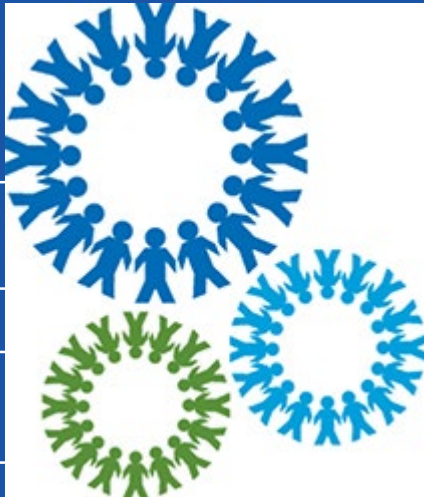




Centrum för byggeffektivitet –

Frukostmöte 9 mars 2022



Varmt välkommen!





Samverkanspelare av 3DP- betong & SKB

Johan Silfwerbrand
Byggvetenskap, KTH

CBE:s frukostseminarium
Sthlm, 9 mars 2022

Bropelare



Idén

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





Innehåll

- Syfte & avgränsningar
- Metodik
- Litteraturgenomgång
- Examensarbete vt 2021
- Examensarbete ht 2021
- Slutsatser
- Fortsatt forskning



Syfte & avgränsningar

- **Syfte:** Att studera förutsättningarna för att producera bropelare av SKB med kvarstående 3D-utskrivna betongform.
- **Avgränsningar:** Litteraturstudier och analys av två examensarbeten.

1. Litteraturstudie genom sökning i Google. Litteraturstudien koncentreras på tidigare försök med 3D-utskrivna pelare eller formar till pelare.
2. Enkla beräkningar av det formtryck som förväntas uppstå vid gjutning av SKB i kvarsittande pelarform.
3. Genomgång och analys av två examensarbeten som bedrivits i nära anslutning till detta pilotprojekt.



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).

Exempel 1



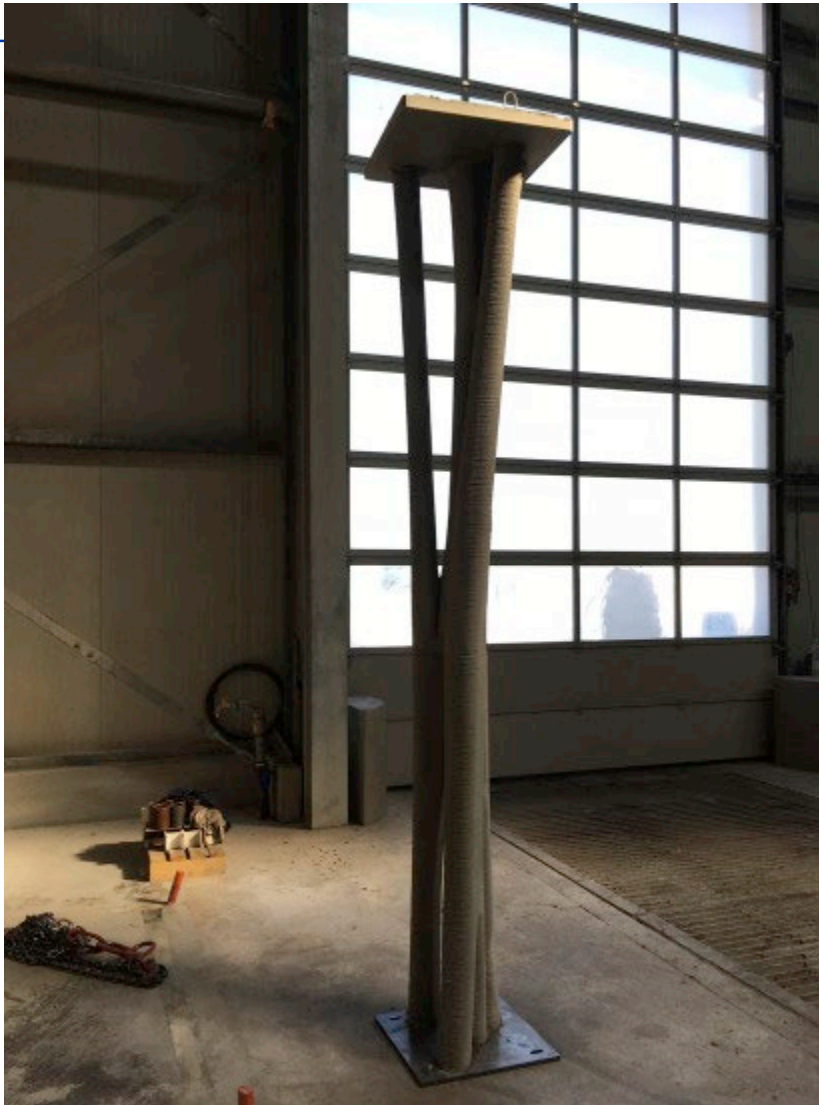
En fyra meter hög pelare tillhörande en sporthall för en skola i Aix-en-Provence, Frankrike (Gaudillière m.fl., 2019).

Exempel 2



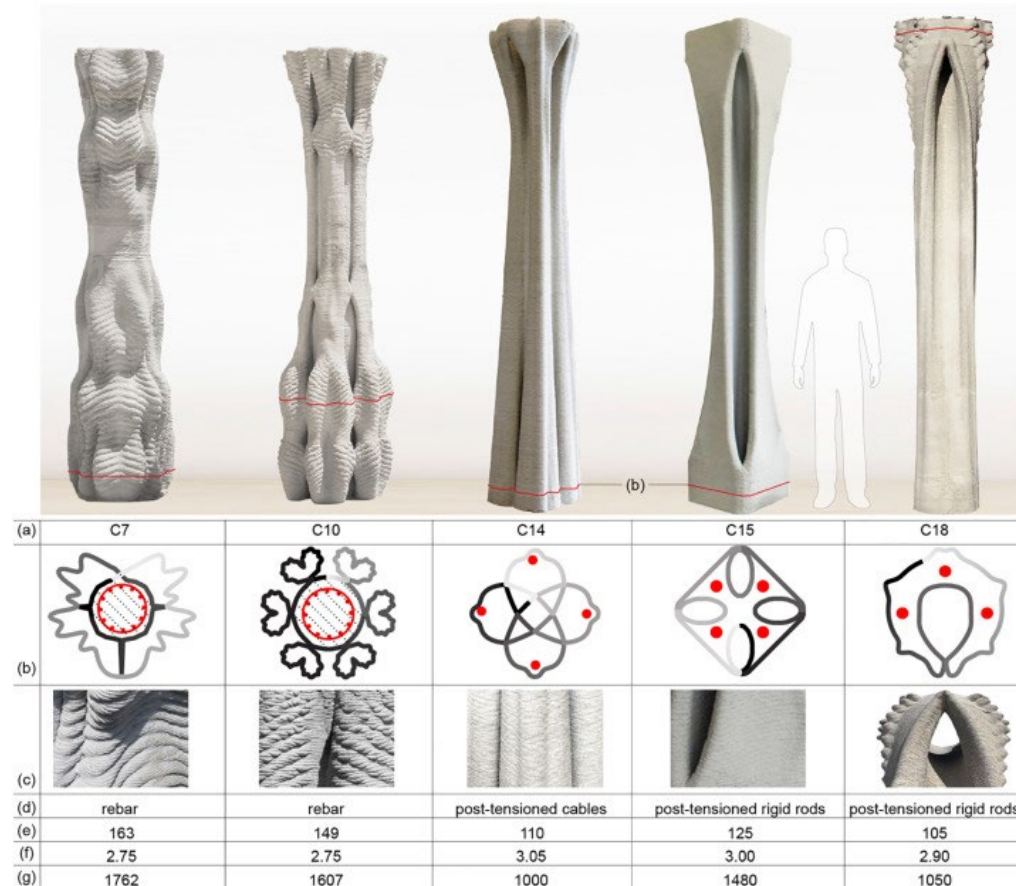
Doha Convention Center med fackverk med organisk form (Gaudillière m.fl., 2019).

Exempel 3



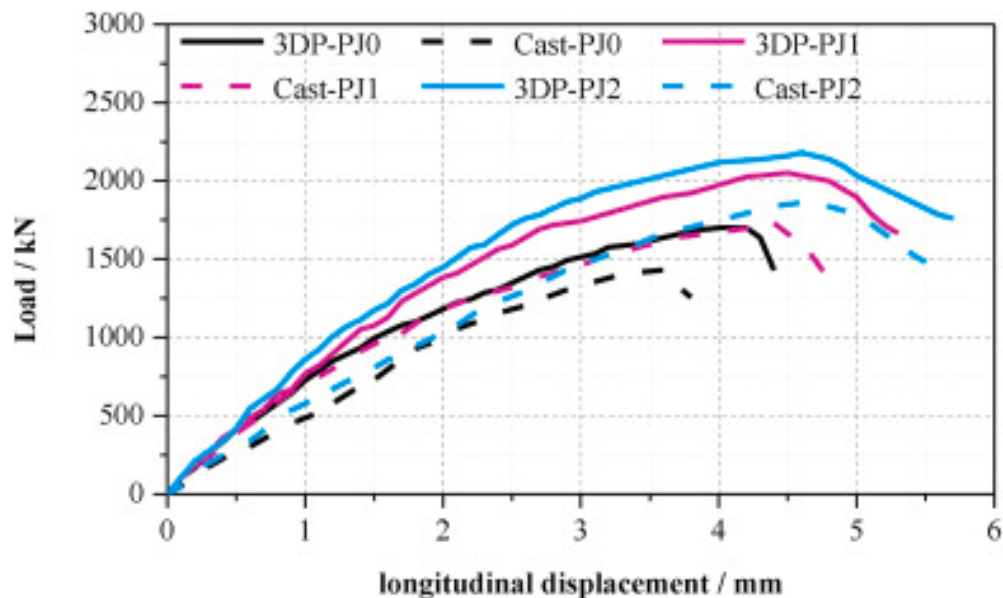
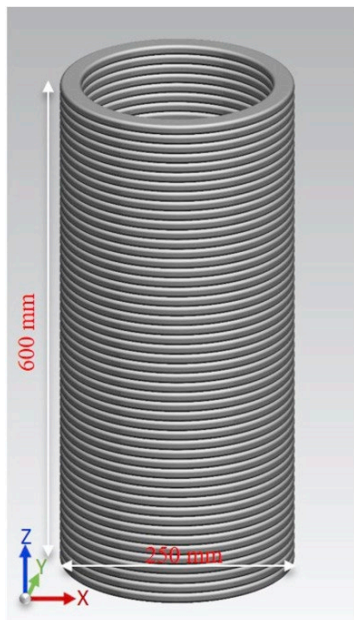
Pelare med
kvarsittande 3D-
utskriven betongform
fylld med ultrahög-
hållfastbetong för ett
YRES koncepthus
(Gaudillière m.fl.,
2019).

Exempel 4



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

Exempel 5



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.



Examensarbete vt 2021

- Sergi Boned Ferrer, hing-programmet, KTH.
- Samarbete med ConcretePrint & Betongindustri.
- Försök med 4 väggelement.
- Syfte: Undersöka om praktiskt möjligt samt vidhäftning mellan 3D-utskrivna betong & SKB resp. gjuten betong C40/50.

Provkroppar

- Försök med 4 väggelement
- $h = 1,08$ m, $L = 1,0$ m, $b = 0,5$ m, $t = 50$ mm.



Betongrecept

	3DP betong	SKB	Vibrerad betong C40/50
Cement (kg/m ³)	25	315	420
Kalkstensfiller (kg/m ³)		105	
Vatten (kg/m ³)	12,5	197	188
Grus 0-4 mm (kg/m ³)	59		
Grus 0-8 mm (%)		60	60
Grus 8-16 mm (%)		40	40
Flytmedel	X	X	X
Accelerator	X		
Andra kemikalier	X		
<i>Vct</i>	0,50	0,63	0,45

Anm. X markerar förekomst.



Dagbok

Steg nr	Beskrivning	Datum (alla gäller 2021)	Ålder på form (dygn)	Ålder på igjuten betong (dygn)
1	Utskrivning av samtliga fyra formar	11 maj	0	
2	Igjutning av de första två formarna, en med SKB, en med vibrerad betong	18 maj	7	0
3	Igjutning av de resterade två formarna, en med SKB, en med vibrerad betong	25 maj	14	0
4	Uttag av borrhärnor från de två äldsta formarna (från steg 1 & 2)	15 juni	35	28
5	Provning av uttagna kärnor	16 juni	36	29



Tryckhållfasthet

Betong	Φ (mm)	Kärnans orientering	Antal prov	<i>vct</i>	Tryckhållf, medel (MPa)
3DP betong	49	Vertikal	4	0,50	33,8
SKB	95	Horisontell	2	0,63	26,5
C40/50	95	Horisontell	2	0,45	44,6

Vidhäftning

- Värderna mellan 0,4 & 1,35 MPa
- Medel = 0,86 MPa
- Svårtolkat (olika typer av brott)
- Värdena inte mycket sämre än normalt (1 MPa eftersträvas ofta)





Examensarbete ht 2021

- I Shabo & J Hossein, hing-programmet, KTH.
- Samarbete med ConcretePrint, Betongindustri & LTU.
- Försök med 3 cylindriska pelare (3DPC + SKB).
- **Syfte:** Undersöka om praktiskt möjligt samt ifall formen klarar formtrycket för $h = 2,5$ m.

Provkroppar

- Tre cylindriska pelare
- $h = 2430$ mm, $\Phi = 500$ mm, $t = 50$ mm





Dagbok

Steg nr	Beskrivning	Datum	Ålder på form (dygn)	Ålder på igjuten betong (dygn)
1	Utskrivning av samtliga tre formar	5 nov. 2021	0	
2	Installation av formtrycksmätare	17 dec. 2021	42	
3	Igjutning av två formar med SKB	21 dec. 2021	46	0
4	Uttag av borrhärnor	18 jan. 2022	74	28
5	Provning av urtagna kärnor	?	?	?



Resultat, formtryck

Pelare	Nivå (m)	Hydrostatiskt tryck (kPa)	Uppmätt tryck (kPa)	Beräknad dragspänning (kPa)	Kommentar
A	2,28	54,7	50,8	292	Inga sprickor, inget läckage
B	2,28	54,7	49,6	292	

Andra iakttagelser

- Tredje formen (C) sprack tyvärr under utskrivningen.
- Vertikala sprickor observerades i både pelare A & B natten mellan den 21 & 22 december (1:a natten efter gjutning).
- Temperaturen var mycket låg (ned till $-15,8^{\circ}\text{C}$).
- Trolig orsak: Temperaturskillnad mellan inre varm och yttre kall del.
- Tryckprovning av borrhärnor ännu ej genomförd.

Slutsatser

- Lovande teknik.
- Att skriva ut upp till 2,5 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.



Ex. på TrV:s s.k. funktionskrav (& andra krav) för bro

- "Fri höjd över körbana samt fri öppning enligt ritning"
- "Vid betongutförande ska brädform användas på de synliga ytorna"
- "Kantbalk skall utföras enligt Bro 2004"
- "Mellanstöd skall utföras som cirkulära pelare"

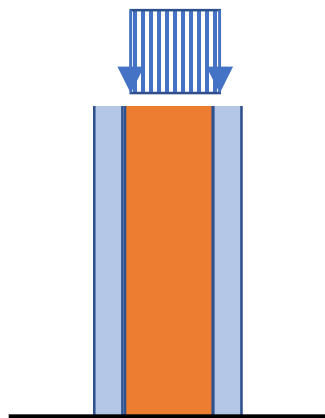
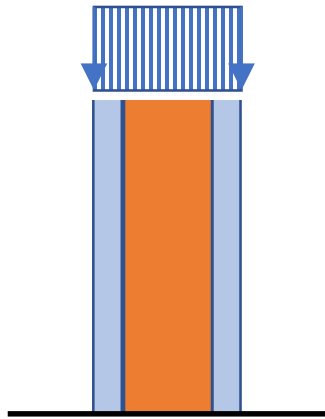
Bröchner J & Silfwerbrand J (2017): "Utveckling av funktionskrav för totalentreprenader". Rapport för Trafikverket. Chalmers & KTH, 53 s.

Fortsatt forskning

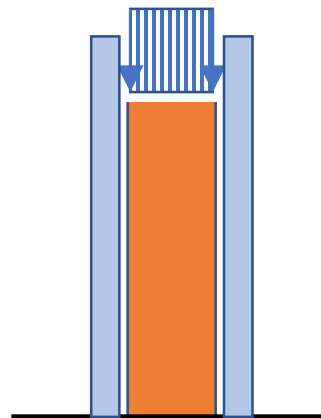
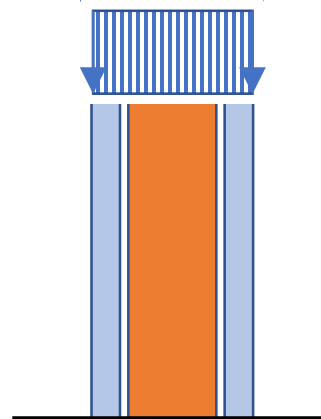
- Nya försök med (armerade) samverkanspelare, men fokus också på...
- ... **bärförmåga** (vidhäftning & hur belastningen påförs kan påverka)
- ... **beständighet** (kan "formen" utföras i tät betong och inre delen i enklare och ändå skydda armeringen under 120 år?)

Vidhäftning & bärförmåga

Vidhäftning

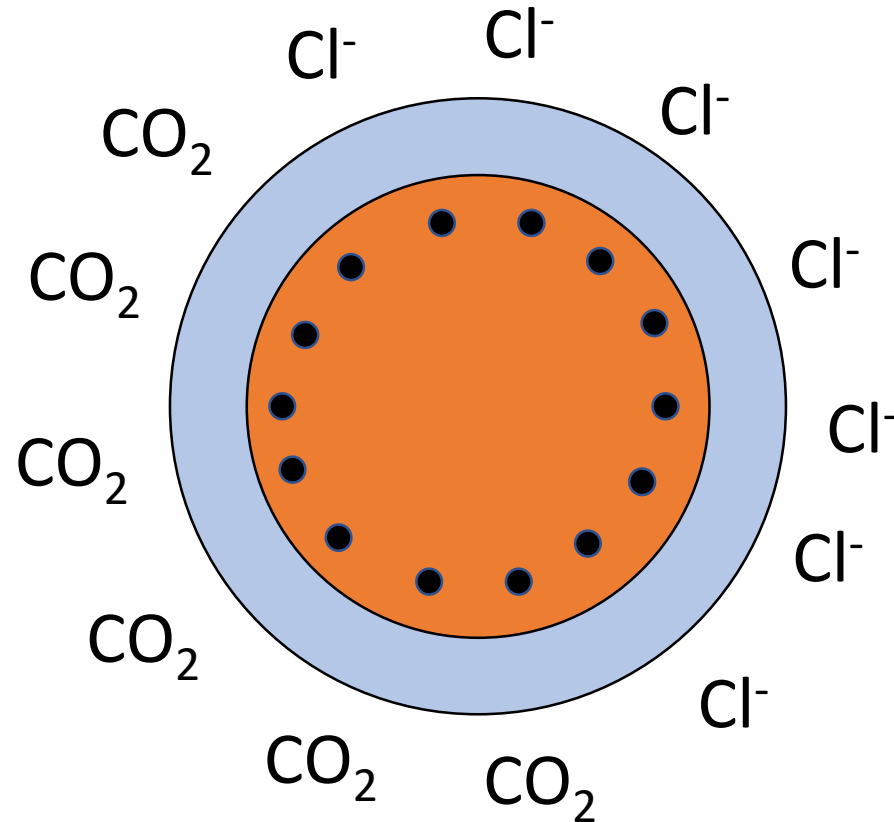


Ingen vidhäftning



Med vidhäftning →
hela tvärsnittet tar last

Kan "formen" vara en barriär?





Referenser

- Silfwerbrand, J., (2022): "Bropelare av SKB med kvarsittande 3D-utskrivna betongform" (preliminär rubrik). Rapport, avdelningen för betongbyggnad, institutionen för byggvetenskap, KTH, Stockholm.
- Silfwerbrand, J., (2022): "Composite Concrete Columns with 3DP Concrete Forms". Submitted to the fib Symposium in June 2022 in Oslo. 10 pp.
- Boned Ferrer S: "Performance of 3D printed concrete formworks for bridge pillars focusing on casting". Examensarbete på kandidatnivå i betongbyggnad. Avd. för betongbyggnad, inst. för byggvetenskap, skolan för arkitektur och samhällsbyggnad, KTH, Stockholm, 2021.
- Shabo I & Hossein J: "Försök med samverkande bropelare av 3D-utskrivna betong och SKB" (preliminär rubrik). Examensarbete på kandidatnivå i betongbyggnad. Avd. för betongbyggnad, inst. för byggvetenskap, skolan för arkitektur och samhällsbyggnad, KTH, Stockholm, 2021.
- Bröchner J & Silfwerbrand J (2017): "Utveckling av funktionskrav för totalentreprenader". Rapport för Trafikverket. Chalmers & KTH, 53 s.



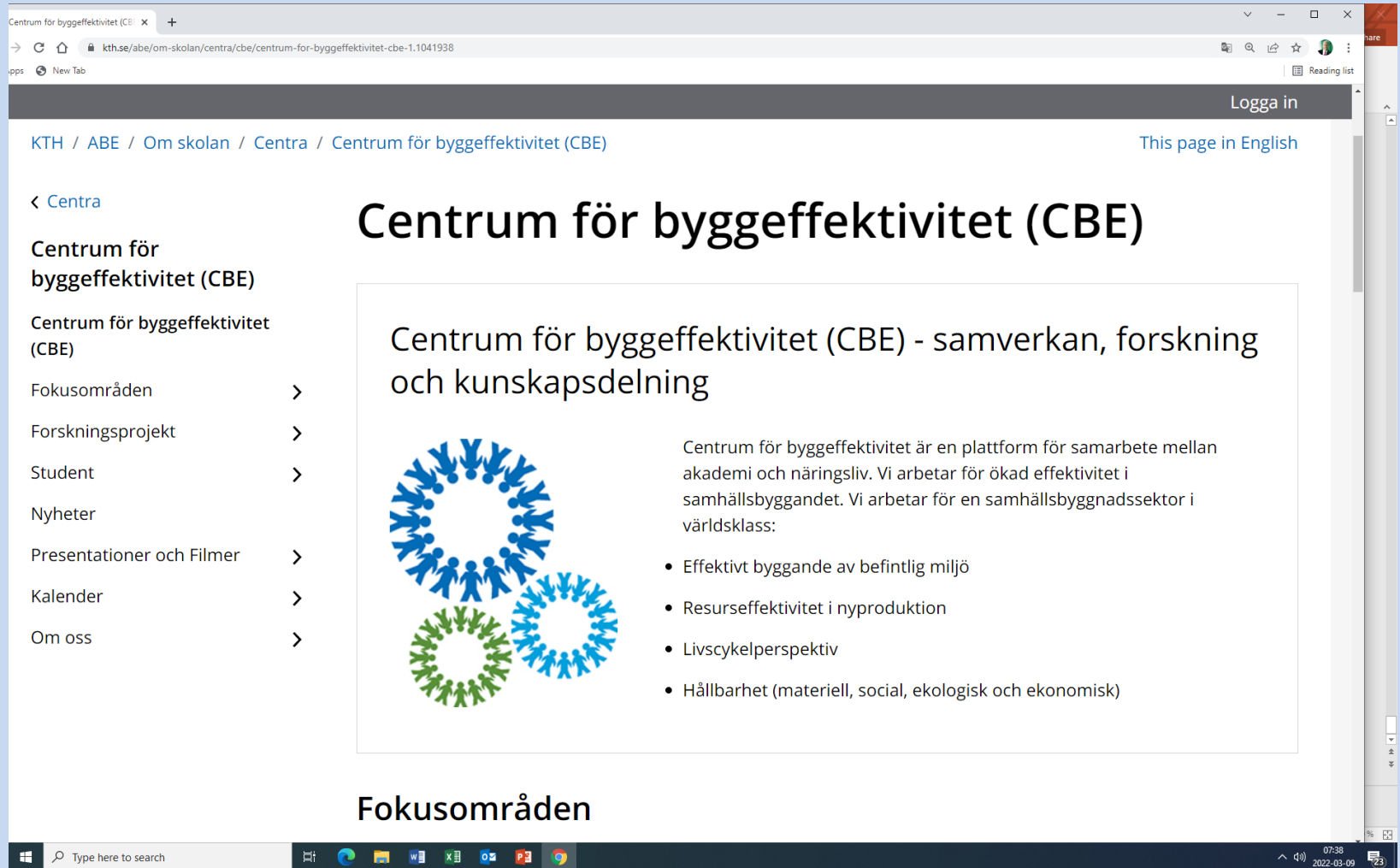
Tack

- Ett varmt tack till Formas för ekonomiskt stöd samt Betongindustri, ConcretePrint & LTU för egeninsatser i projektet.



Kommande aktiviteter i CBE

- **Torsdagen 23/3 kl 13:** Olli Wigren, KTH:
“Digitalization, sustainability, and ecosystems:
An application of social network analysis to the
real estate sector”. Disputation.
- **Onsdagen 6/4 kl 8-9:** Fredrik Johansson, KTH,
om Nätverket för byggautomation, etapp I.
Frukostseminarium.
- **Onsdagen 4/5 kl 8-9:** Jörgen Eklund, KTH, om
arbetsmiljö & BIM. Frukostseminarium.



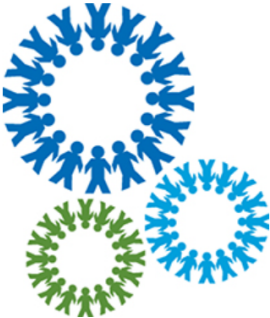
Centrum för byggeffektivitet (CBE)

KTH / ABE / Om skolan / Centra / Centrum för byggeffektivitet (CBE) This page in English

[Centra](#)

Centrum för byggeffektivitet (CBE)

Centrum för byggeffektivitet (CBE) - samverkan, forskning och kunskapsdelning



Centrum för byggeffektivitet är en plattform för samarbete mellan akademi och näringsliv. Vi arbetar för ökad effektivitet i samhällsbyggandet. Vi arbetar för en samhällsbyggnadssektor i världsklass:

- Effektivt byggande av befintlig miljö
- Resurseffektivitet i nyproduktion
- Livscykelperspektiv
- Hållbarhet (materiell, social, ekologisk och ekonomisk)

Fokusområden

<https://www.kth.se/abe/om-skolan/centra/cbe/centrum-for-byggeffektivitet-cbe-1.1041938>