



Samverkanspelare av 3D-utskrivna betongform och SKB – Labförsök

CBE/ KTH, 11 april 2024

Johan Silfwerbrand



Innehåll

1. Bakgrund
2. Metodik
3. Pelarförsök
4. Vidhäftning mellan betong & betong
5. Beständighetsprovning
6. Slutsatser
7. Förslag på framtida forskning



Bakgrund

Bropelare



Idén

- Att kombinera kvarsttande 3D-utskriften (3DP) betongform med igjuten självkompakterande betong (SKB).





Historik om SKB

- Utvecklad i Japan under 1980-talet – mål ökad produktivitet & bättre arbetsmiljö.
- Tidigt till Sverige (1993) – EU-projekt, 1:a bron (1998), 1:a int. konferens (1999), Betongföreningens rekommendationer (2002, ny uppl. 2020)
- ... men ändå bara 15 % inom platsgjuten betong
- Mycket högre andel inom förtillverkad betong.



Historik om 3D-utskriften betong (3DPC) 1 (2)

- Charles Hull kombinerar CAD med 3DP med polymer som "bläck" (1984).
- ASTM har kategoriserat 7 olika tekniker inom 3DP med rötter i 1990-talet eller tidigare.
- Teknik för 3DP av metallpulver med laser (1987).
- Joseph Pegna utvecklar teknik för att skriva ut ett cementbruk lager för lager (1995).



Historik om 3D-utskrivnen betong (3DPC) 2 (2)

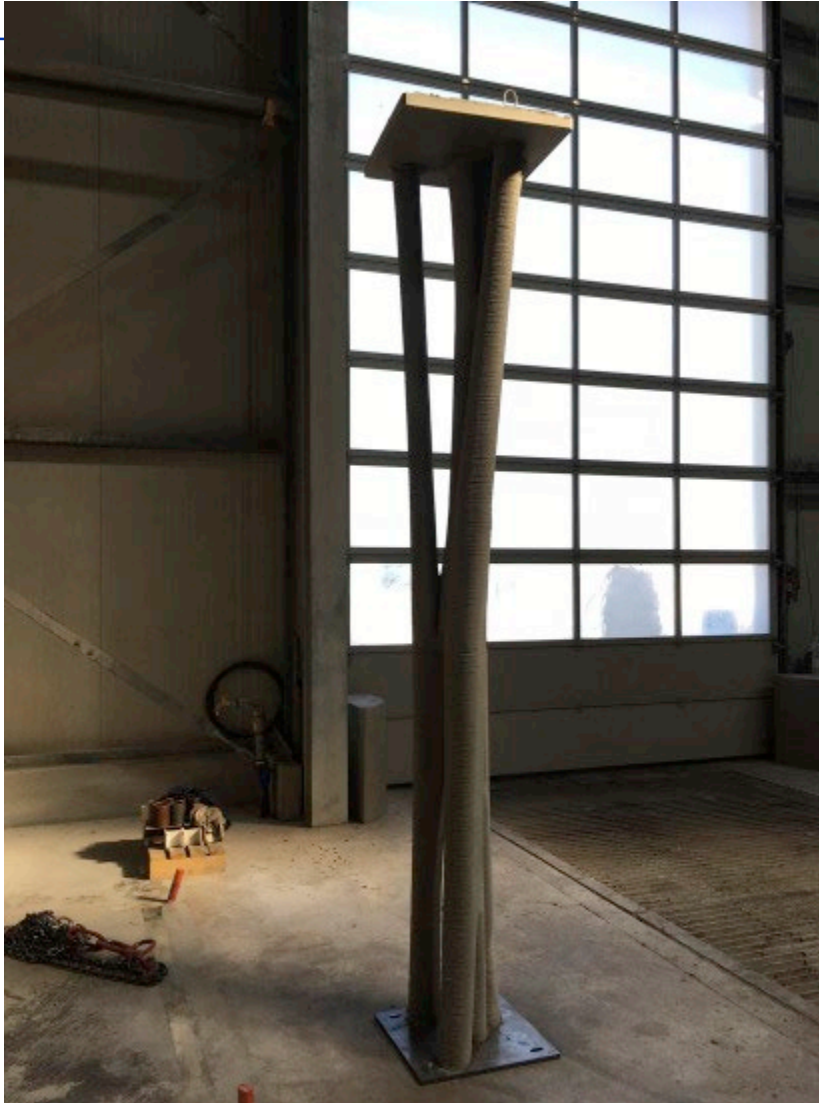
- Robert J. Flatt (ETH) tilldelas Swedish Concrete Award för den schweiziska grupp som kanske är världsledande på 3DPC (2019).
- Andra framstående miljöer: IAAC i Barcelona, TU Delft, Aachen.
- Helena Westerlind (KTH) första svenska doktorn med "Coreographing Flow" (2021).
- Tobias v. Haslingen (ConcretePrint) skriver ut första svenska huset i betong (2021).
- 21 mars 2024: Nordiskt webinarium om 3DCP

Exempel 1



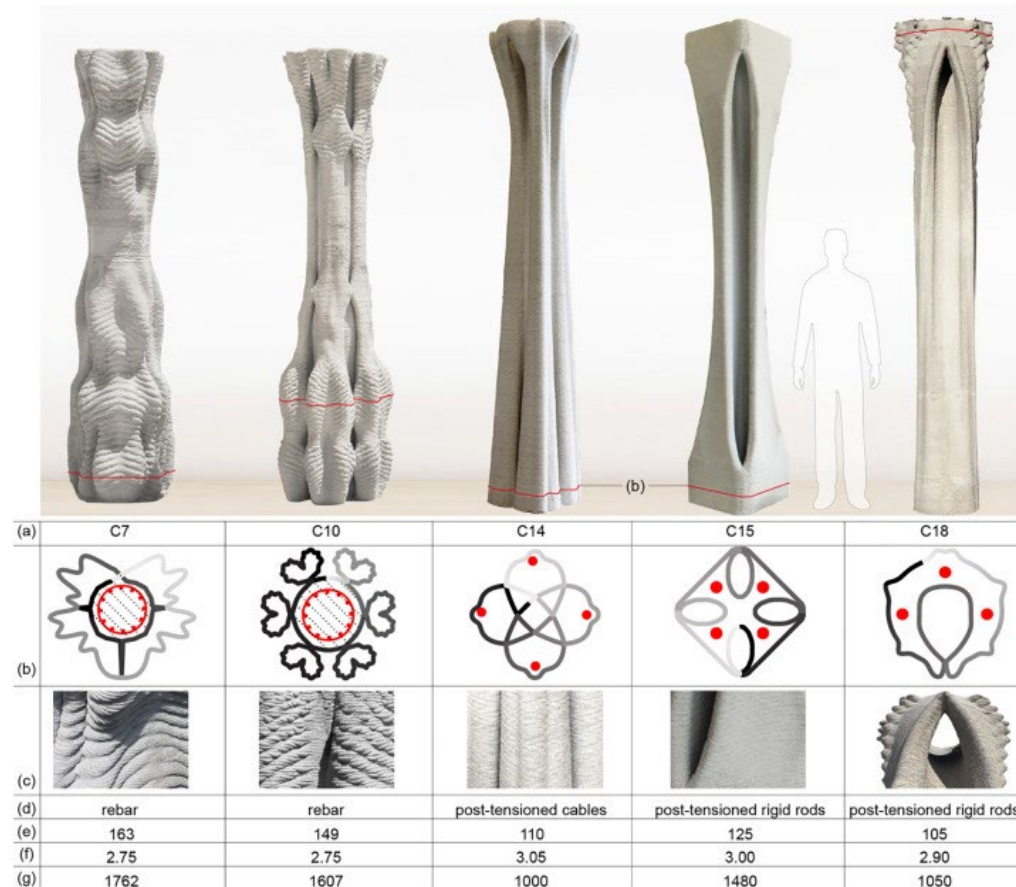
En fyra meter hög pelare tillhörande en sporthall för en skola i Aix-en-Provence, Frankrike (Gaudillière m.fl., 2019).

Exempel 2



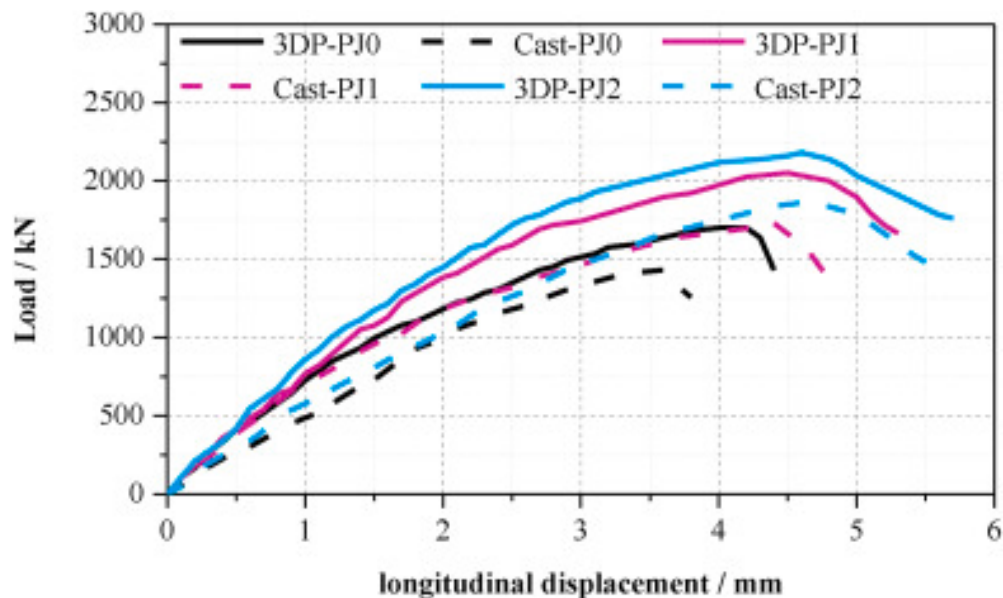
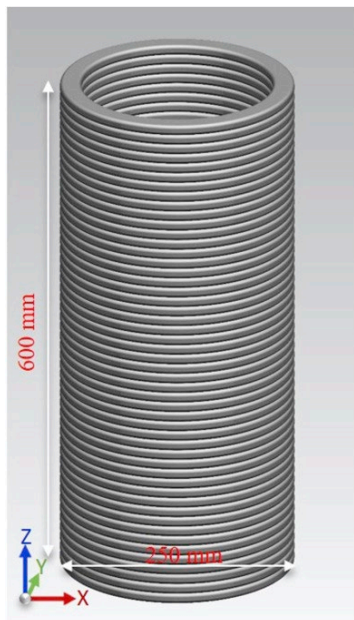
Pelare med
kvarsittande 3D-
utskriven betongform
fylld med ultrahög-
hållfastbetong för ett
YRES koncepthus
(Gaudillière m.fl.,
2019).

Exempel 3



Exempel på 3D-utskrivna betongpelare. Anton m.fl. (2021).

Exempel 4



3D-utskrivna form som i nästa skede fylls med betong (t.v.) resp. belastningsförsök (t.h.). (Zhu m.fl., 2021).

"3DP" = provkroppen har en kvarsittande form. "Cast" = uteslutande av gjuten betong. "PJ0" = oarmerad, "PJ1" & "PJ2" = ökande armering.

Exempel 5



Tor Alva – Der Weisse Turm, Mulegns, Schweiz

Examensarbeten vid KTH



Fokus på gjutbarhet
& vidhäftning
Boned Ferrer (2021)



Fokus på gjutbarhet &
formtryck
Shabo & Hossein (2021)

Slutsatser

- Lovande teknik.
- Att skriva ut upp till 2,4 m höga, cirkulära pelare med tekniken i Tumba fungerar.
- Formen håller för formtryck motsvarande (minst) 2,5 m vätsketryck med $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$.
- Vidhäftning mellan formbetong & betong i närheten av vad som normalt erhålls i fält (strax under 1 MPa).
- Formen behöver skyddas mot stora temperaturskillnader (vintertid, dvs som vanligt).
- Litteraturstudien påvisar estetisk potential.



Nya projektet – metodik



Syfte & mål

- **Syfte:** Att vidareutveckla tekniken med samverkande bropelare med kvarsittande 3D-utskrivna betongform och igjuten SKB.
- **Mål:** Att kvantifiera samverkanspelarnas bärförmåga och beständighet.



Metodik: Steg 1-11

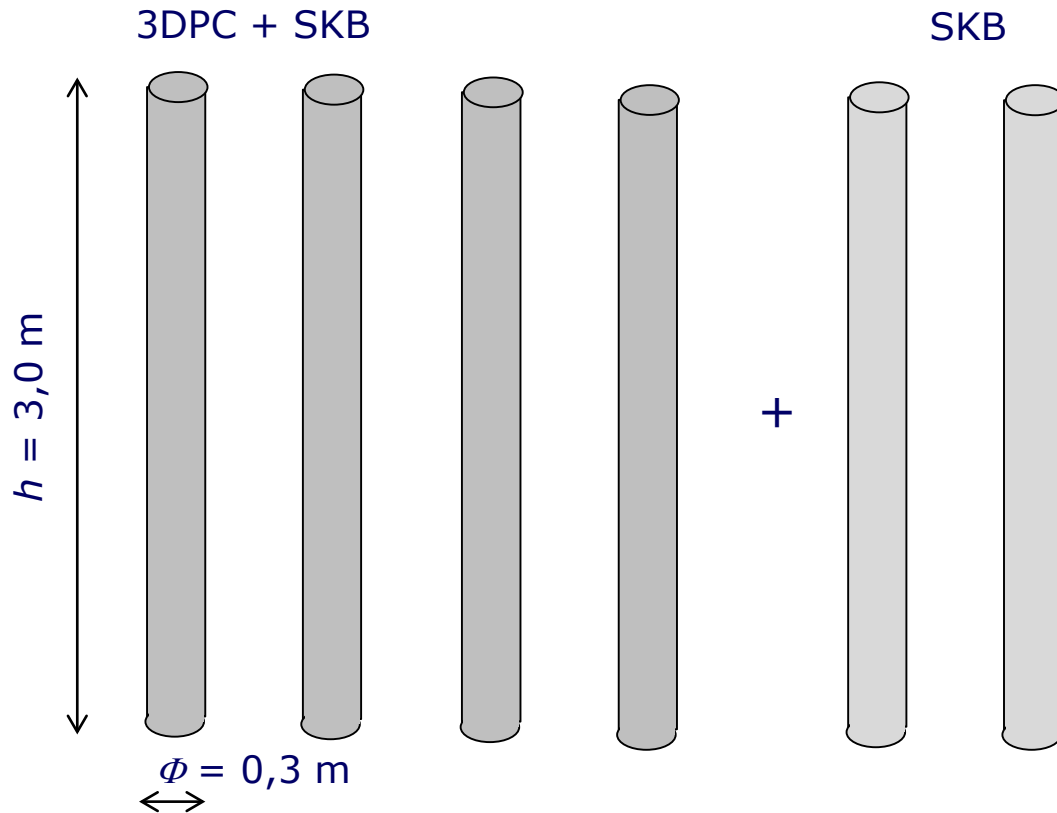
Nr	Rubrik	Utfördes av
1	Provningsprogram	KTH
2	Framtagning av betongrecept för 3D-utskrift	ConcretePrint
3	Förberedelser för 3D-utskrift	ConcretePrint
4	3DP formar + provkroppar	ConcretePrint
5	Rekvirering av hårdpappsformar	KTH
6	Armering med trådtöjningsgivare	KTH
7	Gjutning av SKB + provkroppar	Betongindustri
8	Provning av färska egenskaper, SKB	KTH
9	Mätning av formtryck (inkl givare)	LTU
10	Provning av armeringsstål*	
11	Provning av betongernas tryckhållfasthet & E-modul	RISE



Metodik: Steg 12-22

Nr	Rubrik	Utfördes av
12	Provning av beständighetsegenskaper	RISE
13	Transport av pelare till laboratoriet	
14	Iordningsställande av provningsrigg	RISE
15	Belastningsförsök (6 st)	RISE
16	Utborring av betongcylindrar	RISE
17	Vidhäftningsprovning	RISE
18	Dokumentation av hela projektet	KTH
19	Analys av mätdata	KTH
20	Rapportskrivning	KTH
21	Skrivning av två vetenskapliga artiklar	KTH
22	Muntlig presentation inkl förberedelser	KTH

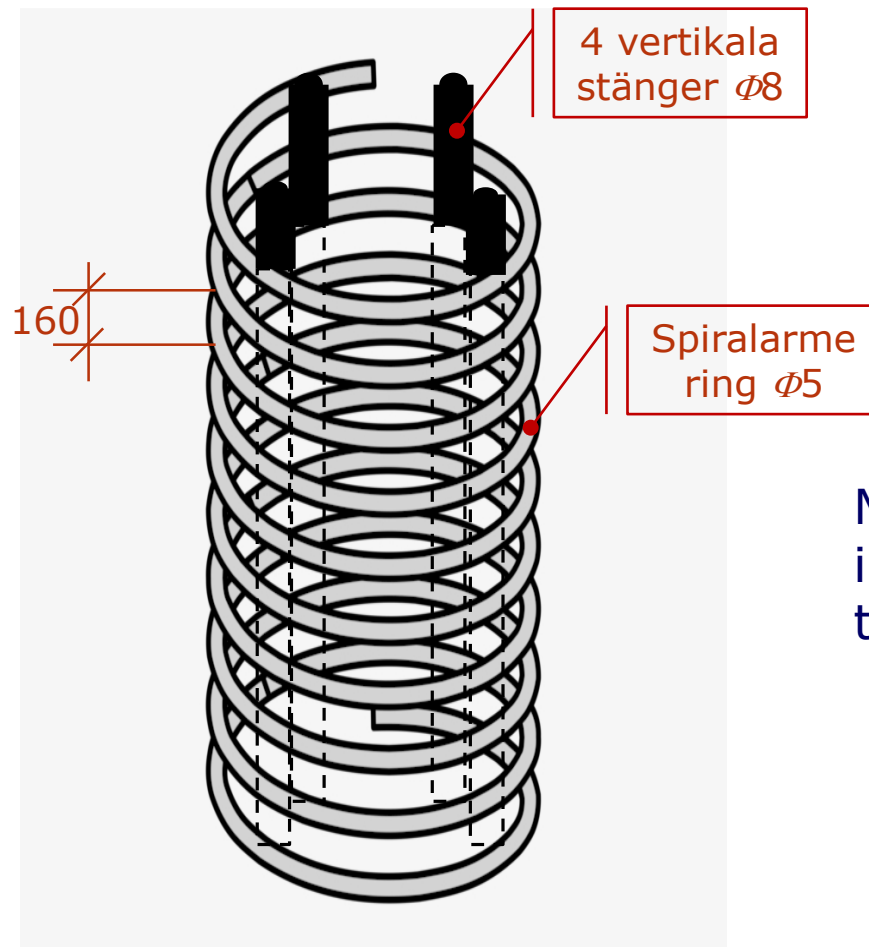
Provkroppar, pelare



Två homogena SKB och fyra 3DPC+SKB.

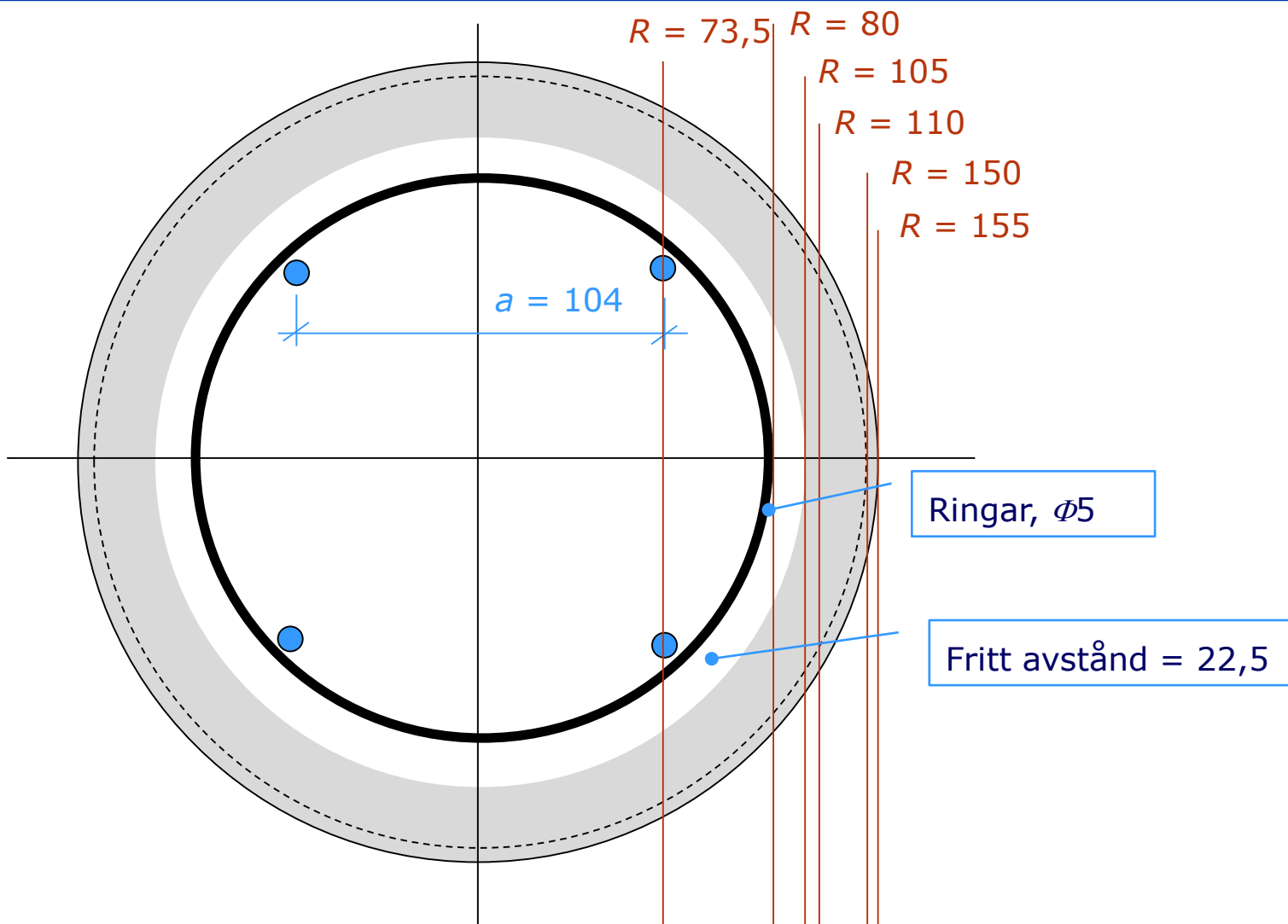


Pelare, armering

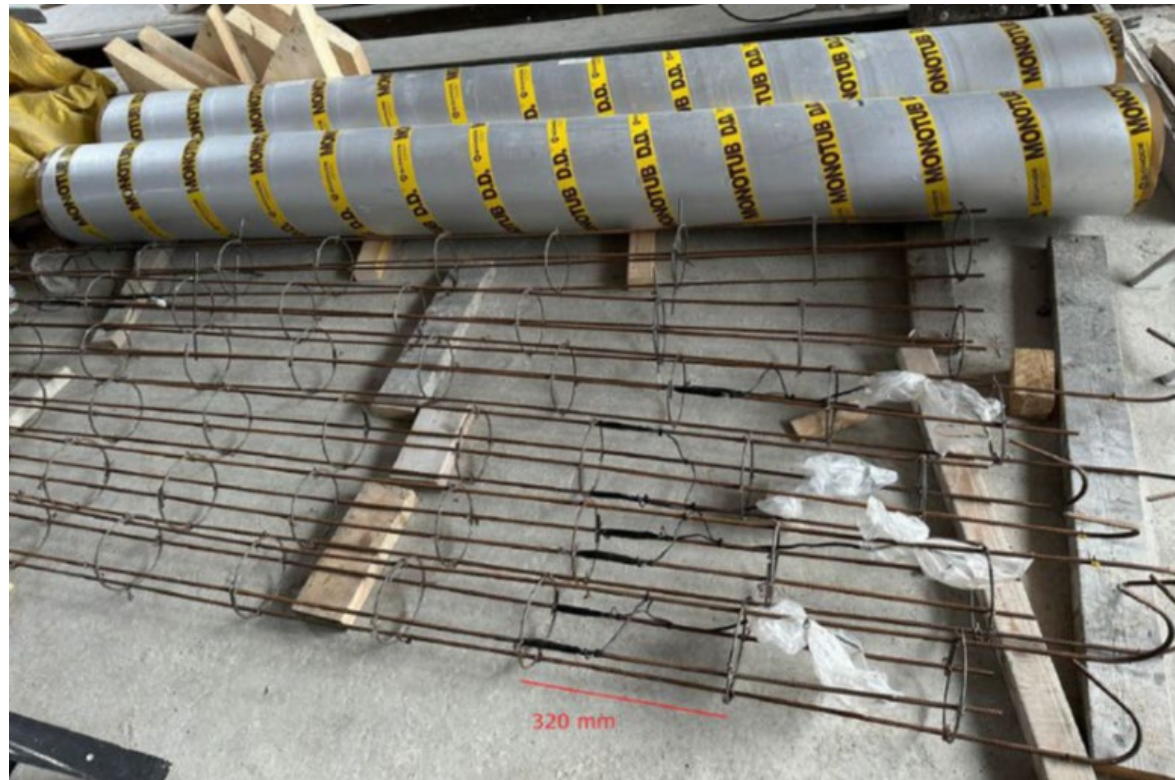


Men spiralarmering i denna dimension tillverkas längre...

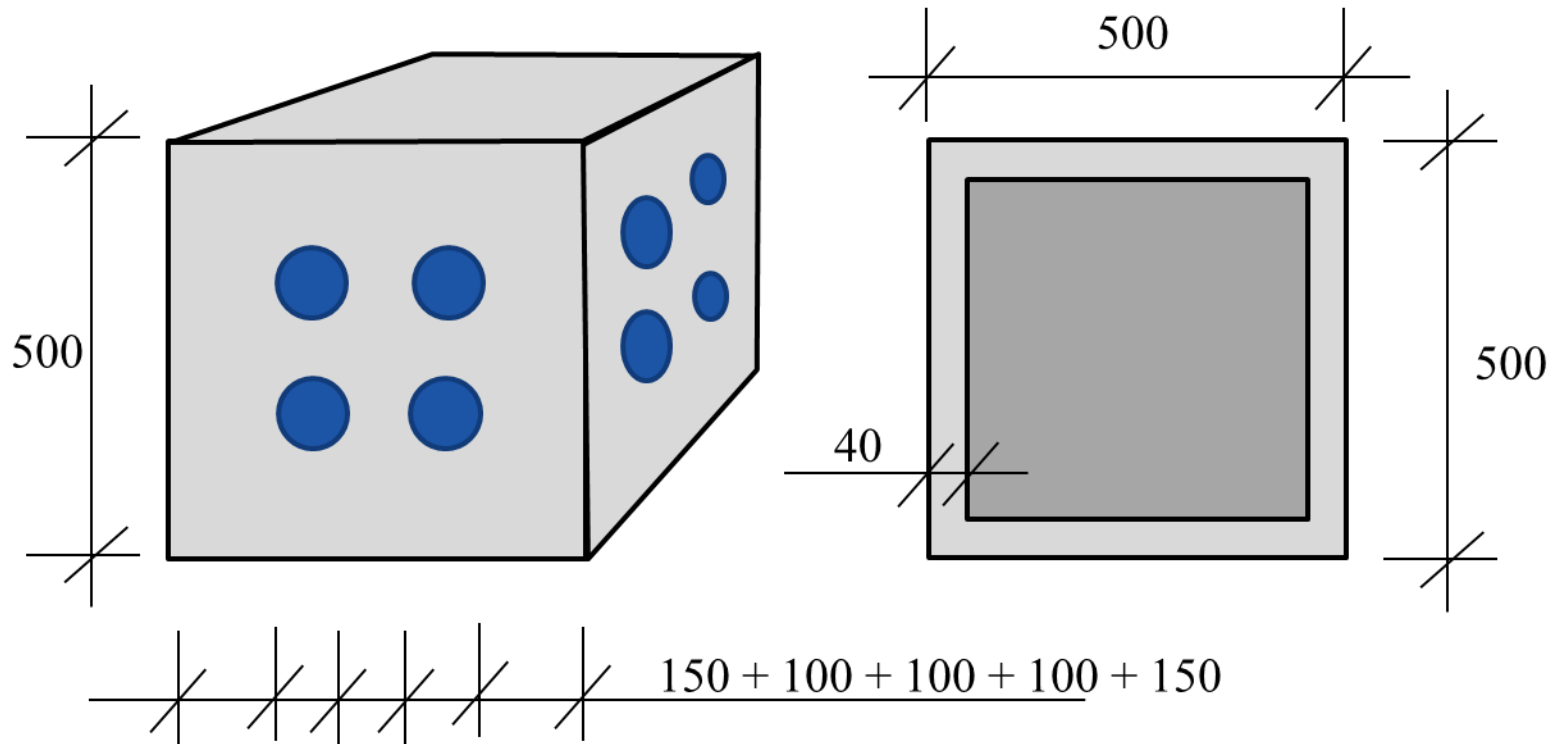
Pelare, armering



Armering & formar



Provkroppar, beständighet



Provkroppar



3D-utskrivna
betongformar

SKB i
pappform

Träform för
formtrycks-
mätning

Form för
beständighets-
provning



Betongrecept (kg/m³)

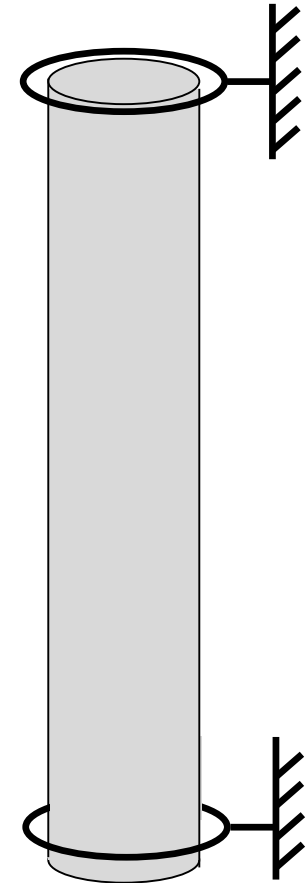
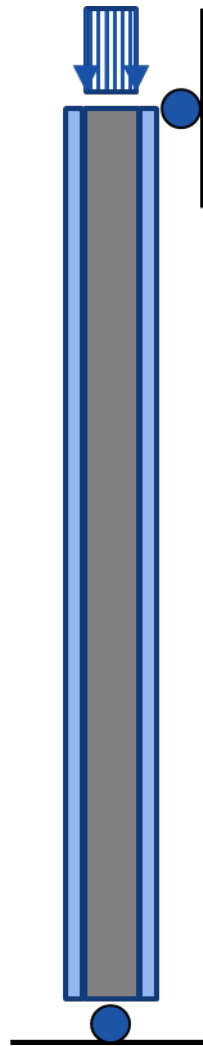
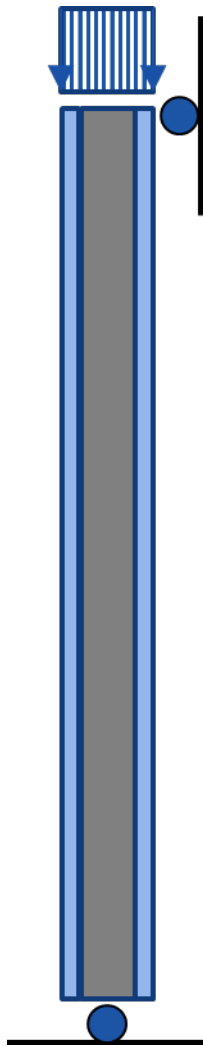
	3DP betong	SKB
Cement	625	325
Kalkstensfiller		83
Vatten	312	195
Grus (0-4 mm)	1350	
Grus (0-8 mm)		1032
Grus (8-16 mm)		685
Luftporbildare	1,25	
Flytmedel	X	4,45
Accelerator	X	
Andra kemikalier	X	
Summa	2288	2324
<i>vct</i>	<i>0,50</i>	<i>0,60</i>



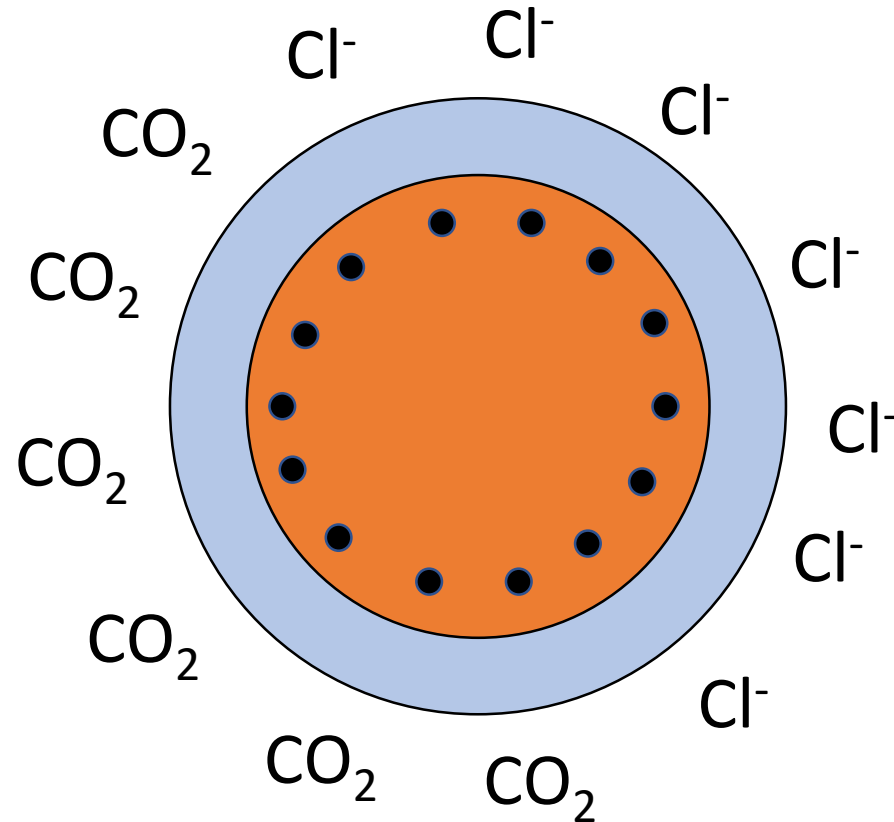
Pelarprovning

- Provningsen genomförs belastningsstyrt.
- Beräknad brottlast ligger på c:a 3000 kN.
- Lasten påförs i steg om 300 kN varvid lasten ökas var 5:e minut.
- Vid varje steg mäts och registreras last, deformation och töjning i armeringen samt noteras ev. sprickor, kross- eller andra skador på provkroppen.

Pelarsprovning, forts.



Kan "formen" vara en barriär?





Beständighetsprovning

Mekanism	Provkropp	Mått (mm)	Antal	Ålder (d)	Standard
Frost	Kärna	100 × 50	6	> 28	SS 137244:2019
Klorider (migration)	Kärna	100 × 50	4	> 28	NT Build 492
Karbonat- isering	Kärna	100 × 50	6	> 28	SS-EN 12390- 12:2004



Resultat



Hållfasthet & E-modul

	3DP betong		SKB	
	f_{cc} (MPa)	E_c (GPa)	f_{cc} (MPa)	E_c (GPa)
Vid 28 dygn	37,3 alt 49,3	32,2	36,7	31,8
Vid pelar- provning	56,3	(23,6)	43,8	



Brottlaster (hela tvärsnittet belastat)

Pelare nr	Typ	Diameter (mm)	Brottlast (kN)	
			Uppmätt	Beräknad
I	Samverkan	315	2240	3416
IV	Samverkan	309	2529	3280
VI	Homogen	301	2074	3113



Brottlaster (delar av tvärsnittet belastat)

Pelare nr	Typ	Diameter (mm)	Brottlast (kN)	
			Uppmätt	Beräknad
II	Samverkan	320	1410	3520
III	Samverkan	320	1411	3520
VI	Homogen	301	1370	3113



Två frågor

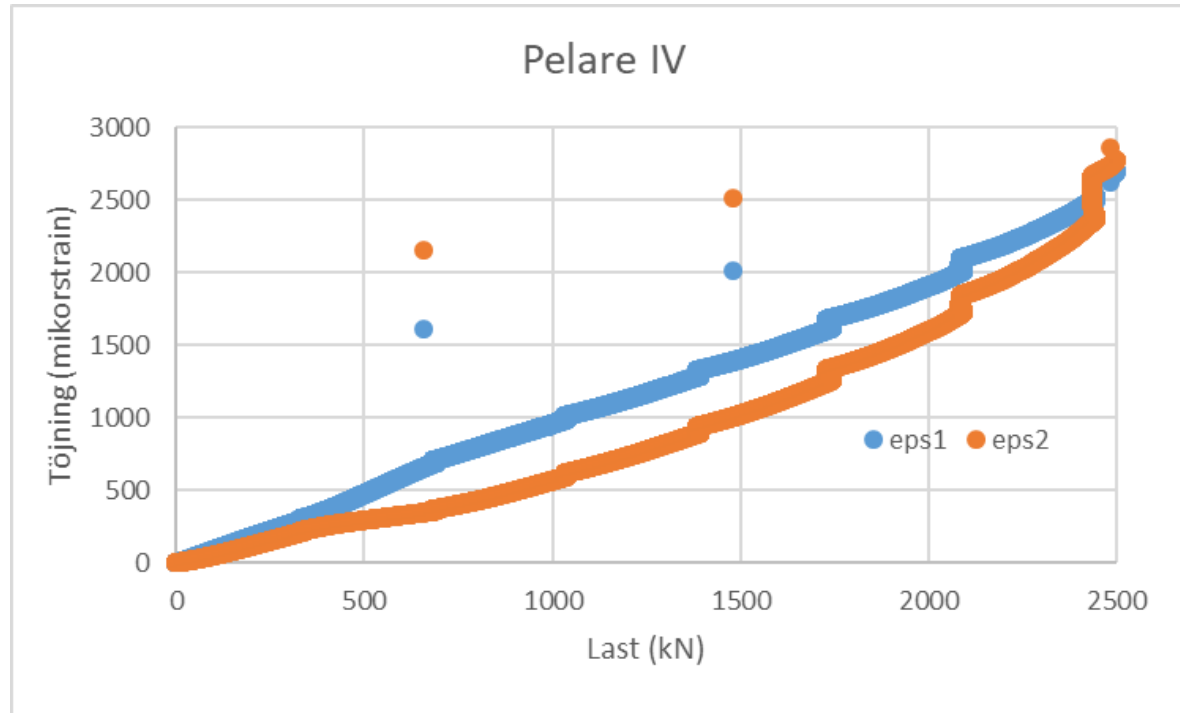
1. Varför nådde pelarna inte beräknade laster?
2. Varför var uppmätta brottlasten lägre ifall enbart en del av tvärsnittet belastades (jämfört med fallet då hela tvärsnittet belastades)?



Möjliga svar

- **Excentricitet.** 25 mm excentricitet ger 67 % större kantspänning.
- Gjutningen av SKB blev inte fullgod.

Mätning av töjning



Uppskattning av excentricitet

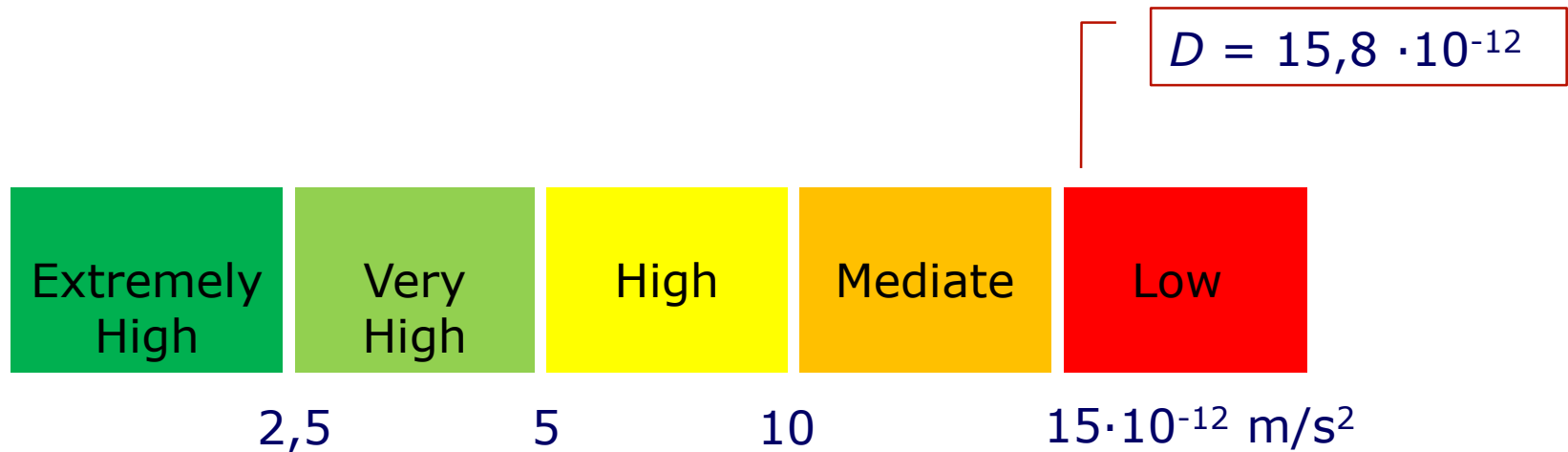
Pelare, nr	Uppskattad excentricitet e (mm) vid last =				
	400 kN	800 kN	1200 kN	1600 kN	2000 kN
I	-1,3	+6,2	+6,1	+5,7	+5,7
II	-8,9	-12,6	-10,4	-	-
III	-8,1	-1,9	-1,3	-	-
IV	+12,8	+23,1	+16,5	+11,2	+6,9
V	-21,8	-9,5	-9,0	-8,8	-10,7
VI	-0,1	+3,2	+4,0	-	-



Vidhäftning

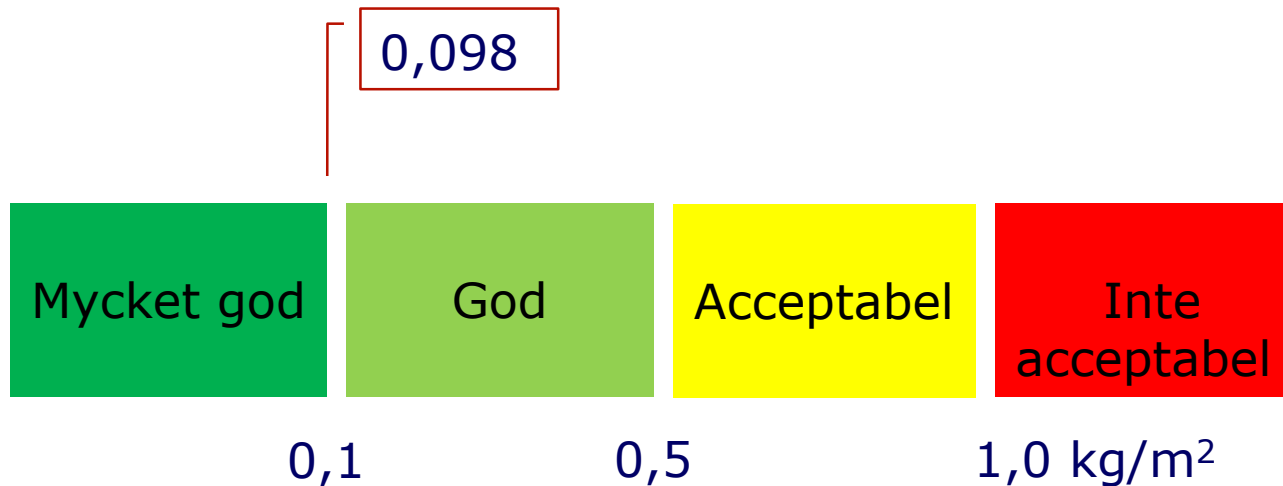
	Alla prov	Fogbrott ($\geq 50\%$)
Antal prov	12	5
Medelvärde (MPa)	1,75	1,54
Standardavv. (MPa)	0,45	0,49

Kloridmigration



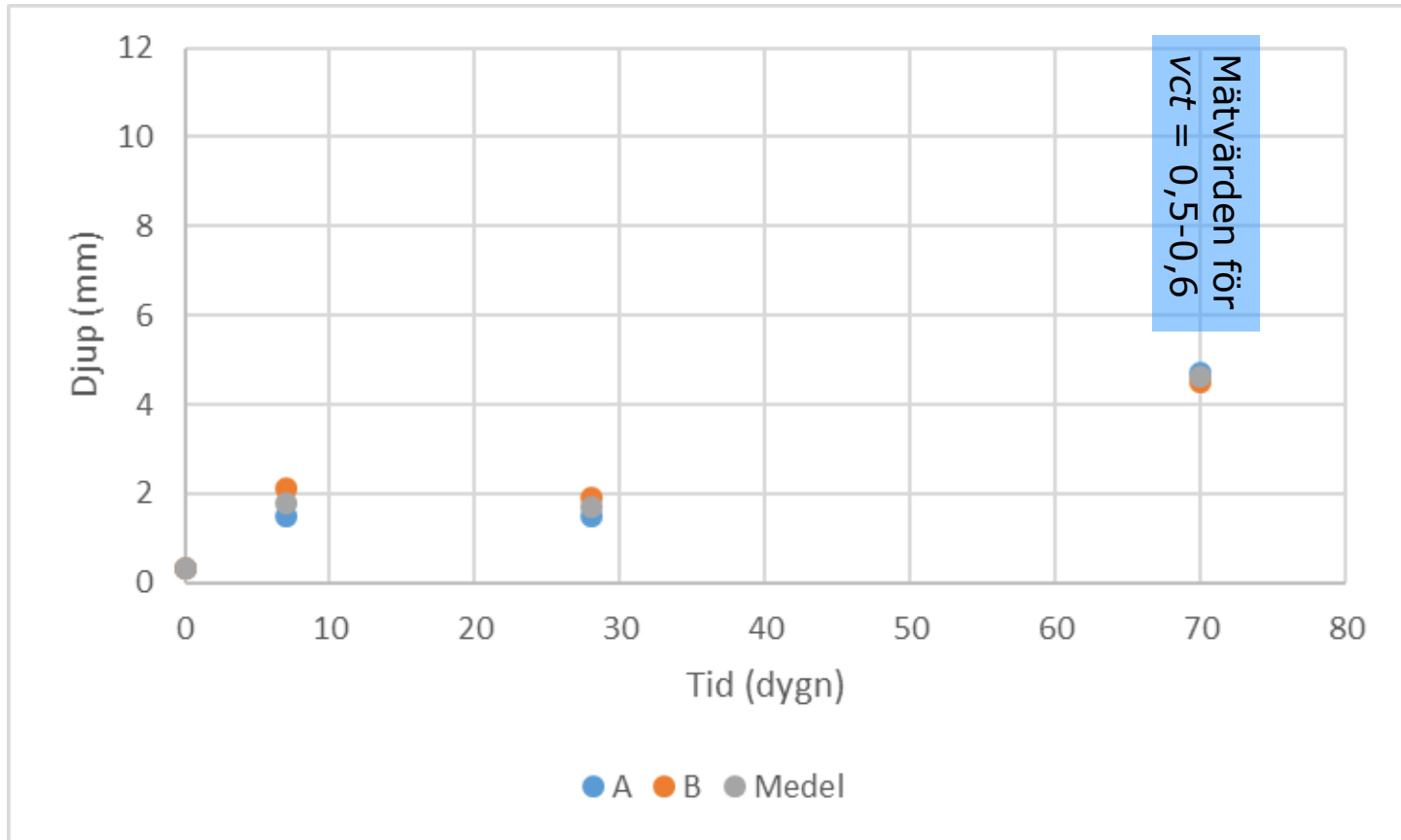
Nilsson m.fl. (1998)

Frostbeständighet



SS137274, efter 56 cykler

Karbonatisering



SS-EN 12390-12:2020



Slutsatser

Slutsatser

- Det är möjligt att producera samverkanspelare med kvarstannande 3D-utskrivna betong & SKB.
- Inget läckage & inga skador genom resp. på form.
- Samverkanspelarna jämförbara med motsvarande homogena pelare.
- Vidhäftningen > 1 MPa \rightarrow grund för monolitisk samverkan.
- Frostbeständigheten god, motståndet mot karbonatisering som för gjuten betong men motståndet mot klorider sämre.



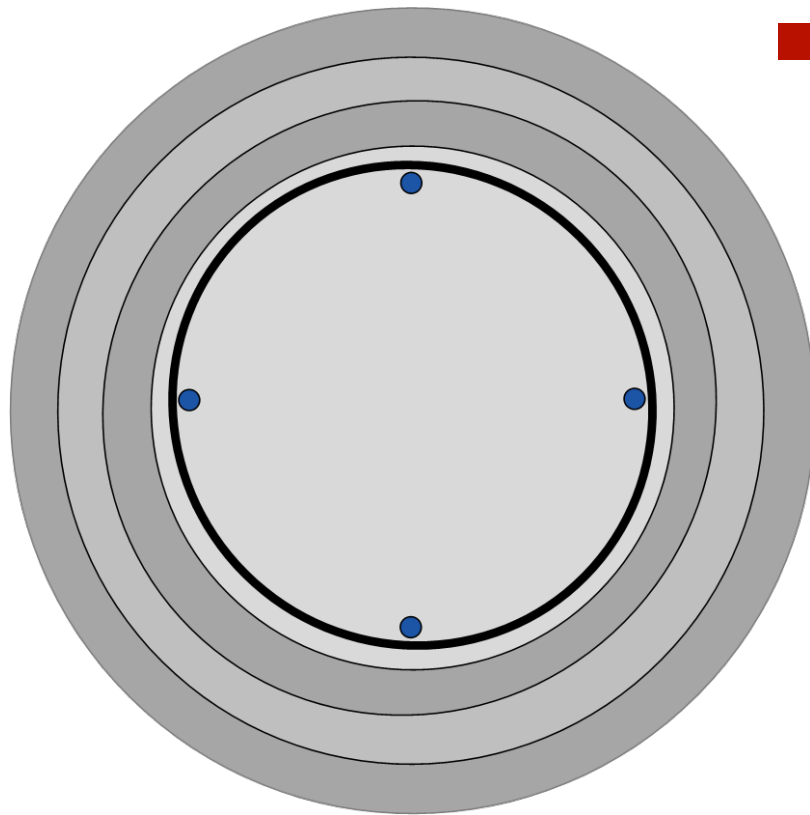
Fortsatt forskning

Fortsatt forskning 1 (2)

- Utredning om ökad stighastighet utan att skada 3D-utskrivna formen.
- Utveckling av åtgärder mot temperatursprickor i kritisk väderlek.
- Forskning för att klargöra orsaken till undertramp gällande pelarnas beräknade brottlast.
- Utveckling av metoder för att skapa ytor utan ränder.
- Fortsatt utveckling av 3D-skrivare som tillåter större d_{\max} och därmed mindre cementpasta.

Fortsatt forskning 2 (2)

- Utveckling av koncept med större motstånd mot kloridinträngning.
- En möjlighet: Dubbelform.



SKB, högt *vct*

SKB, lågt *vct*

3DP betong



Tack

- Ett varmt tack till Trafikverket & SBUF för ekonomiskt stöd samt Betongindustri, ConcretePrint, LTU och medlemmarna i referensgruppen för egeninsatser i projektet.



Publikationer

- Silfwerbrand J: "Samverkanspelare av 3D-utskrivna betong och SKB – Laboratorieförsök". Rapport, KTH, Betongbyggnad, 2024.
- Silfwerbrand J: "Composite concrete columns of 3DP concrete and self-compacting concrete subjected to normal force". Submitted to Digital Concrete, Munich, DE, Sept. 4-6, 2024.
- *Planerad 3: Artikel i Bygg & Teknik, betongnumret, hösten 2024.*
- *Planerad 4: Artikel i Concrete International (American Concrete Institute).*



Examensarbeten

- Bahdi, E., & Hassani, M., "Samverkande bropelare av kvarsittande 3D-utskrivna betongform & igjuten SKB". (Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Byggteknik och design.) Skolan för arkitektur och samhällsbyggnad, KTH, 2023.
- Al-Bazarkan, A., & Alahmad, H., "Loading Tests on Composite Concrete Columns – A comparison between composite columns made of permanent 3DPC formwork filled with SCC and columns made of homogenous SCC". Skolan för arkitektur och samhällsbyggnad, KTH, 2023.