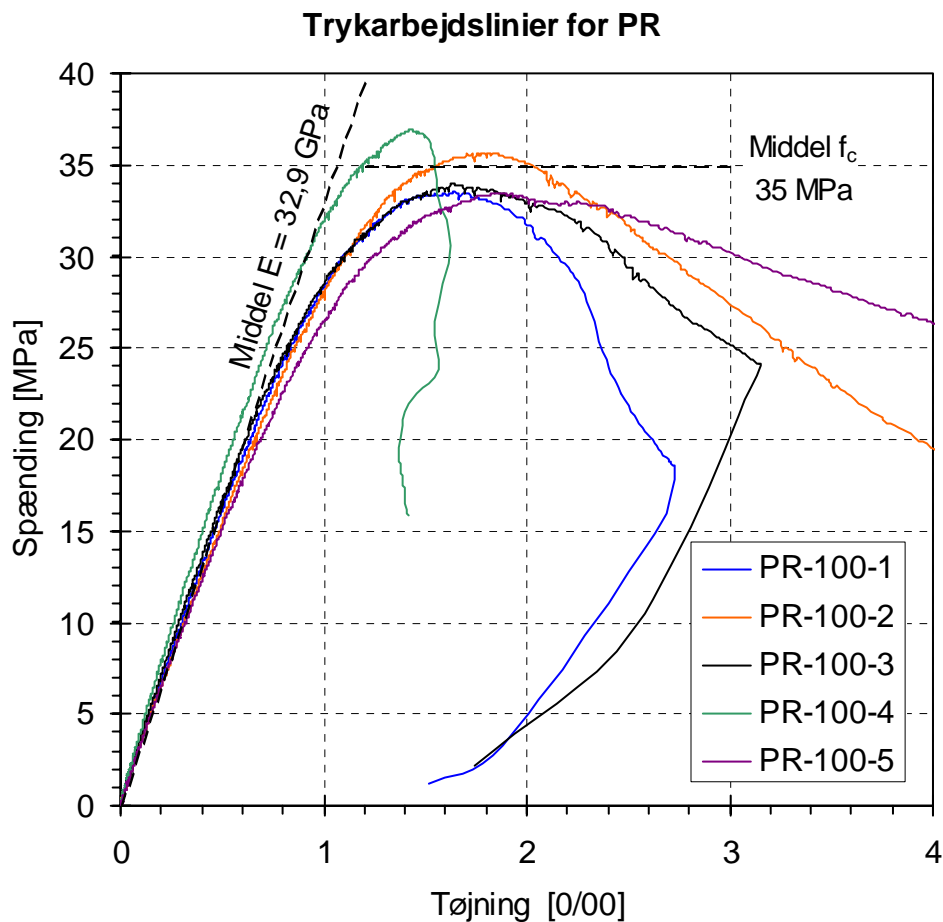
Figur A-5: Trykarbejdslinier for A1-beton ved 29 døgn. Udstøbt af beton til demobroen. Kurvernes slutpunkt svarer til pludseligt brud kort efter passage af toppunktet.



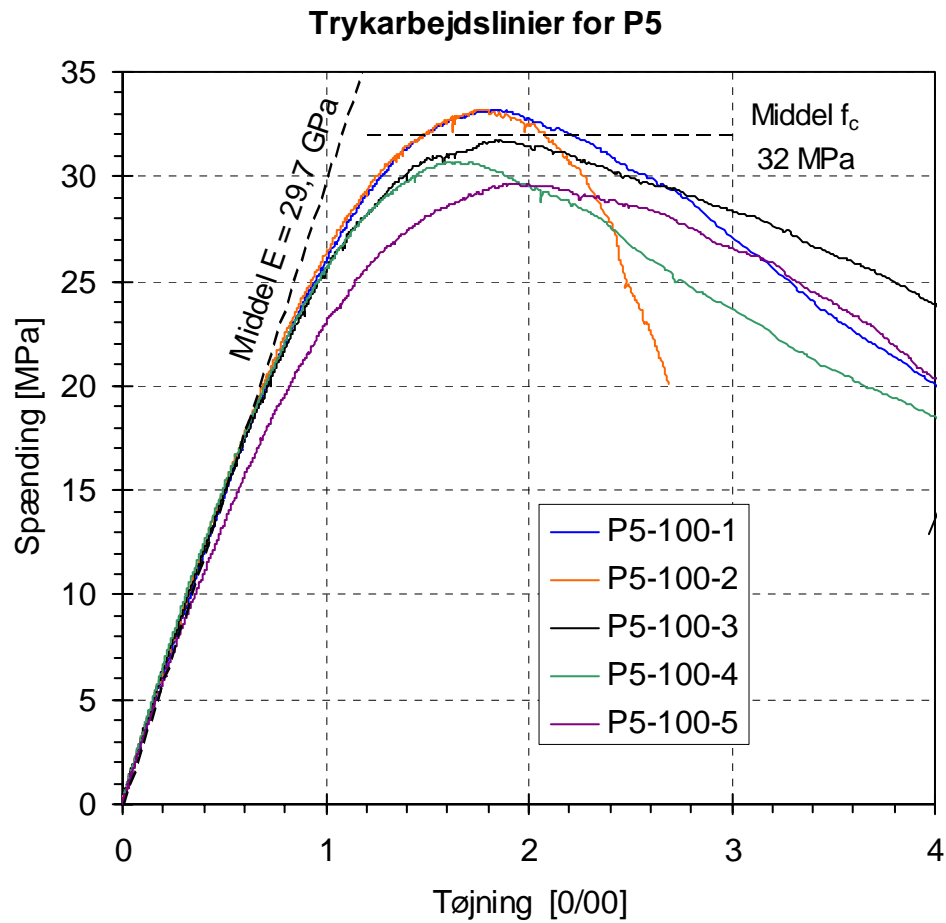
Figur A-6: Trykarbejdslinier for A3-beton ved 28 døgn, jf. Appendiks E.

Appendiks B Middelarbejdskurver for P-betoner

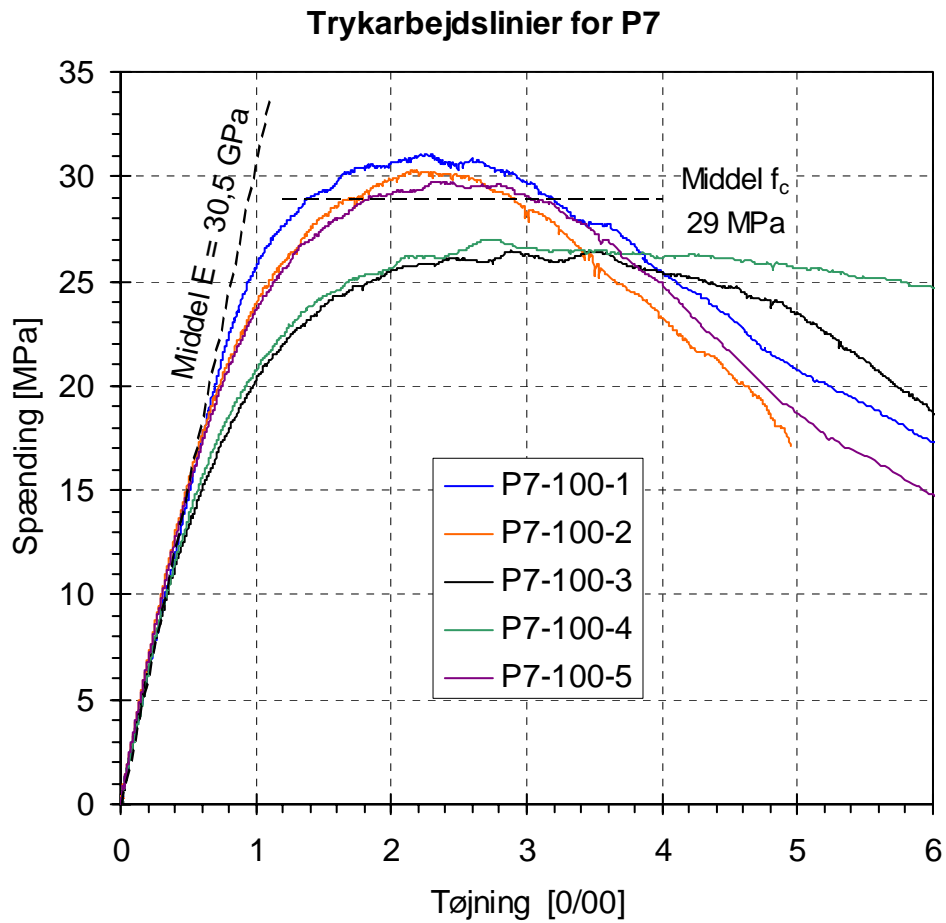
I dette appendiks vises arbejdskurverne samlet i et diagram for hver betontype. Tøjningerne svarer til sammentrykning af cylinderens midterakse taget som en middelværdi af målingerne def_1 og def_2 , se også de følgende Appendices, hvor de individuelle målinger er afbilledet.



Figur B-1: Trykarbejdslinier for PR-beton ved 28 døgn, jf. Appendiks F. Den sidste del af kurverne for emne 1 og 3 svarer til aflastning.

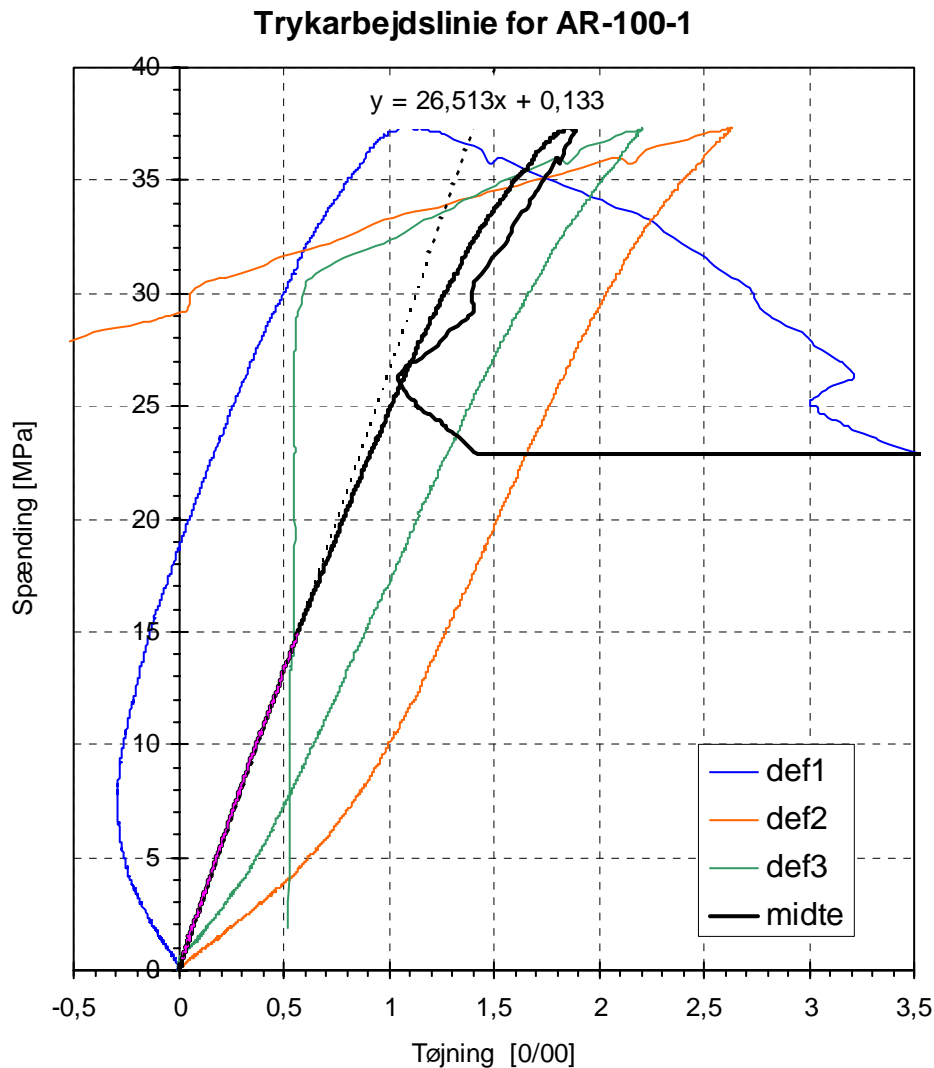


Figur B-2: Trykarbejdslinier for P5-beton ved 28 døgn, jf. Appendiks G.



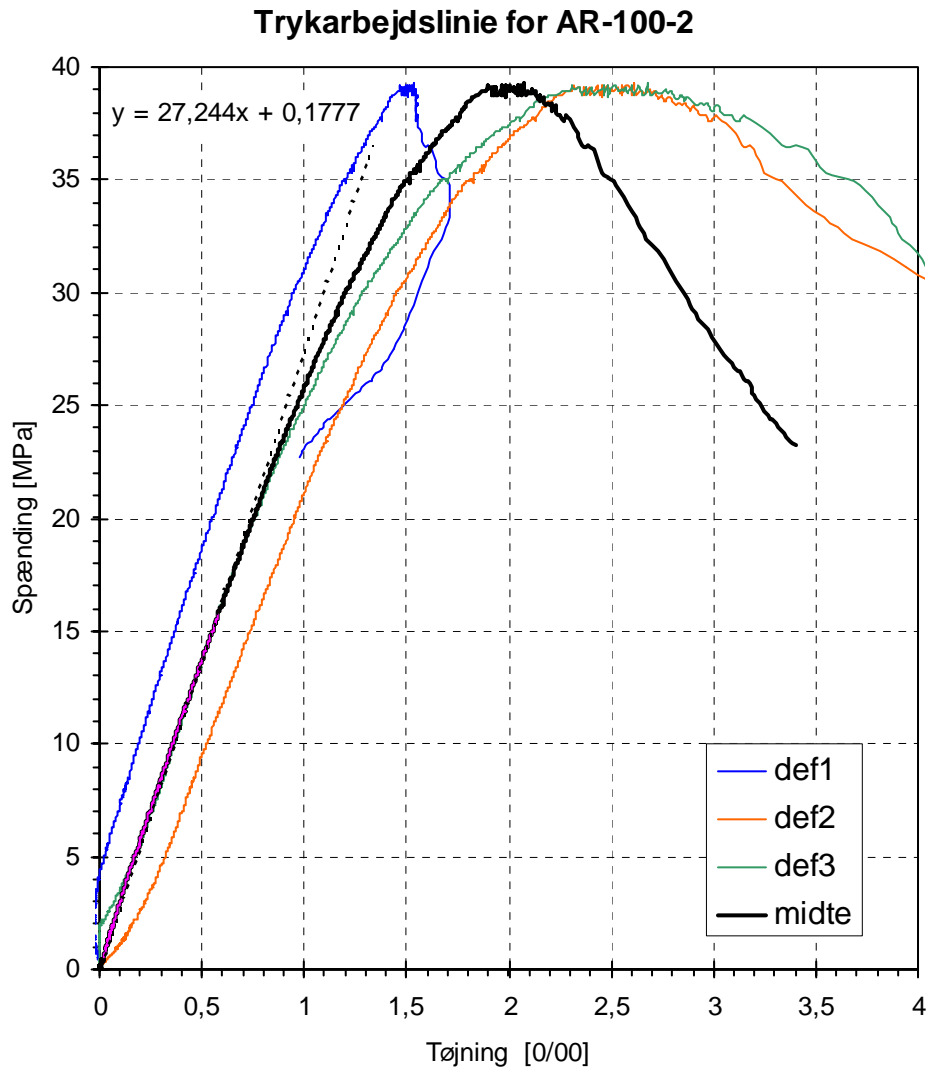
Figur B-3: Trykarbejdslinier for P7-beton ved 28 døgn, jf. Appendiks H.

Appendiks C Arbejdskurver for AR



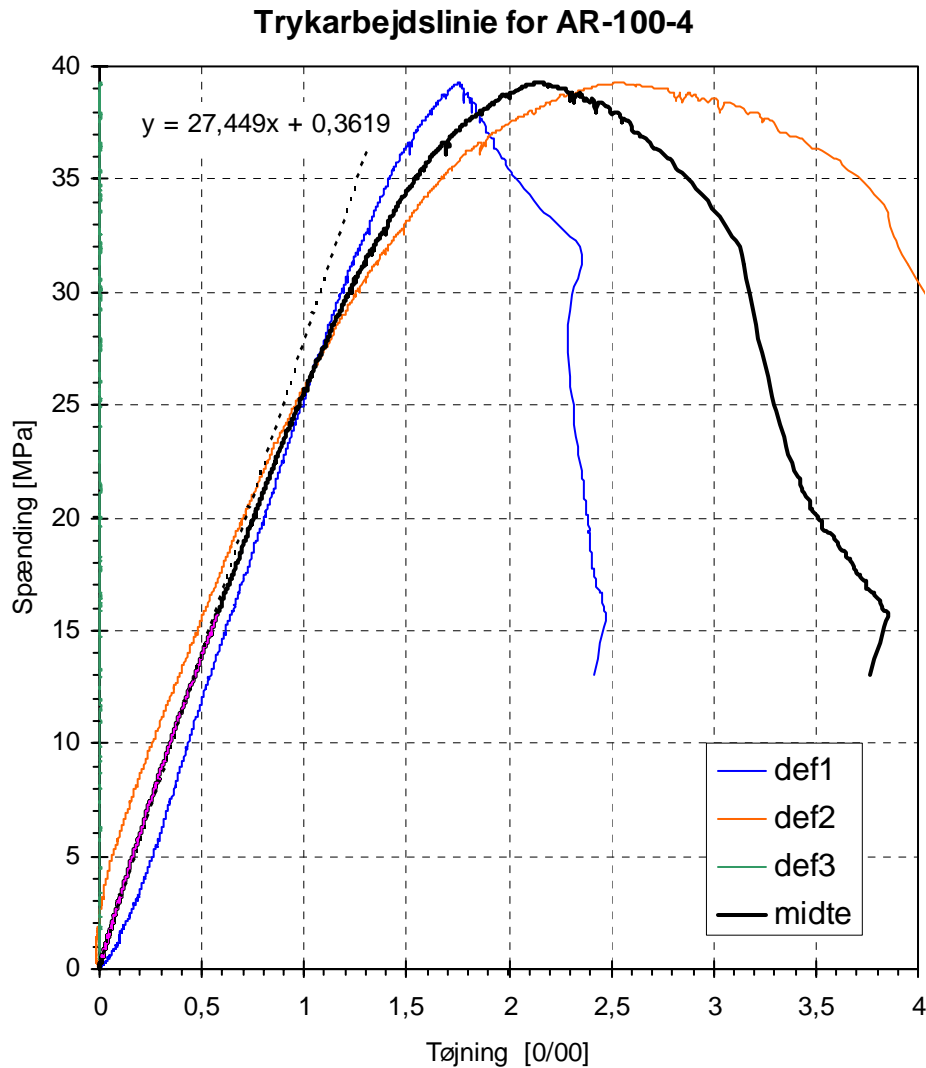
Noter:

- Dette forsøg er udeladt af den videre databehandling pga. uregelmæssigt forløb.
- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.



Noter:

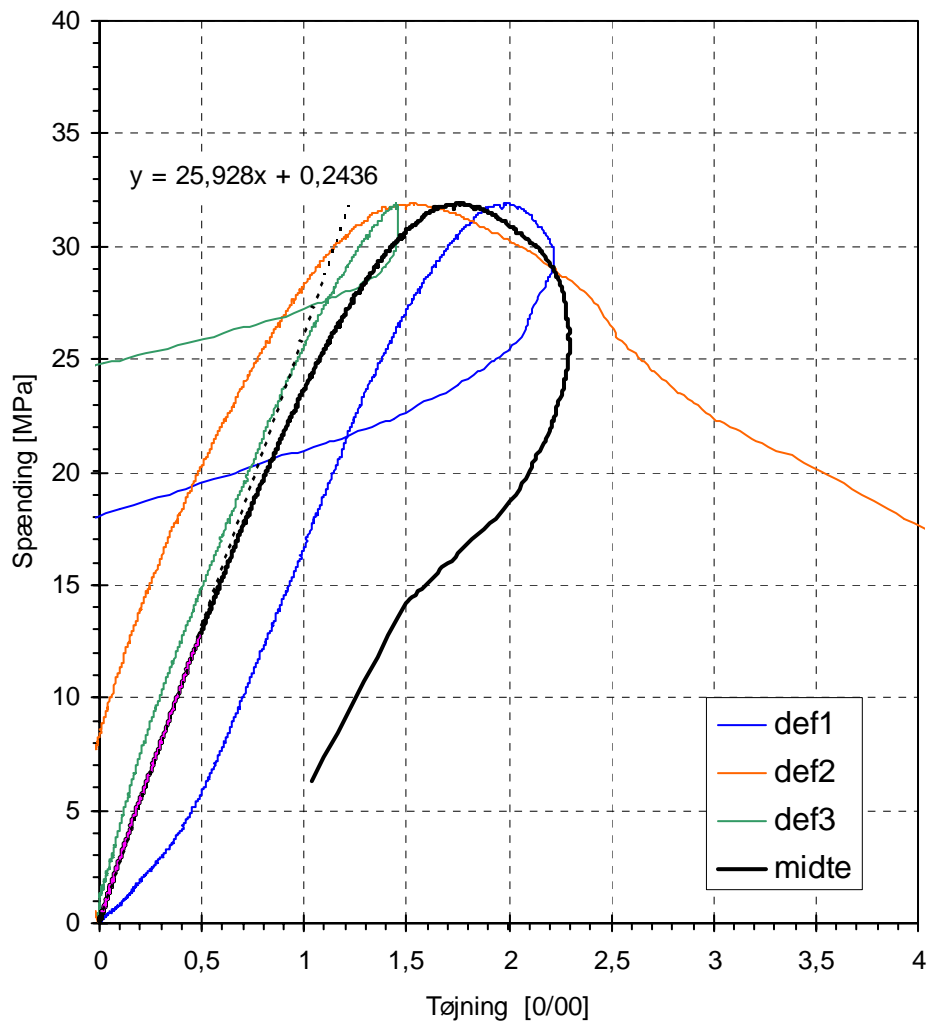
- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.



Noter:

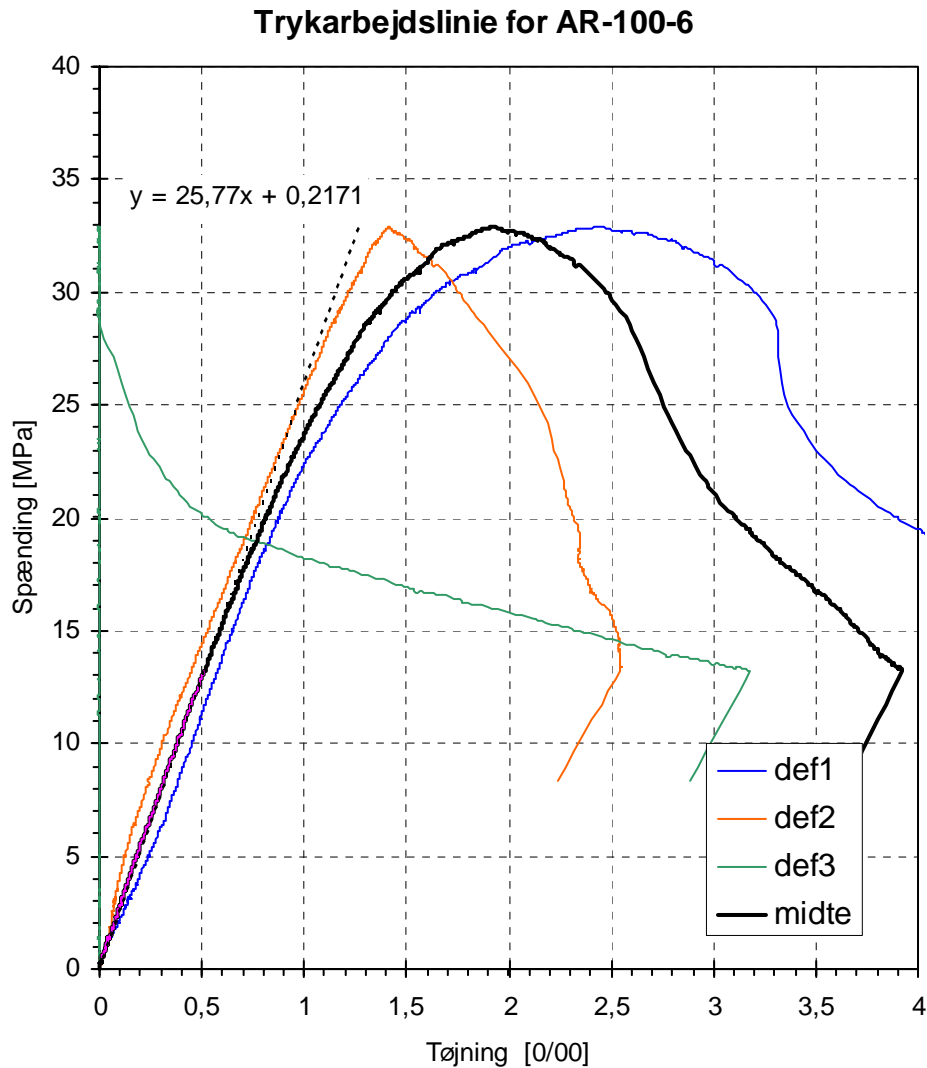
- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.

Trykarbejdslinie for AR-100-5



Noter:

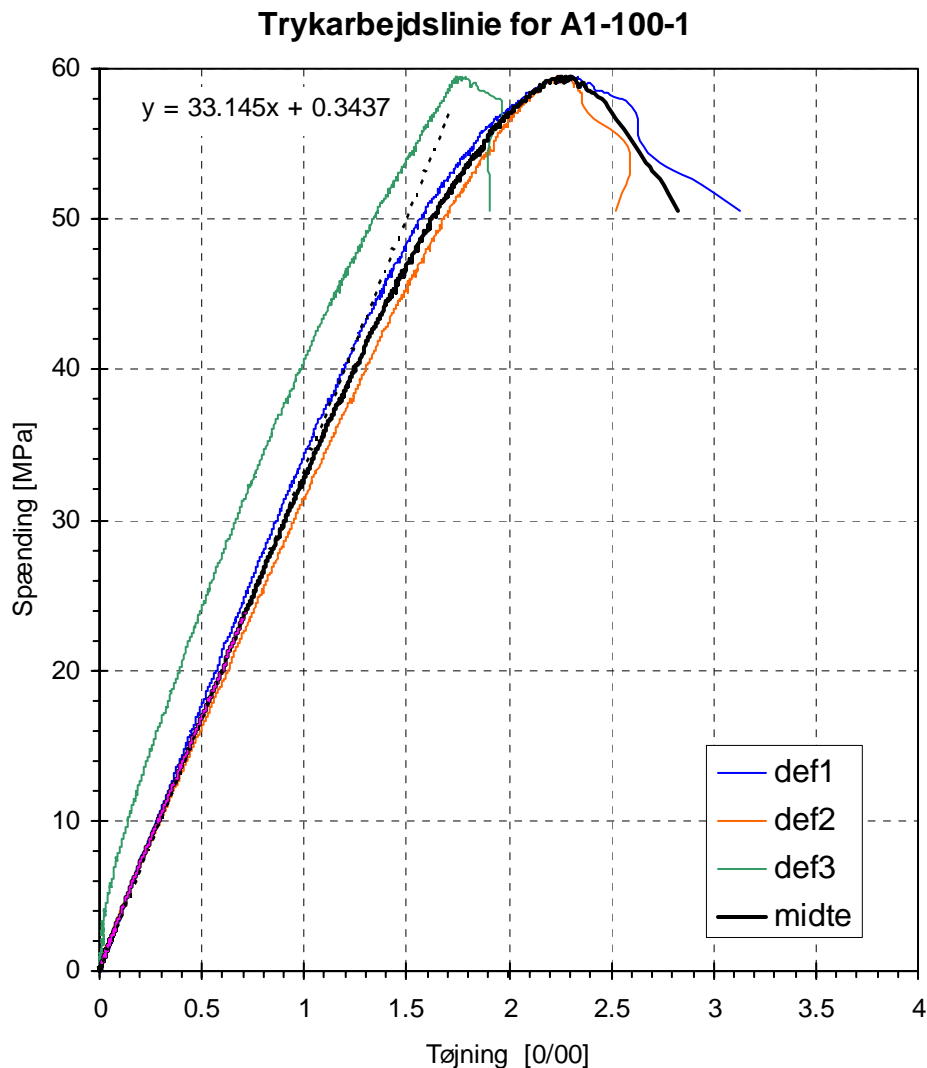
- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.



Noter:

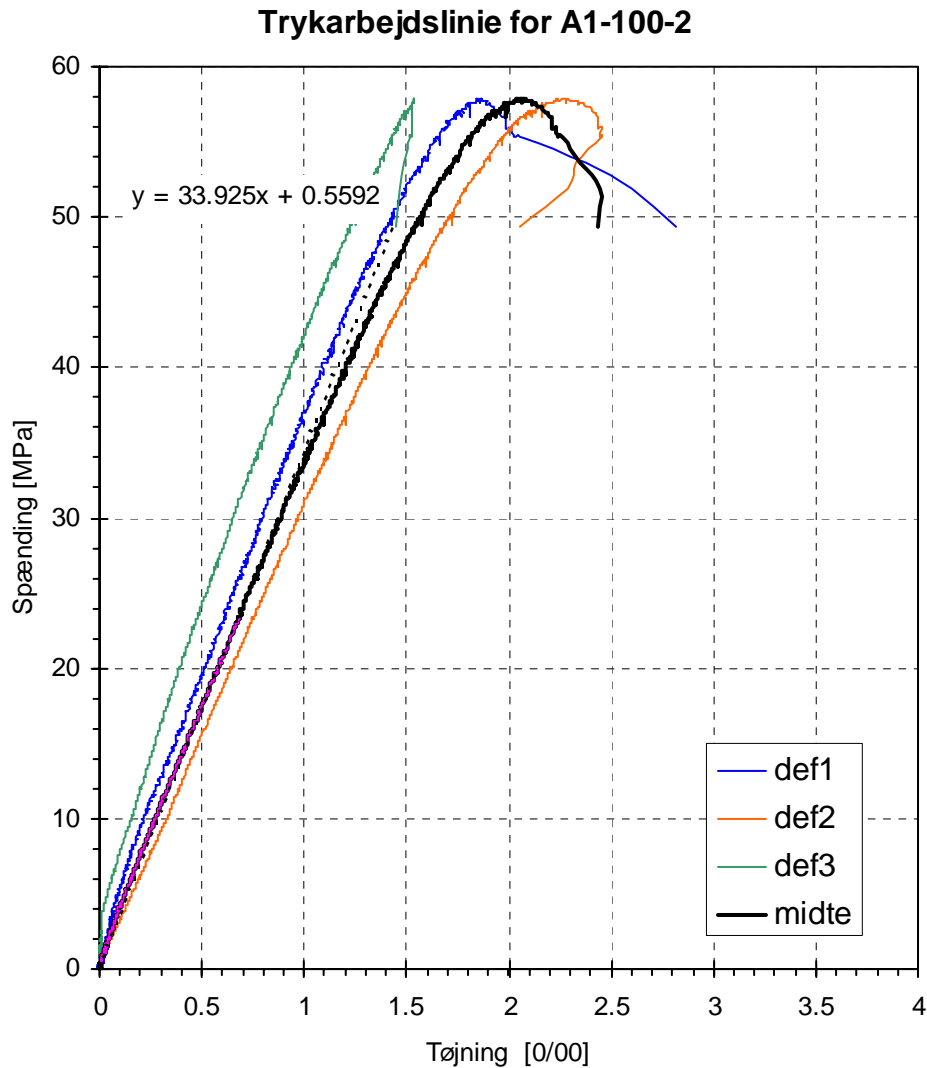
- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.
- Målingerne fra "def3" er fejlbehæftede under voksende belastning.

Appendiks D Arbejdskurver for A1



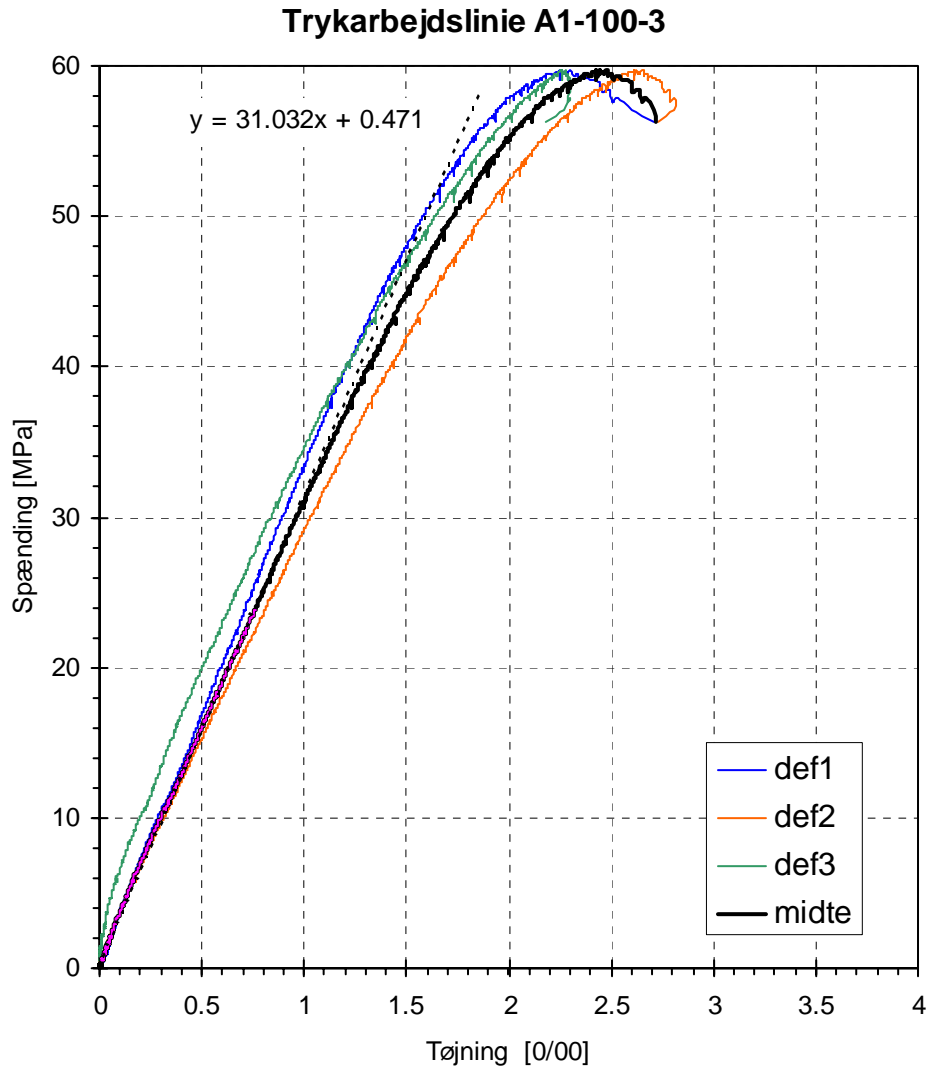
Noter:

- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinje angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.
- Målingerne afsluttet ved indtrædelse af pludseligt brud kort efter passage af toppunktet.



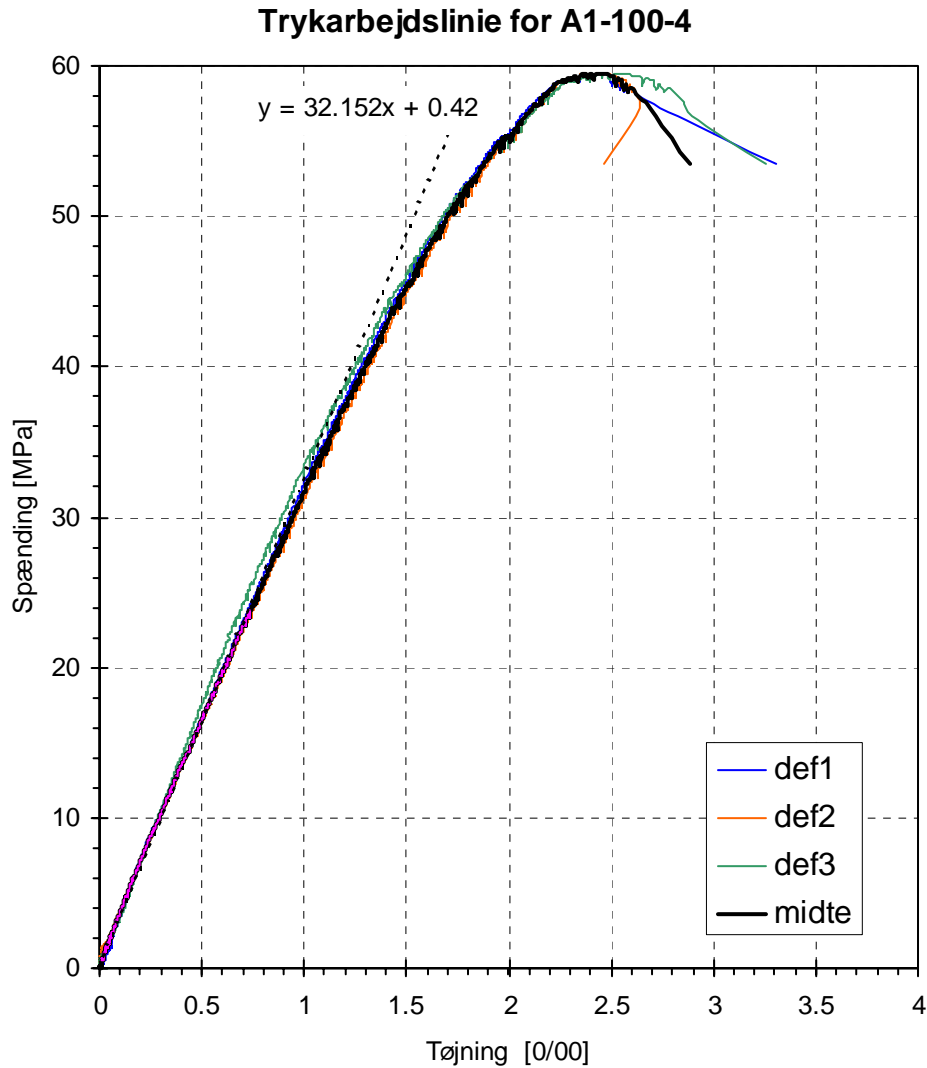
Noter:

- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.
- Målingerne afsluttet ved indtrædelse af pludseligt brud kort efter passage af toppunktet.



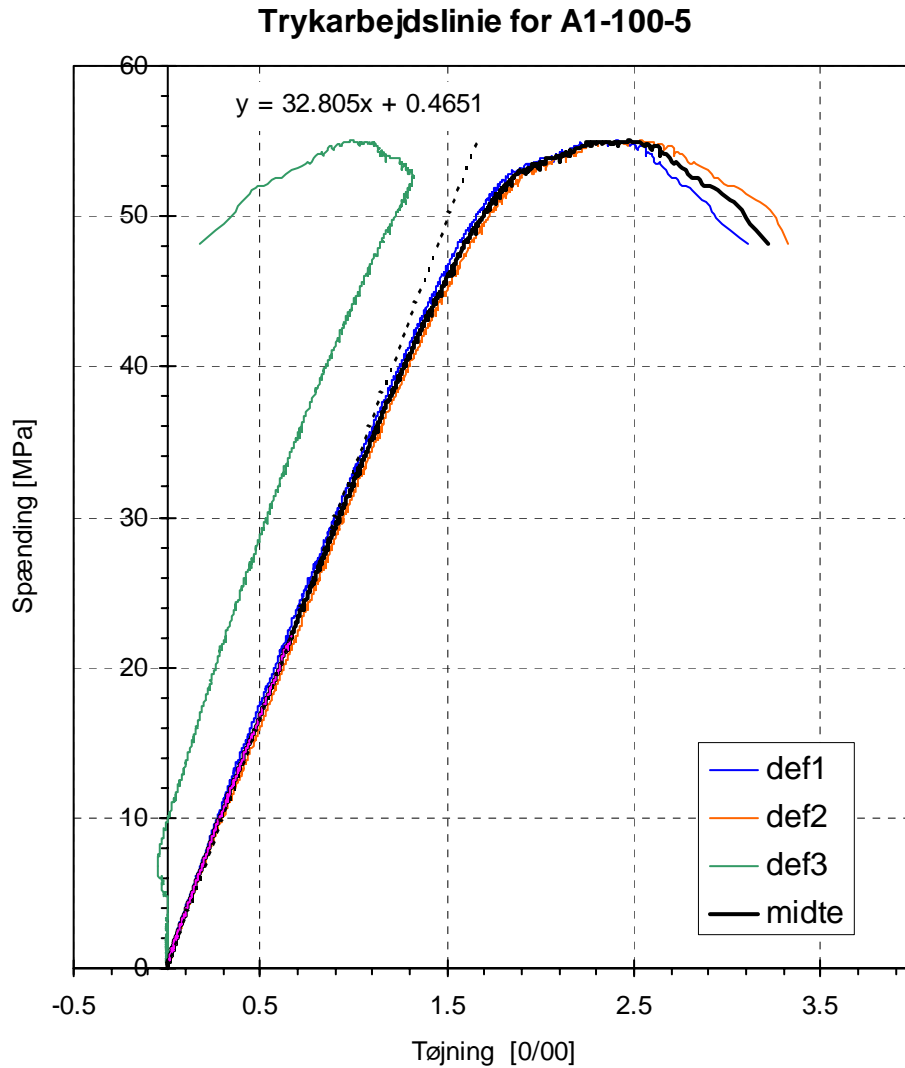
Noter:

- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.
- Målingerne afsluttet ved indtrædelse af pludseligt brud kort efter passage af toppunktet.



Noter:

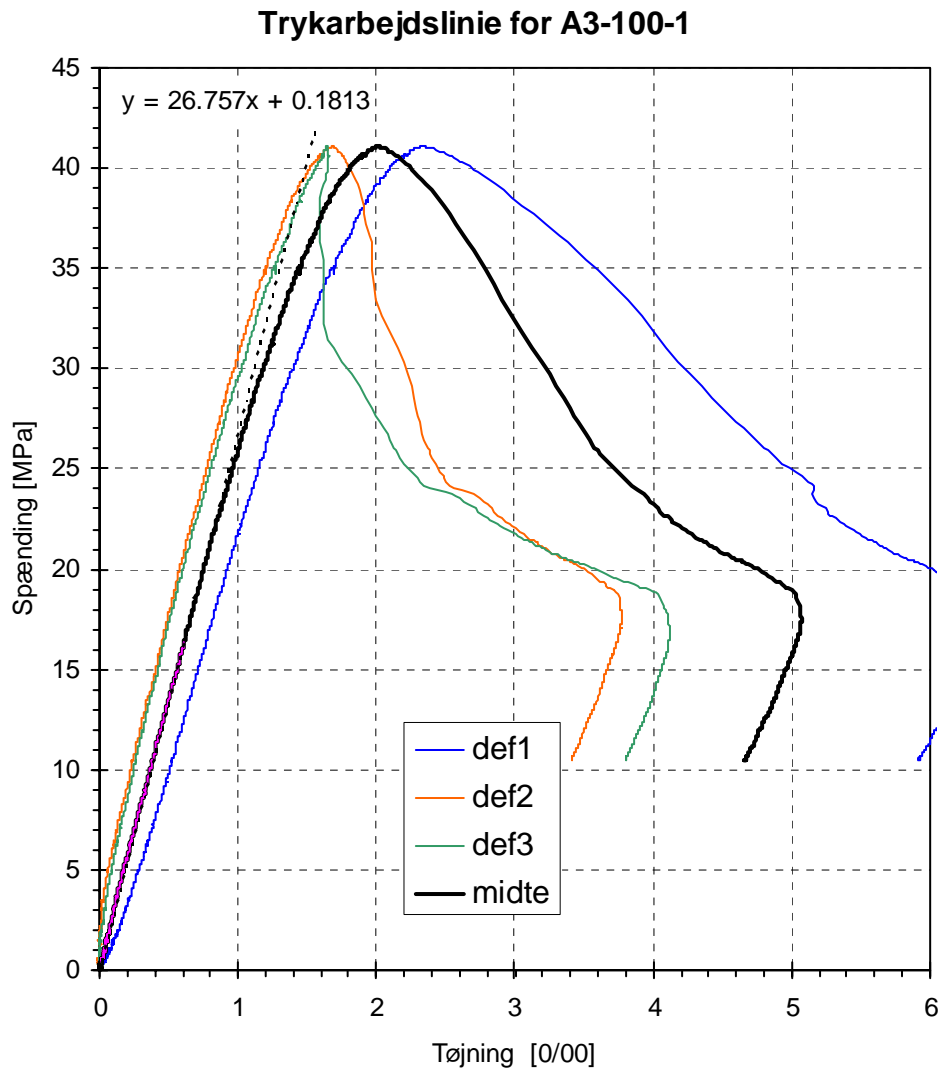
- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.
- Målingerne afsluttet ved indtrædelse af pludseligt brud kort efter passage af toppunktet.



Noter:

- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.
- Målingerne afsluttet ved indtrædelse af pludseligt brud kort efter passage af toppunktet.

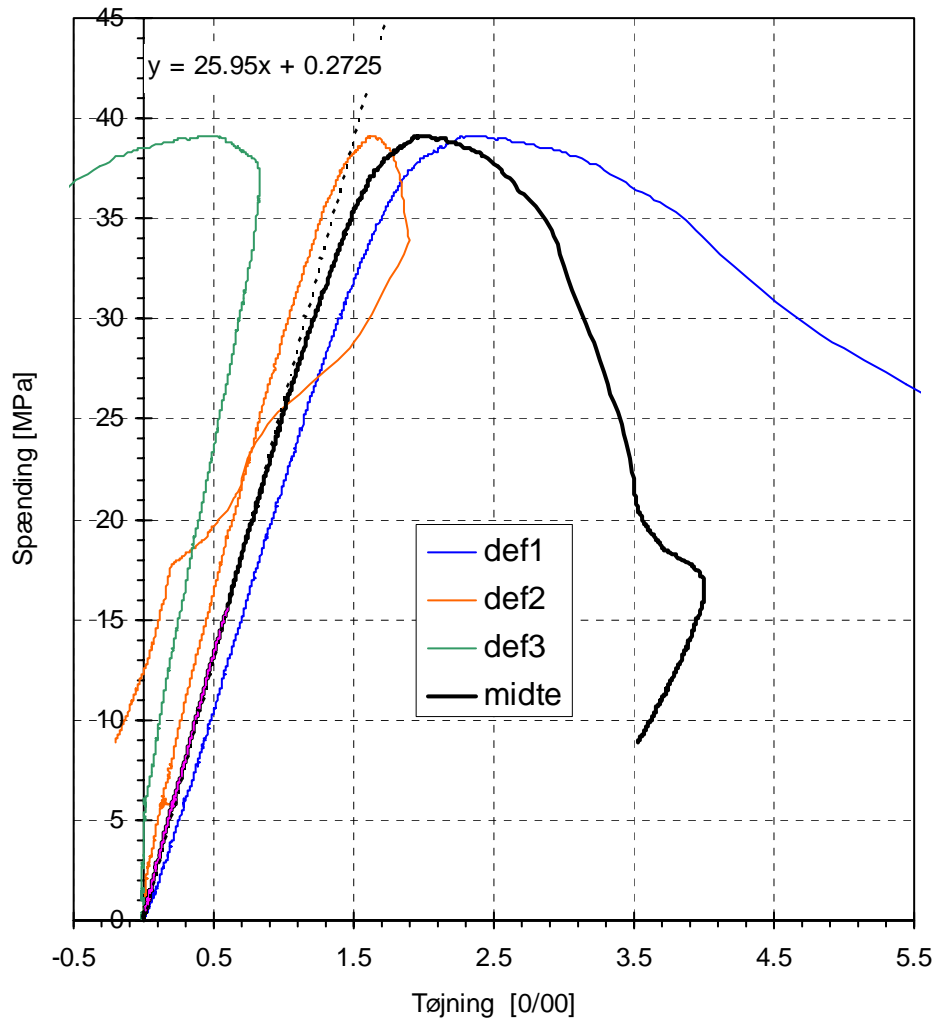
Appendiks E Arbejdskurver for A3



Noter:

- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.

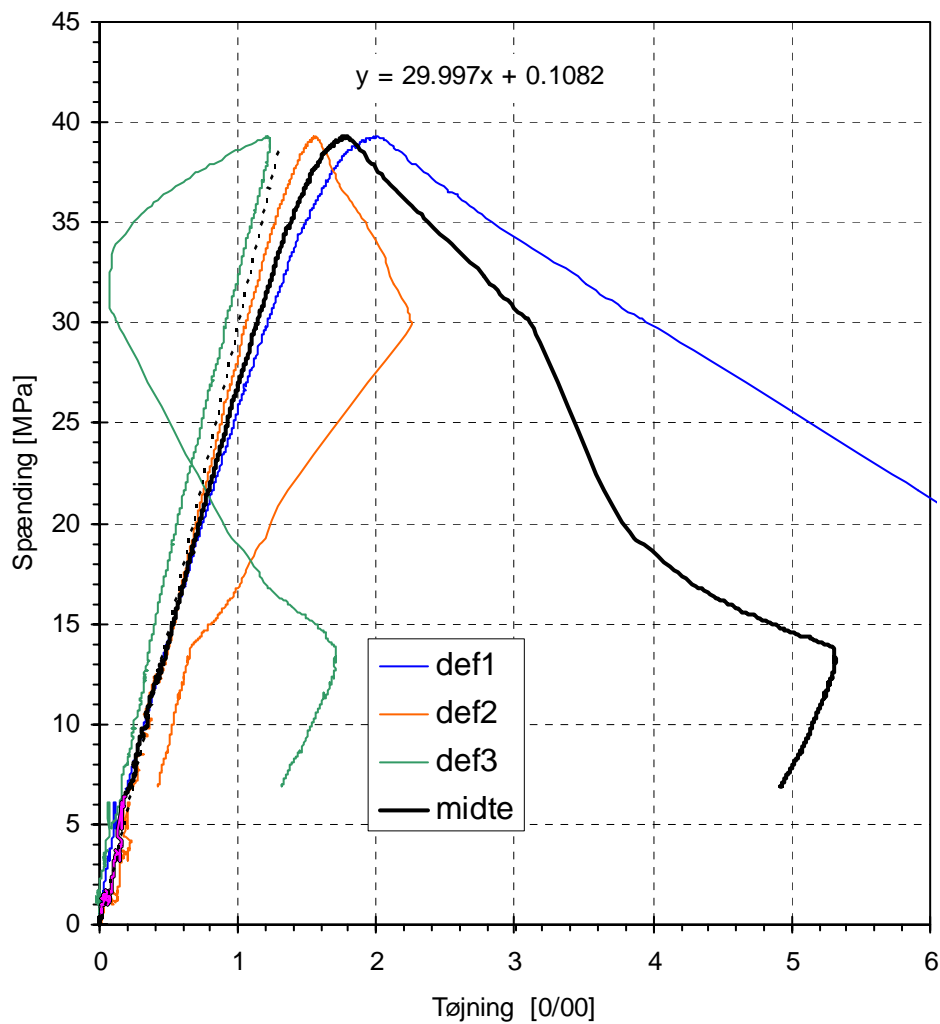
Trykarbejdslinie for A3-100-2



Noter:

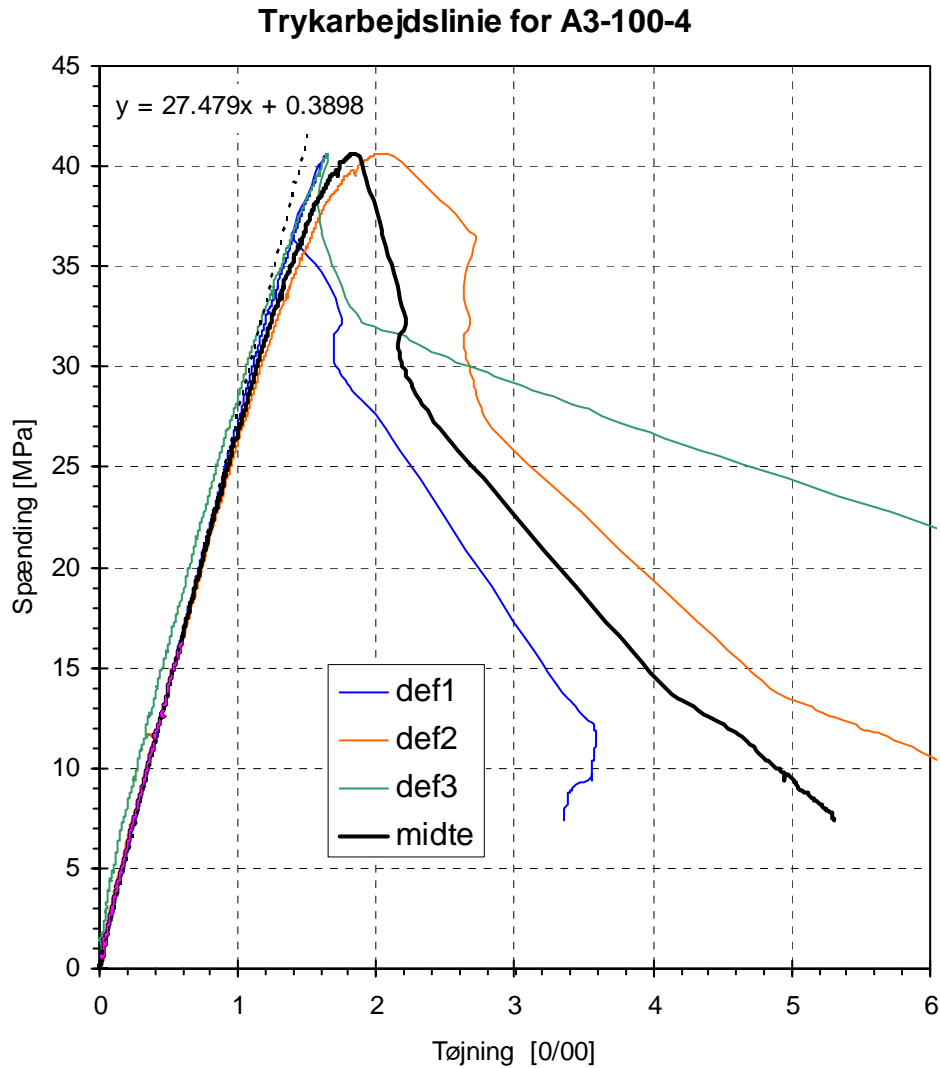
- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.

Trykarbejdslinie A3-100-3



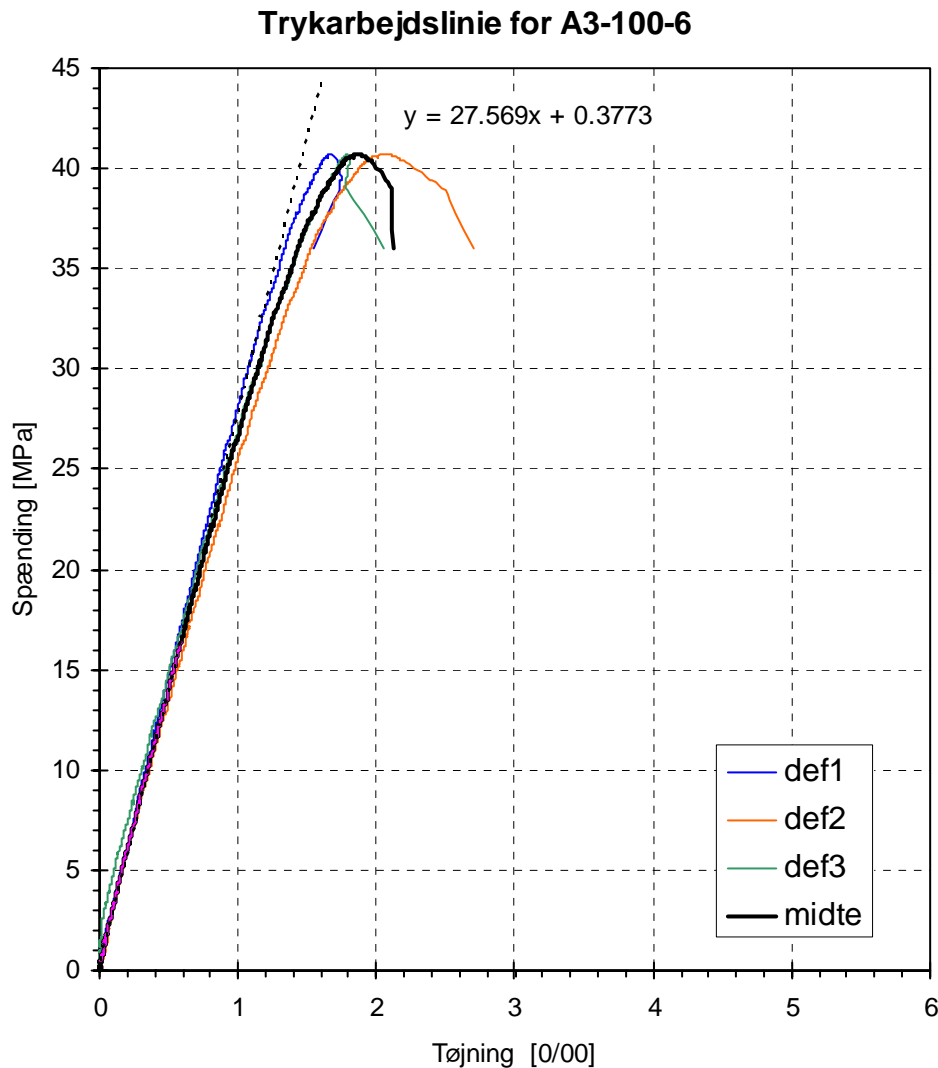
Noter:

- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.



Noter:

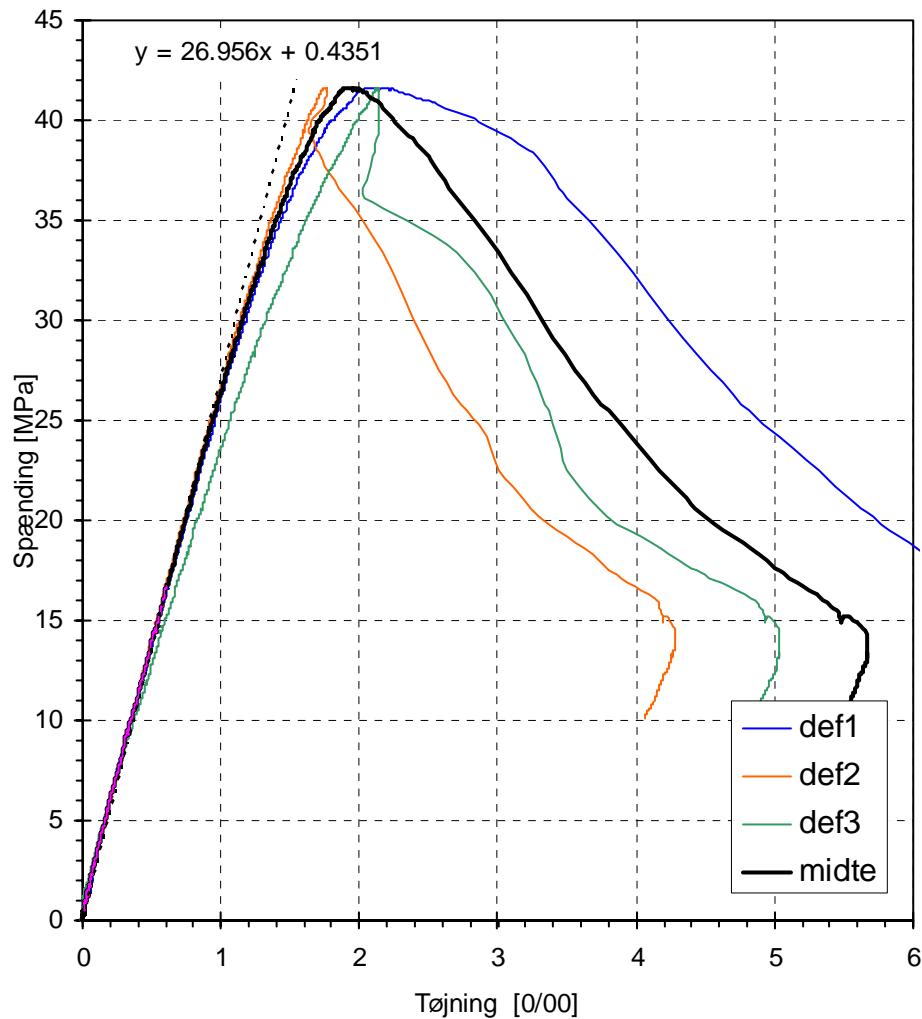
- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.



Noter:

- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.
- Målingerne afsluttet ved indtrædelse af pludseligt brud kort efter passage af toppunktet.

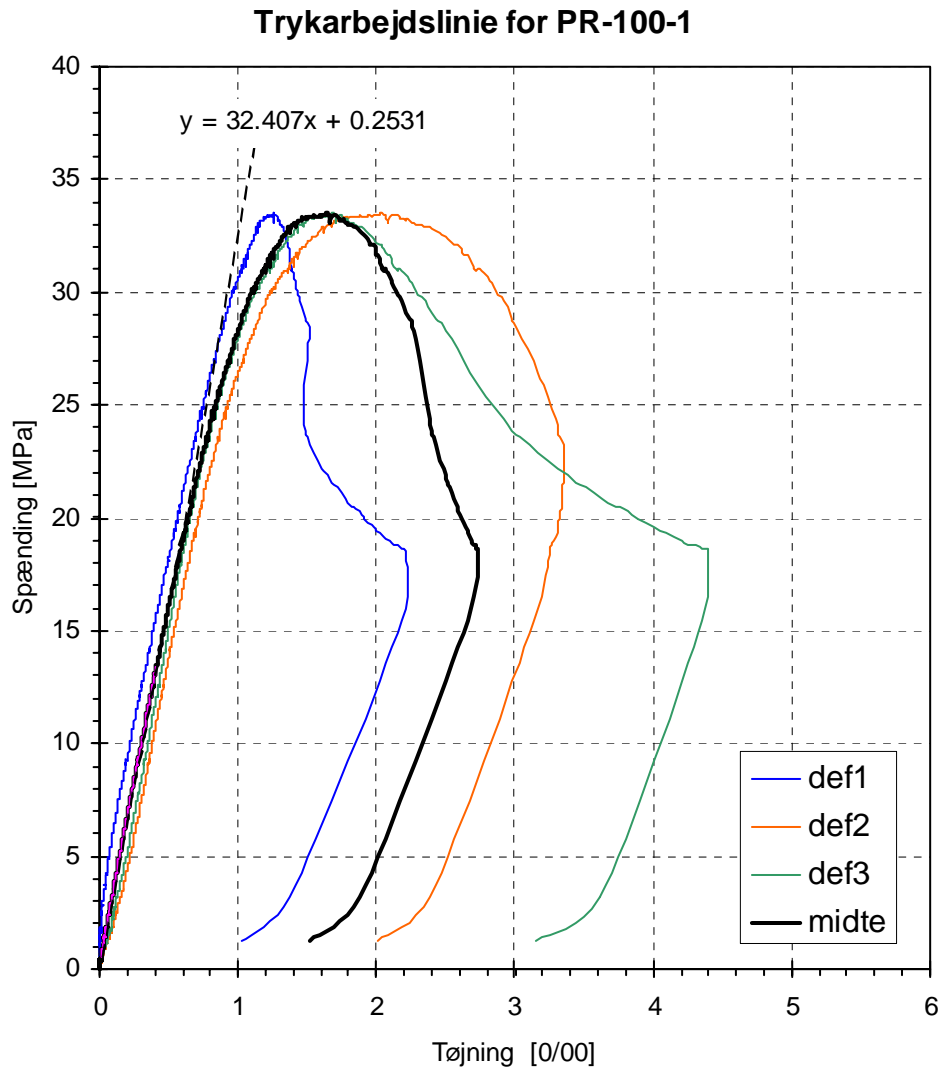
Trykarbejdslinie for A3-100-7



Noter:

- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.

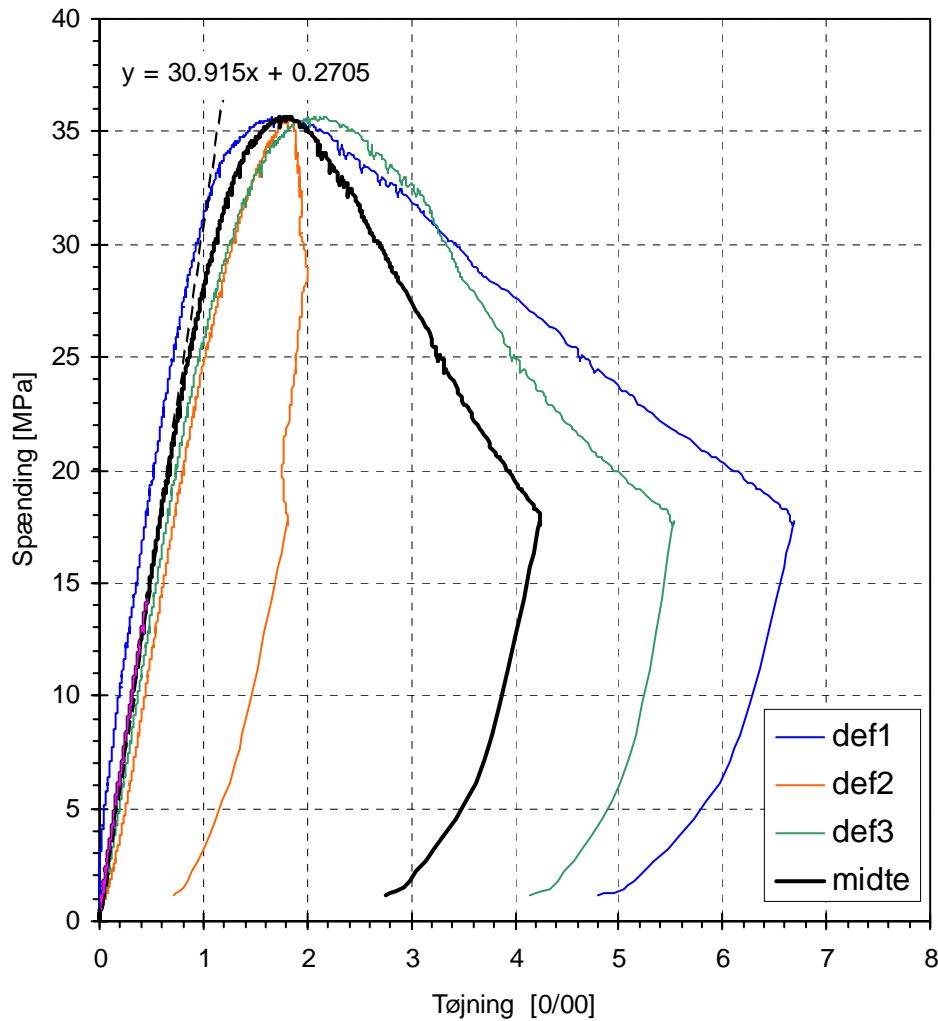
Appendiks F Arbejdskurver for PR



Noter:

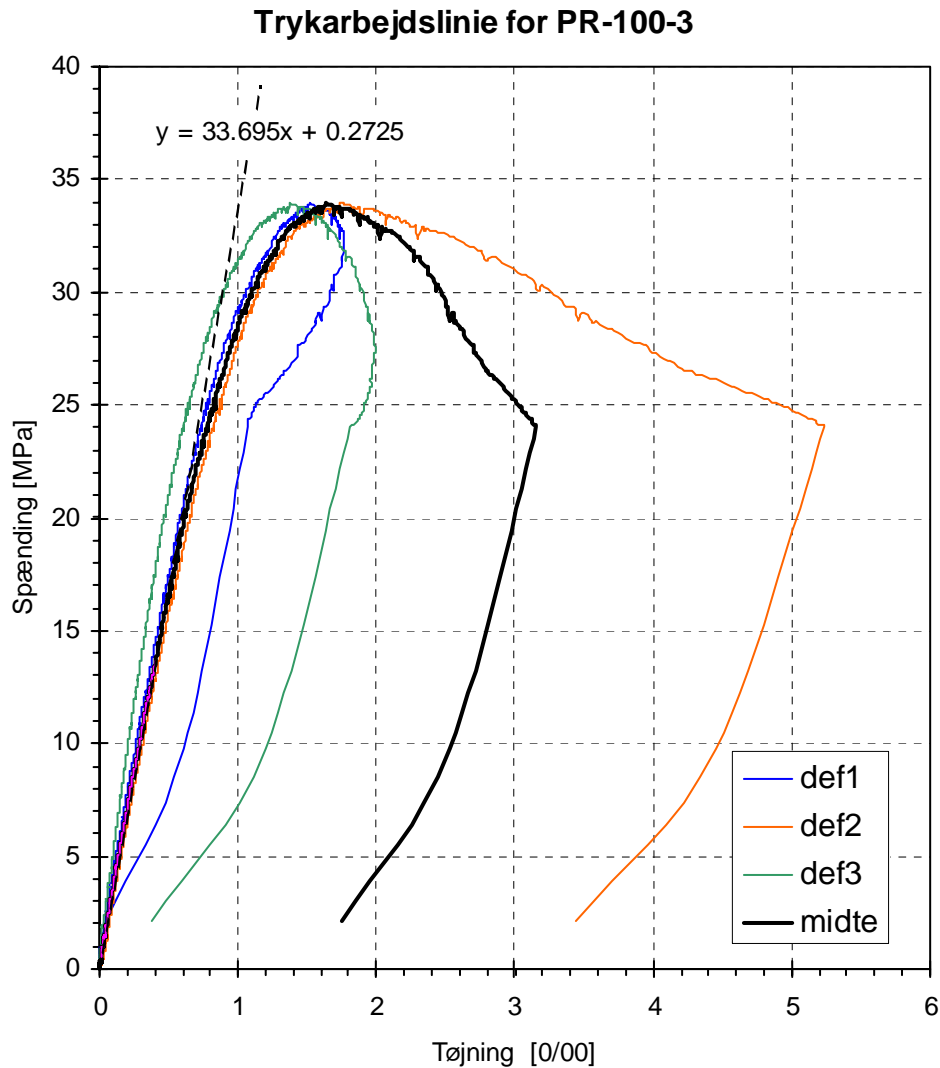
- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.
- Den sidste del af kurverne svarer til aflastning.

Trykarbejdslinie for PR-100-2



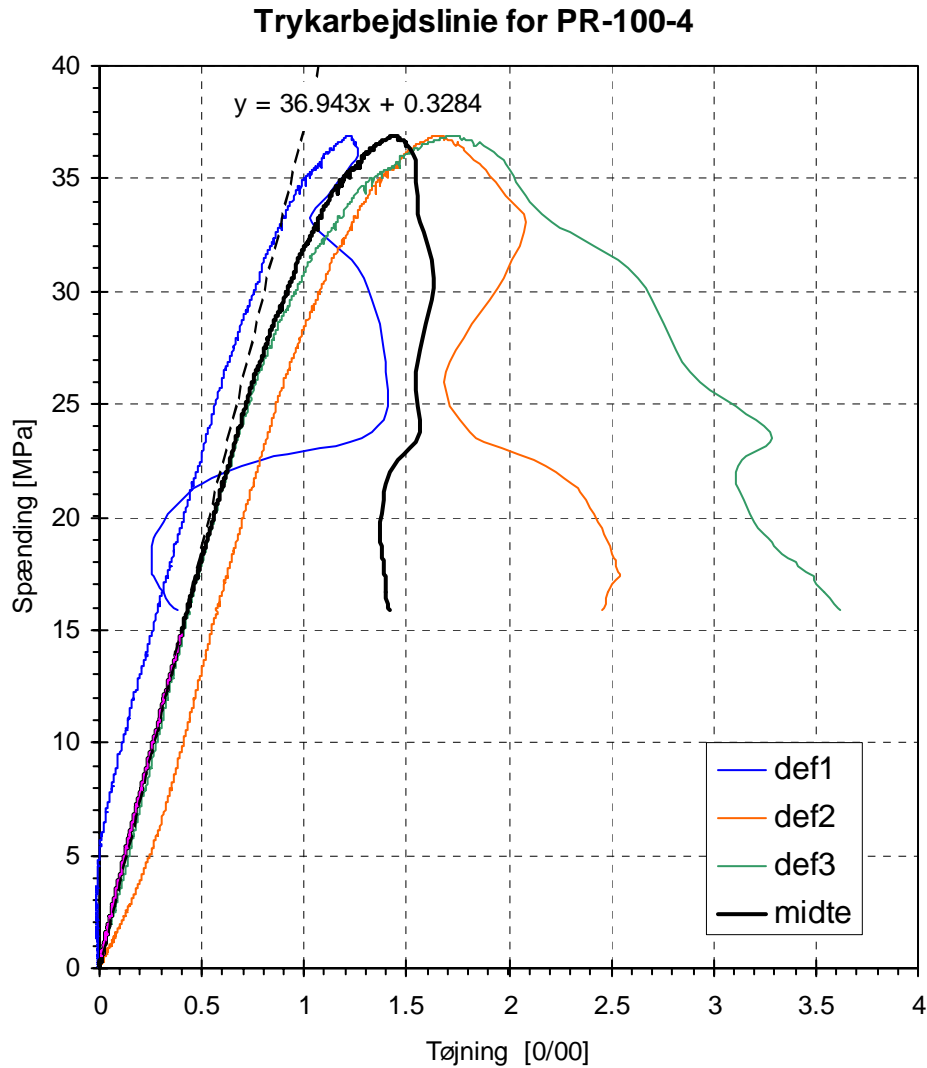
Noter:

- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.
- Den sidste del af kurverne svarer til aflastning.



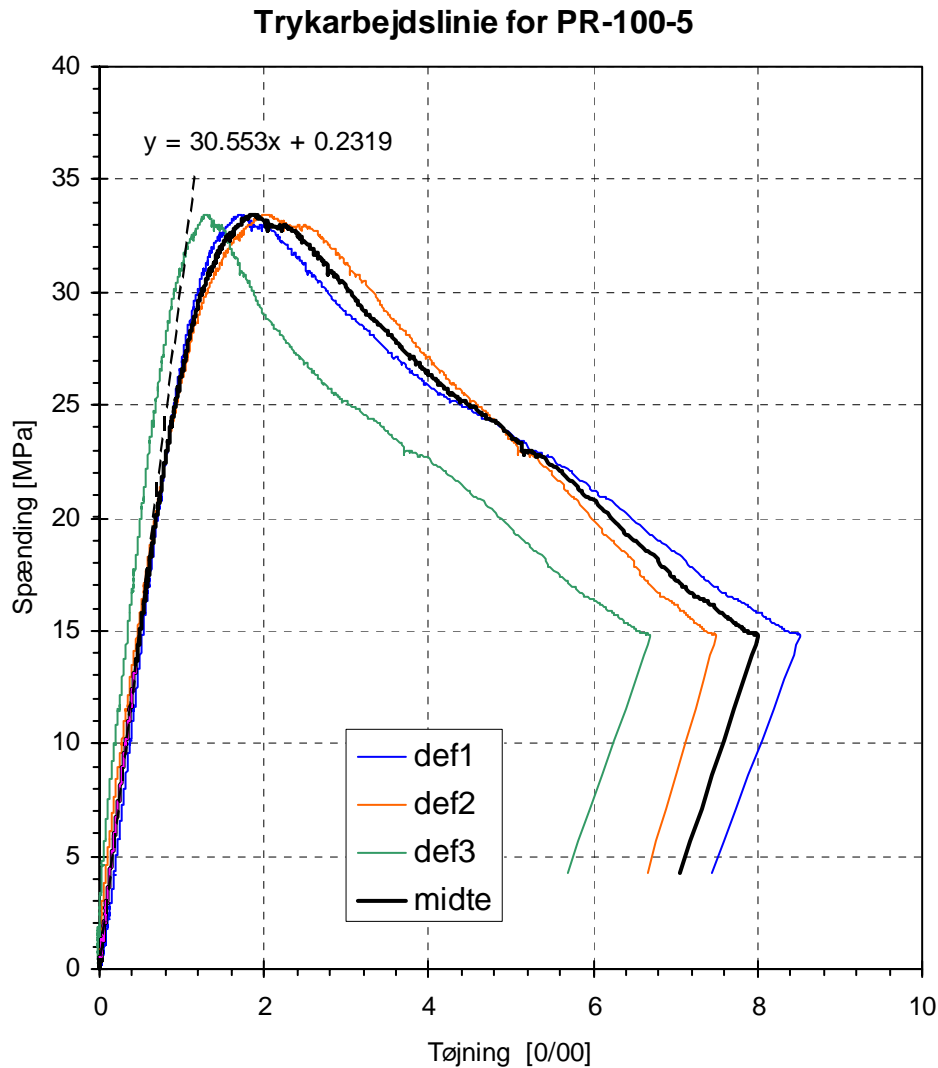
Noter:

- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.
- Den sidste del af kurverne svarer til aflastning.



Noter:

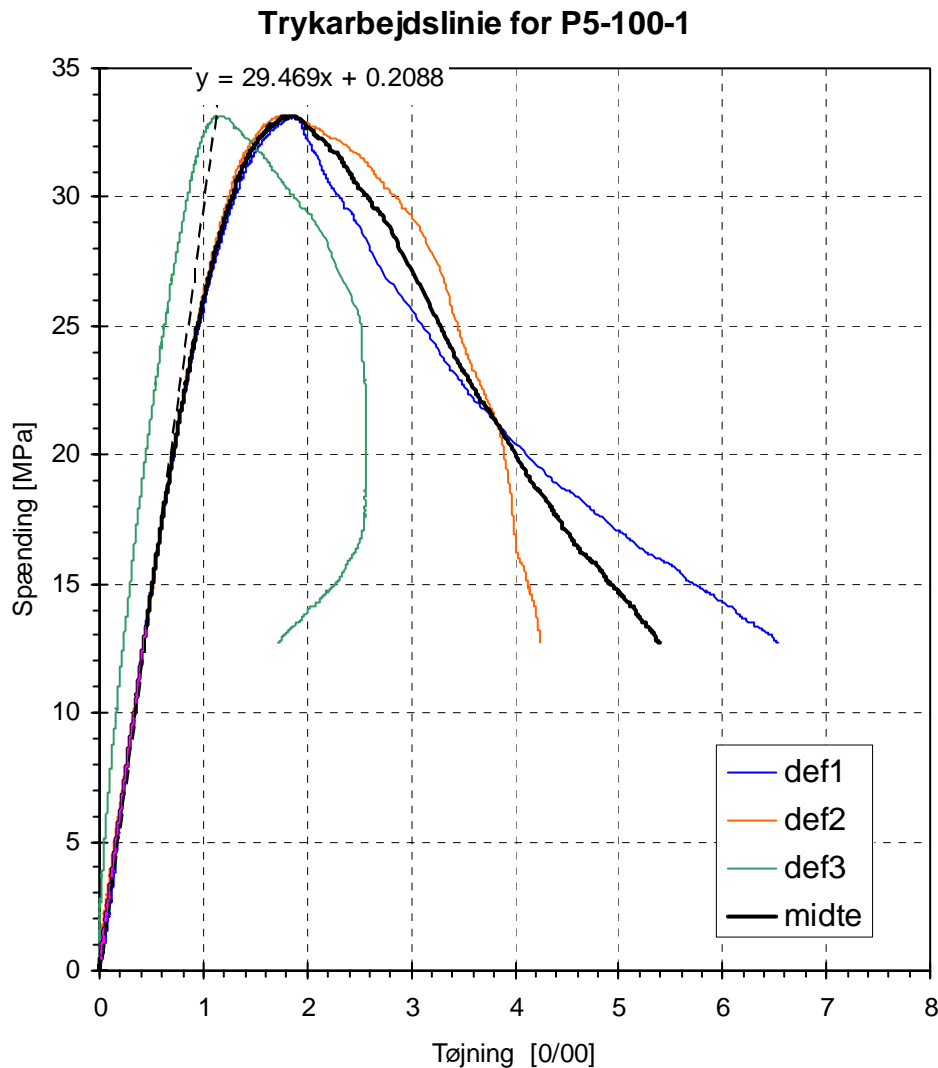
- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.



Noter:

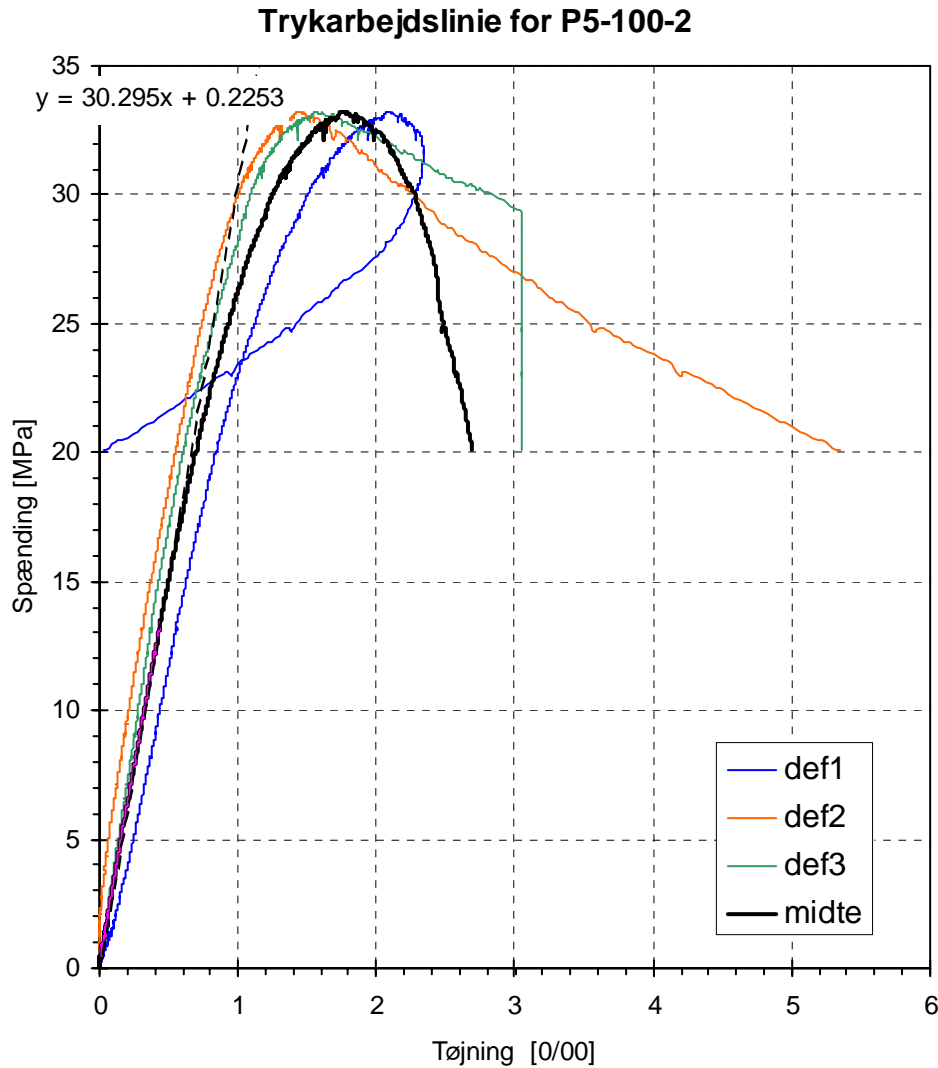
- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.
- Den sidste del af kurverne svarer til aflastning.

Appendiks G Arbejdskurver for P5



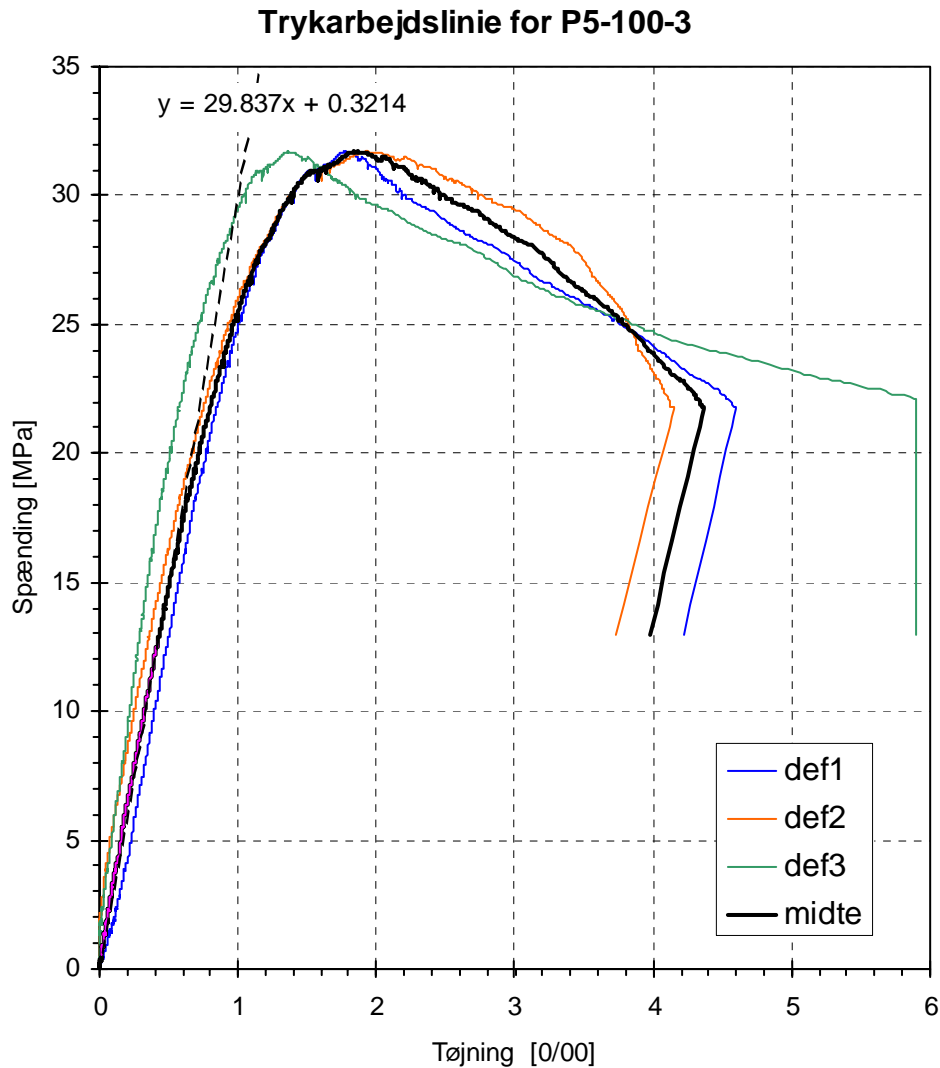
Noter:

- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.



Noter:

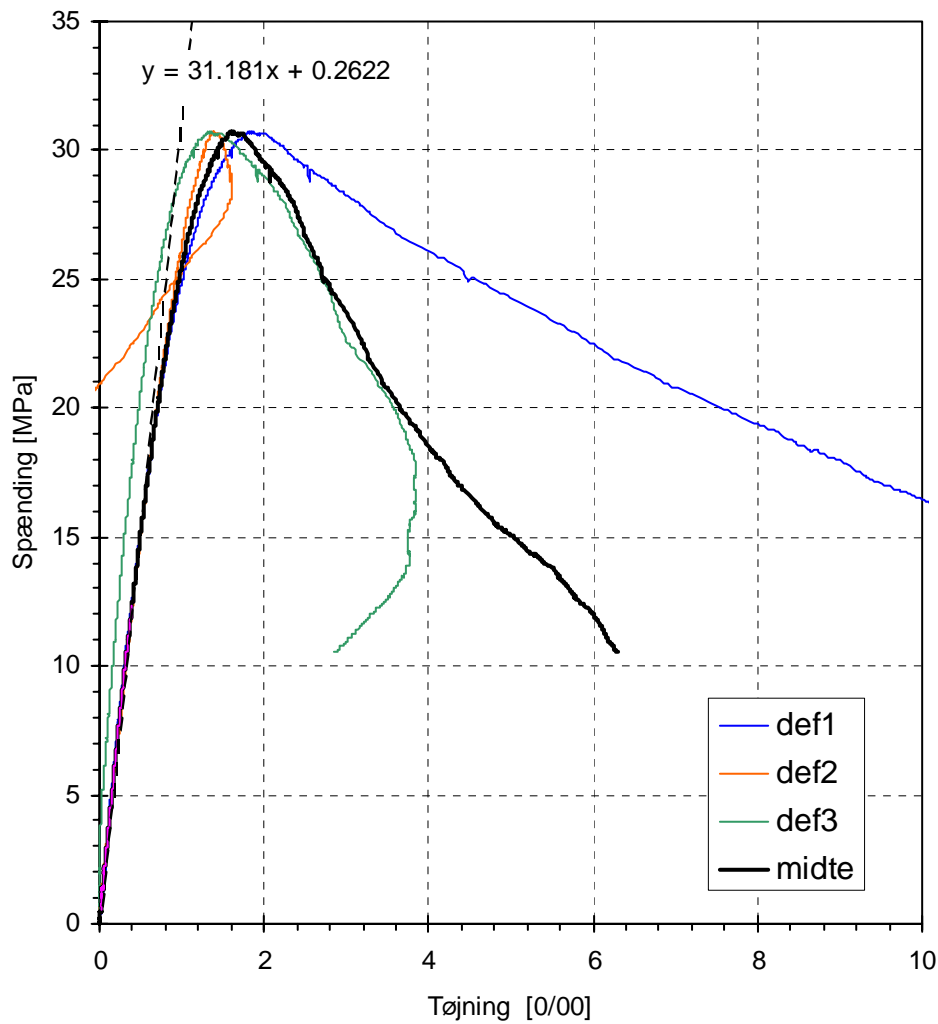
- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.



Noter:

- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.
- Den sidste del af kurverne svarer til aflastning.

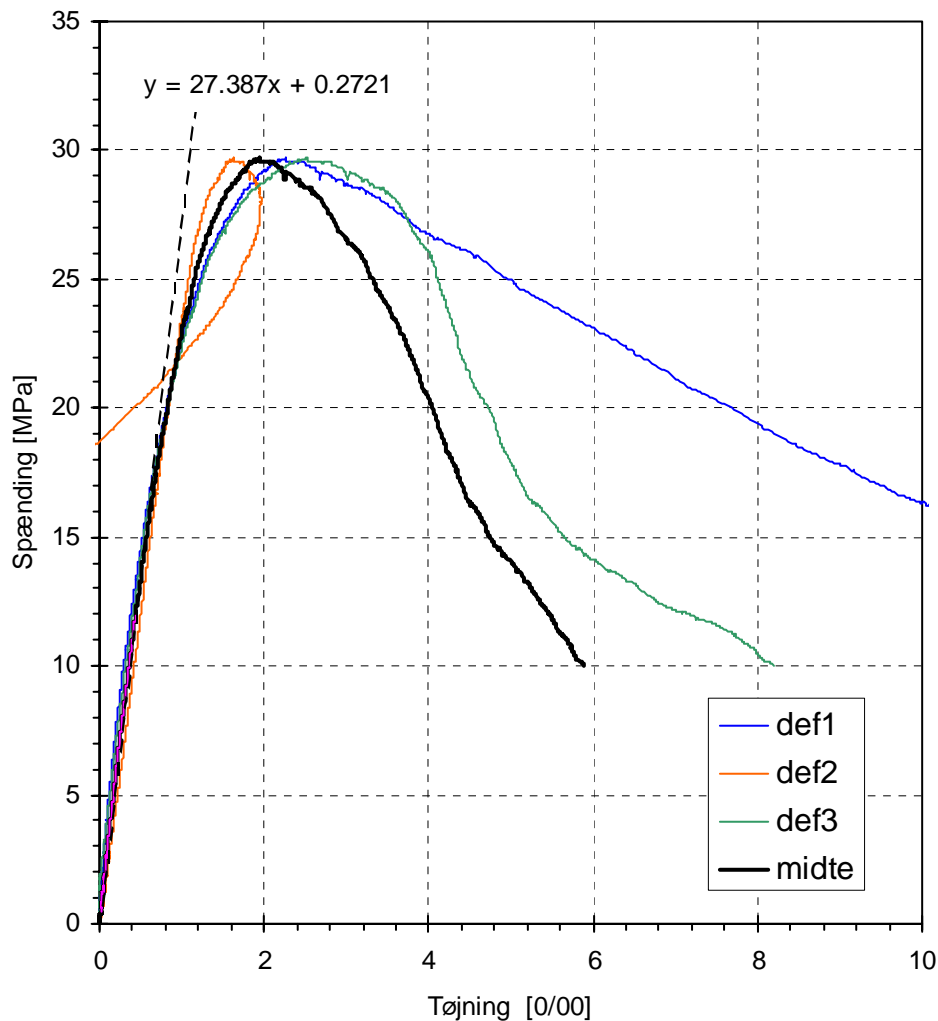
Trykarbejdslinie for P5-100-4



Noter:

- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.

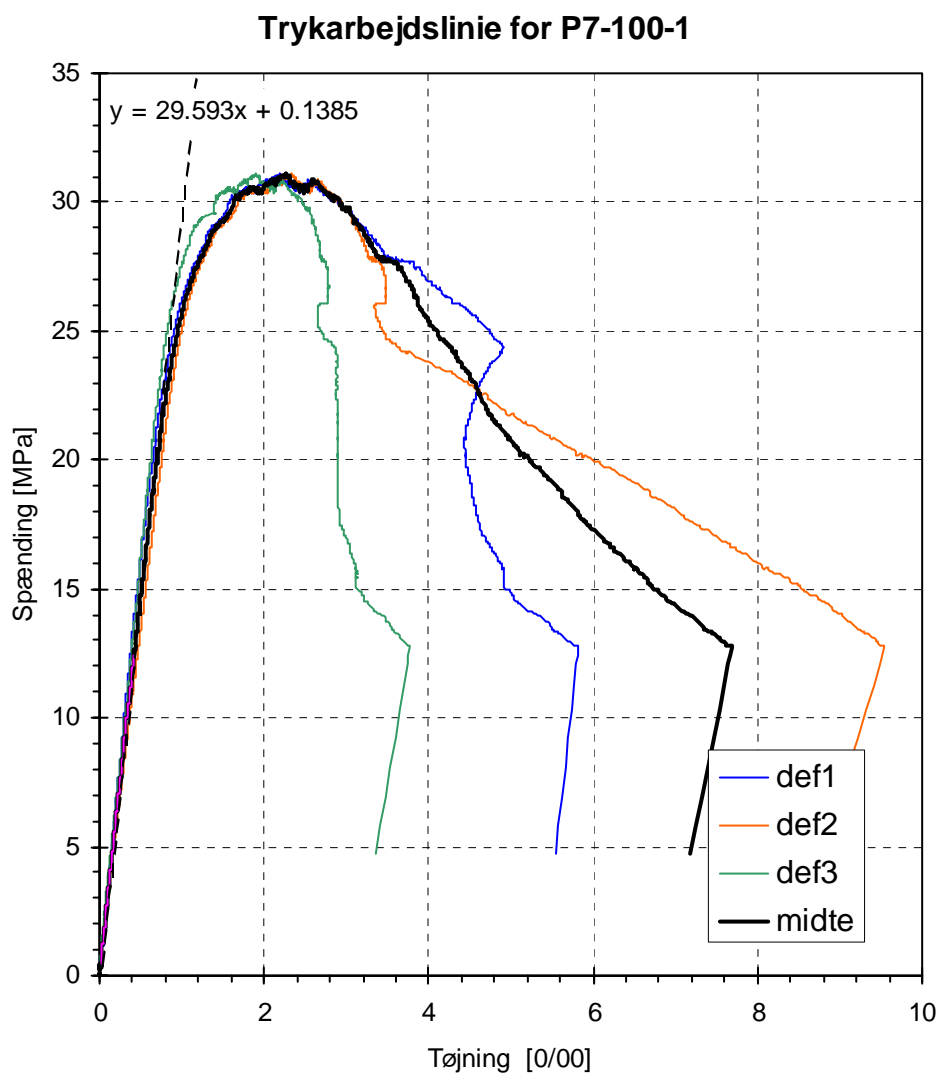
Trykarbejdslinie for P5-100-5



Noter:

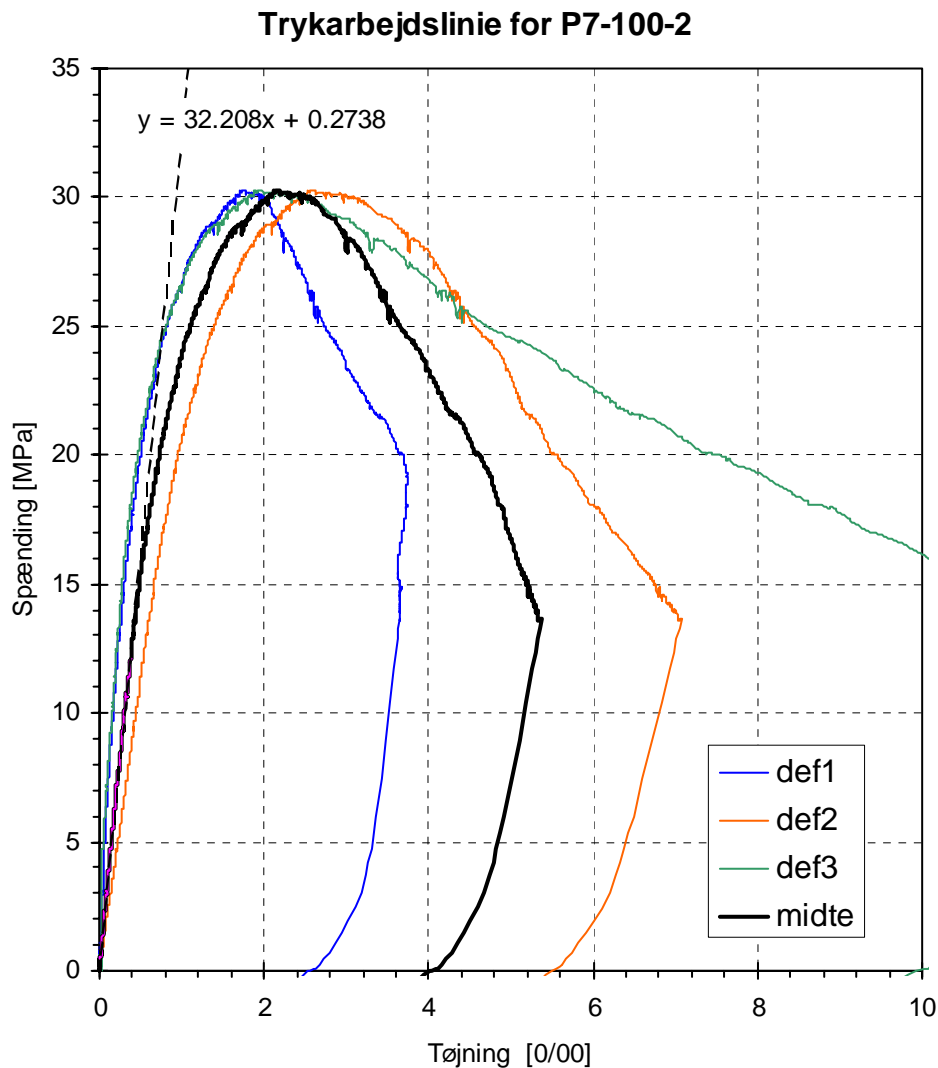
- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.

Appendiks H Arbejdskurver for P7



Noter:

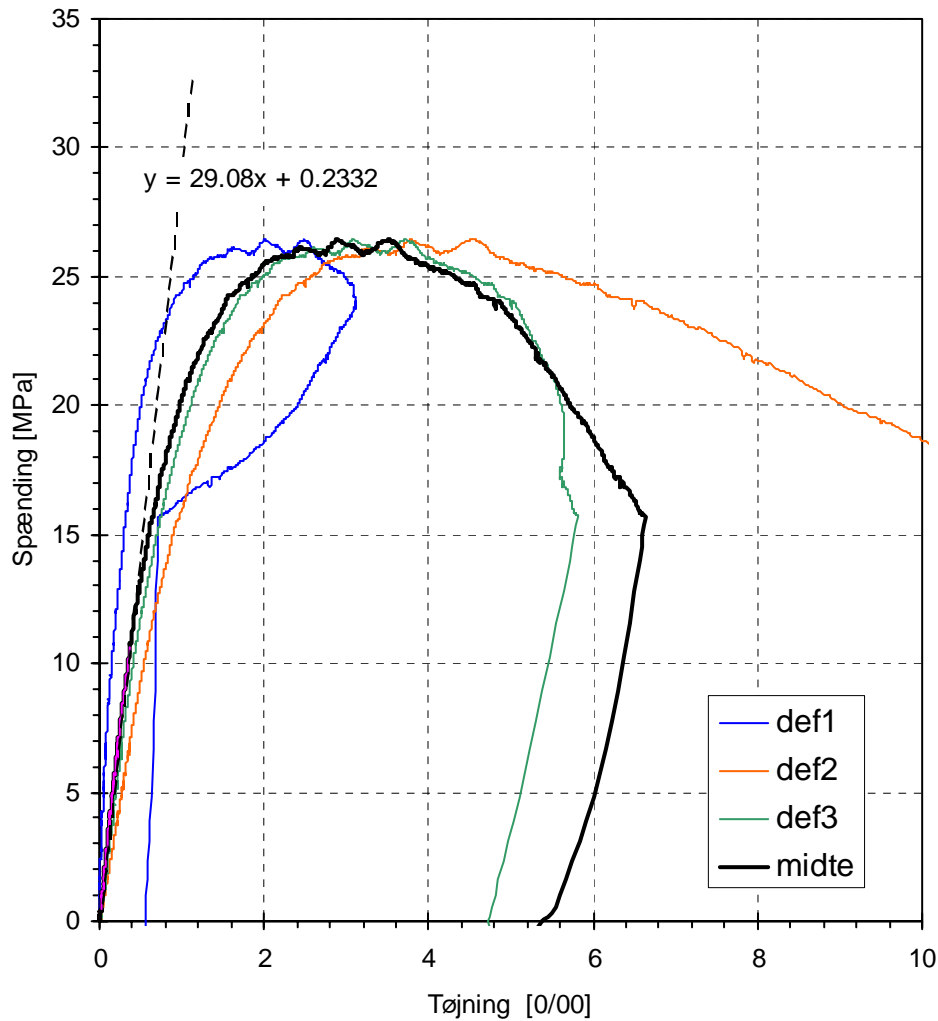
- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.
- Den sidste del af kurverne svarer til aflastning.



Noter:

- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.
- Den sidste del af kurverne svarer til aflastning.

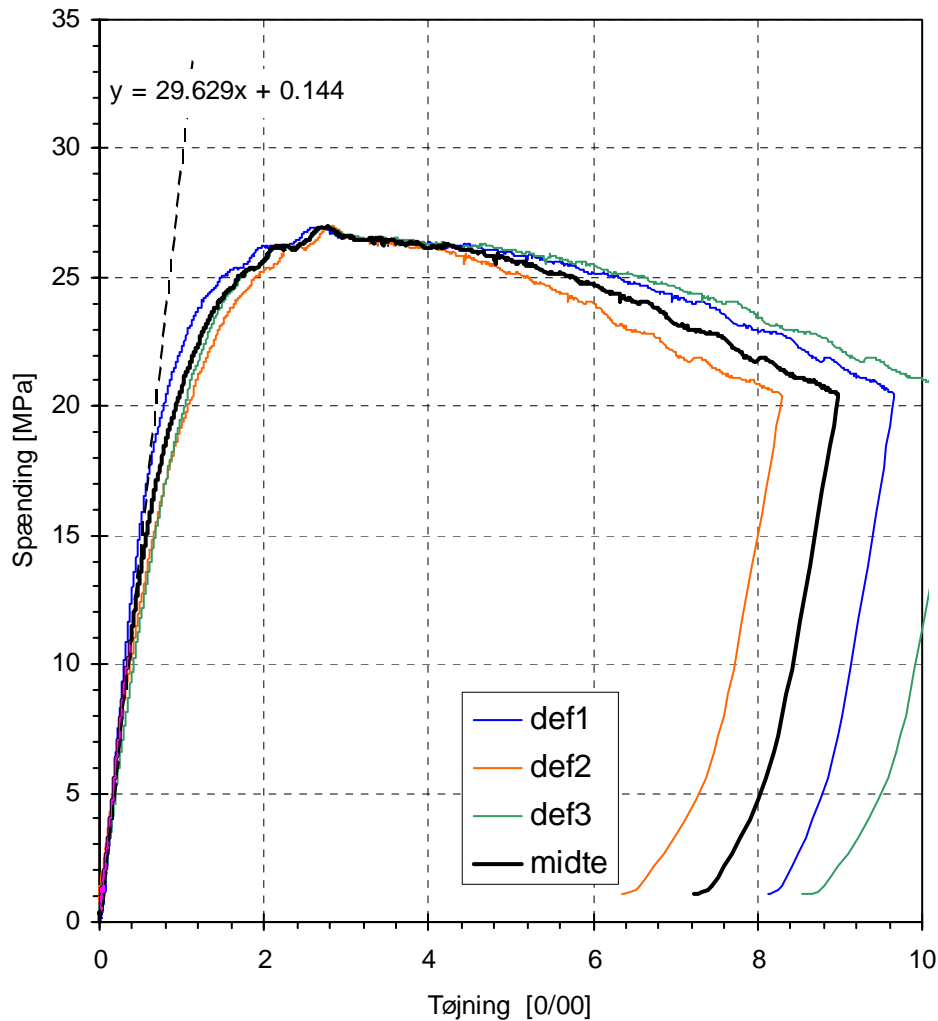
Trykarbejdslinie for P7-100-3



Noter:

- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.
- Den sidste del af kurverne svarer til aflastning.

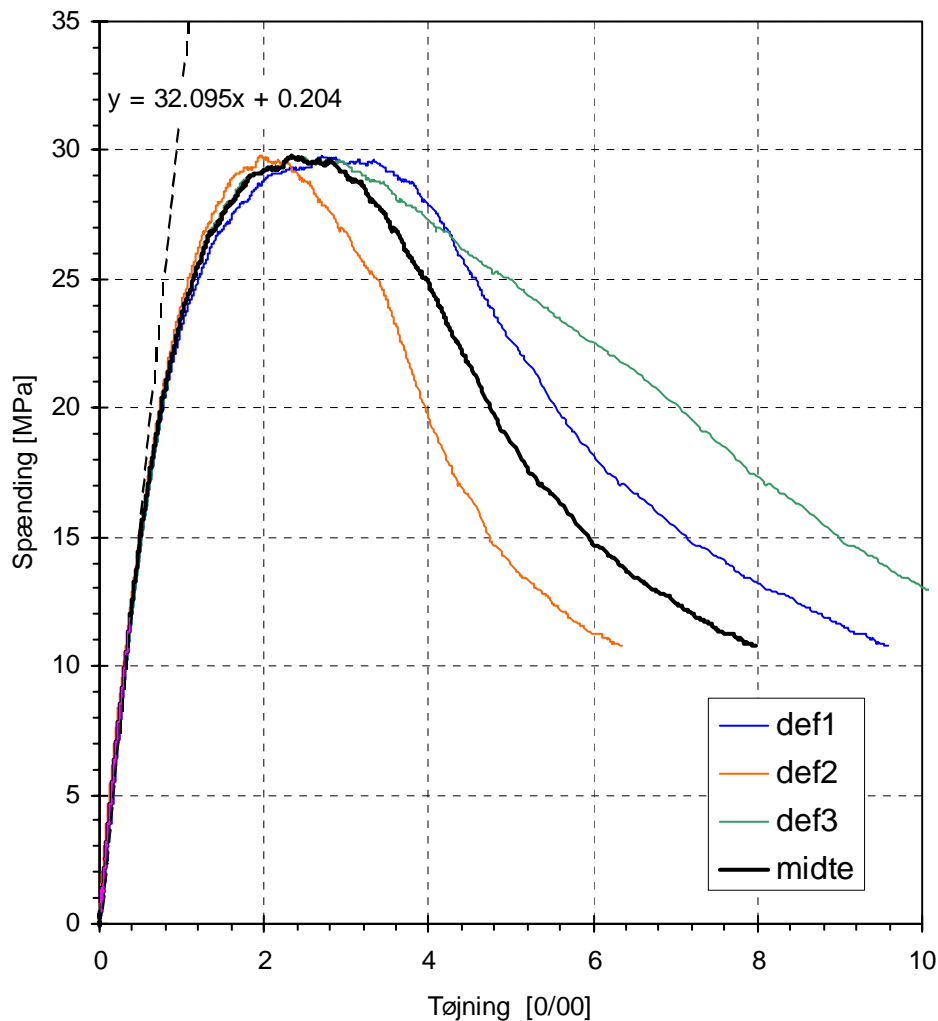
Trykarbejdslinie for P7-100-4



Noter:

- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducerne "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.
- Den sidste del af kurverne svarer til aflastning.

Trykarbejdslinie for P7-100-5



Noter:

- I alt 3 flytningstransducere måler cylinderens længdeændringer (100 mm målelængde).
- Transducere "def1" og "def2" er monteret diametralt modsat på prøveemnet.
- Middelværdien af "def1" og "def2" er tøjningen af cylinderens midterakse (fed linie).
- Transducer "def3" er forskudt 90° ift. "def1" og "def2" og kan således bruges til at vurdere tøjningernes fordeling over cylindertværsnittet (jf. Figur 1).
- Regressionslinie angivet for målinger mellem ca. 0,5 MPa og 40 % af trykstyrken.