



Ressourceeffektive anlægskonstruktioner

Dokumentation af anlægsbeton med tilslag af nedknust beton

9. december 2019



TEKNOLOGISK
INSTITUT



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**

Ressourceeffektive anlægskonstruktioner

Dokumentation af anlægskonstruktion med tilslag af nedknust beton

Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Gregersensvej 4
2630 Taastrup
Byggeri og Anlæg

Kvalitetssikring:

Sagsansvarlig: Martin Kaasgaard, tlf. 7220 2934, mkaa@teknologisk.dk
Godkendt af: Katja Udbye Christensen, tlf. 7220 2089, kudc@teknologisk.dk

9. december 2019

Resultater af Institutets opgaveløsning beskrevet i denne rapport, herunder fx vurderinger, analyser og udbedringsforslag, må kun anvendes eller gengives i sin helhed, og må alene anvendes i denne sag. Institutets navn eller logo eller medarbejdernes navn må ikke bruges i markedsføringsøjemed, medmindre der foreligger en forudgående, skriftlig tilladelse hertil fra Teknologisk Institut, Direktionssekretariatet.



Indhold

1.	Indledning	4
2.	Baggrund	4
3.	Nedknust beton	4
4.	Recepter og forsøgsprogram.....	6
5.	Resultater	7
5.1.	Beton med nedknust beton fra bjælker	7
5.2.	Beton med nedknust beton fra banebro	12
6.	Opsummering	15



1. Indledning

Denne rapport er udarbejdet af Teknologisk Institut som en del af resultatkontrakten "Ressourceeffektive anlægskonstruktioner" finansieret af Styrelsen for Institutioner og Uddannelsesstøtte.

2. Baggrund

Genanvendelse af nedknust beton som tilslag i beton til anlægskonstruktioner ses meget sjældent, fordi der stilles høje krav til kvaliteten af betonen, herunder delmaterialerne. Af denne årsag har det hidtil ikke været tilladt at anvende nedknust beton i anlægsbeton. I det nye danske tillæg (DS/EN 206 DK NA:2019) til den europæiske betonstandard er der imidlertid åbnet op for dette. Her tillades anvendelse af nedknust procestilslag (spildbeton fra egen produktion, der ikke har været anvendt i en konstruktion) til beton i tilsvarende eksponeringsklasser som det nedknuste procestilslag stammer fra. Der må anvendes op til 30% af det grove tilslag, hvis det dokumenteres at betonens E-modul, krybning og udtørringssvind er forsvarligt i relation til bæreevne og konstruktionssikkerhed. Der mangler dog publiceret dokumentation for at dette er muligt uden at kompromittere kvaliteten af betonen. Formålet med undersøgelserne beskrevet i nærværende rapport har således været at dokumentere betoner, hvor det grove tilslag er helt eller delvist erstattet af nedknust beton.

3. Nedknust beton

Der er testet to typer nedknust beton; henholdsvis en kendt beton af høj kvalitet (til ekstra aggressiv miljøpåvirkning) som stammer fra nogle større bjælker (anvendt til bøjningsforsøg) støbt på Teknologisk Institut i 2017 og beton fra en nedrevet banebro ved Randers bygget i 1939.

Bjælkerne med dimensioner 500x90x40 cm blev støbt af beton blandet på blandeanlægget på Teknologisk Institut. Betonen var en luftindblandet 2-pulver beton med Lavalkali cement og flyveaske, vand/cement forhold på 0,40 og groft granittilslag. Bjælkerne blev knust i en rotorknuser i 2018 og fraktioneret i fraktionerne 0/6 mm, 4/8 mm, 8/16 mm og 16/32 mm, hvoraf 4/8 mm og 8/16 mm fraktionerne er blevet anvendt til undersøgelserne beskrevet i nærværende rapport. Billeder af bjælkerne (efter bøjningsforsøg) og 8/16 mm fraktionen af den nedknuste beton fra bjælkerne fremgår af figur 1.



Figur 1. Bjælker (til venstre) og 8/16 mm fraktion af den nedknuste beton fra bjælker (til højre).

Den nedknuste beton fra banebroen ved Randers blev modtaget på Teknologisk Institut som en 0/64 mm fraktion, hvorfra der er sigtet en 4/22 mm fraktion som er anvendt til undersøgelserne. Billeder af banebroen og 4/22 mm fraktionen af den nedknuste beton fra banebroen fremgår af figur 2.



Figur 2. Banebro (til venstre) og 4/22 mm fraktion af den nedknuste beton fra banebro til (højre).

I betonlaboratoriet på Teknologisk Institut er der blevet bestemt densitet og absorption (iht. DS/EN 1097-6) af den nedknuste beton. Resultater (gennemsnit af dobbeltbestemmelse) fremgår af tabel 1.

Tabel 1. Resultater for bestemmelse af densitet og absorption af nedknust beton.

	Bjælker – 4/8 mm	Bjælker – 8/16 mm	Bro – 4/22 mm
Densitet VOT [kg/m ³]	2410	2430	2340
Absorption [%]	5,7	5,0	6,6



For den nedknuste beton fra banebroen er der desuden udført klassifikationsprøvning af bestanddele iht. DS/EN 933-11 med resultater i tabel 2.

Tabel 2. Klassificering af bestanddele i nedknust beton fra banebro.

	Rc [%]	Ru [%]	Rb [%]	Ra [%]	Rg [%]	X [%]	FL [cm ³ /kg]
Beskrivelse	beton	ubundne tilslag	mursten	asfalt	glas	andet	flydende partikler
Indhold	77	22	0,2	0	0	0	4,3
Kategori iht. DS/EN 12620	R_{C70} og R_{CU95}		R_{b10-}	R_{a1-}	$X_{Rg0,5-}$		FL_{5-}

4. Recepter og forsøgsprogram

Der er taget udgangspunkt i en beton som er næsten identisk med den beton der blev anvendt til støbning af bjælkerne. Recept for referencebetonen fremgår af tabel 3.

Tabel 3. Recept for referencebeton.

Delmateriale	Densitet	kg/m ³ VOT	liter/m ³
AaP Lavalkali cement CEM I 42,5 N - SR 5 (EA)	3200	340	106
Flyveaske	2300	85	37
Sand, kl. E, 0/2 mm	2630	617	235
Granit, kl. E, 4/8 mm	2670	348	130
Granit, kl. E, 8/16 mm	2690	775	288
Superplast	1050	2,8	2,7
Luftindblanding	1010	1,3	1,3
Vand	1000	150	150
Luft (5 %)			50
Total		2319	1000

Følgende betoner er blevet blandet:

- Referencebeton (ID REF)
- 30% erstatning af groft tilslag i REF med nedknust beton fra bjælker (ID Bjælke30)
- 60% erstatning af groft tilslag i REF med nedknust beton fra bjælker (ID Bjælke60)
- 100% erstatning af groft tilslag i REF med nedknust beton fra bjælker (ID Bjælke100)
- 30% erstatning af groft tilslag i REF med nedknust beton fra banebro (ID Bro30)
- 100% erstatning af groft tilslag i REF med nedknust beton fra banebro (ID Bro100)



Recepter for betoner med tilslag af nedknust beton fremgår af tabel 4. Pastasammensætning og -indhold er identisk for alle recepter.

Tabel 4. Recepter (kg/m³ VOT) for betoner med tilslag af nedknust beton.

Delmateriale	Bjælke30	Bjælke60	Bjælke100	Bro30	Bro100
Lavalkali cement	340	340	340	340	340
Flyveaske	85	85	85	85	85
Sand, 0/2 mm	617	617	617	617	617
Granit tilslag	786	450	0	786	0
Nedknust beton	304	606	1010	295	980
Superplast	3,0	3,0	2,8	3,0	2,8
Luftindblanding	1,2	1,0	0,8	1,0	0,8
Vand	150	150	150	150	150
Total	2286	2252	2206	2277	2176

Følgende egenskaber er blevet testet for betonerne:

- Sætmål (iht. DS/EN 12350-2) – 5 og 30 min
- Luftindhold (iht. DS/EN 12350-7) – 5 og 30 min
- Trykstyrke (iht. DS/EN 12390-3) – 2, 7 og 28 døgn
- E-modul (iht. DS 423.25) – 7 og 28 døgn
- Svind (iht. modificeret udgave af DS 434.6) – op til 90 døgn
- Luftporeanalyse (iht. DS/EN 480-11)
- Frostbestandighed (iht. DS/CEN/TS 12390-9)

Det skal bemærkes at det i forbindelse med blanding af alle betoner har været sikret at tilslag er mættet med vand, hvilket er specielt vigtigt ved anvendelse af tilslag af nedknust beton som har en forholdsvis høj absorption.

5. Resultater

Resultater præsenteres i de efterfølgende afsnit separat for beton med hver af de to typer nedknust beton sammenlignet med resultater for referencebetonen.

5.1. Beton med nedknust beton fra bjælker

De friske egenskaber af betonerne blev målt lige efter blanding (5 min) og 30 minutter efter blanding. Resultater for sætmål og luftindhold fremgår af henholdsvis tabel 5 og 6.



Tabel 5. Resultater for måling af sætmål.

	REF	Bjælke30	Bjælke60	Bjælke100
Sætmål, 5 min [mm]	120	150	160	150
Sætmål, 30 min [mm]	70	90	130	120

Tabel 6. Resultater for måling af luftindhold.

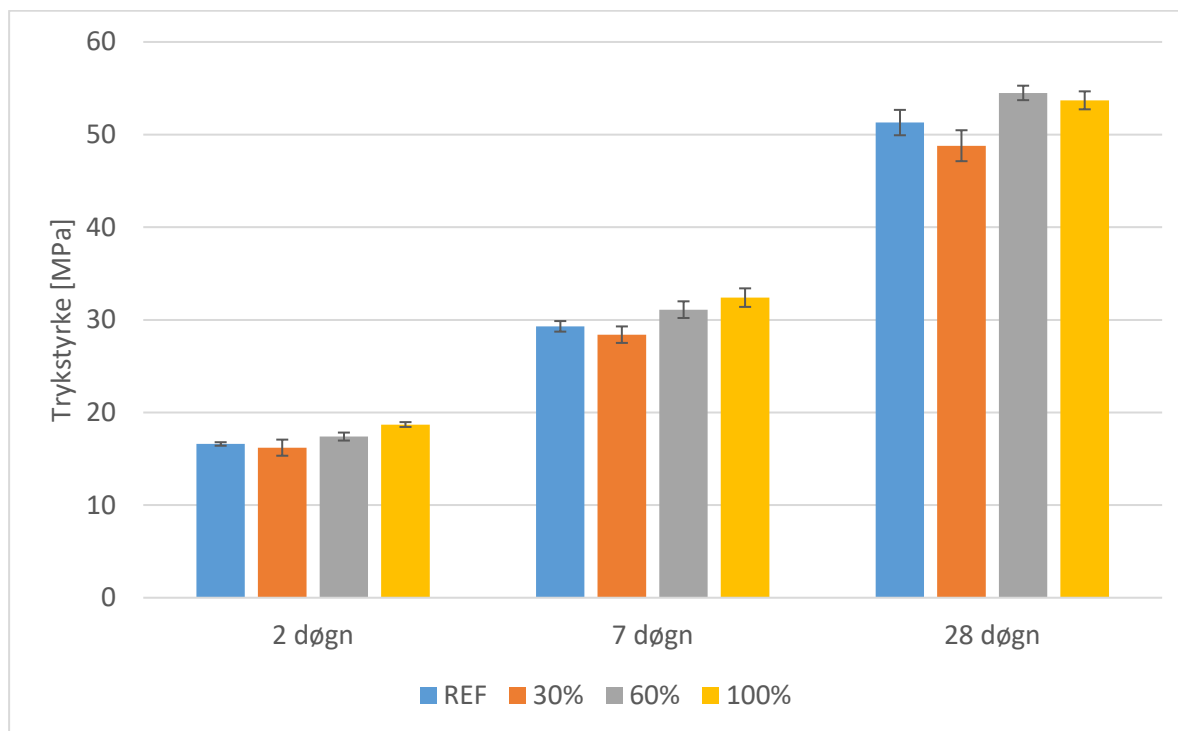
	REF	Bjælke30	Bjælke60	Bjælke100
Luft, 5 min [%]	6,2	7,4	6,9	7,3
Luft, 30 min [%]	4,8	5,6	5,5	5,5

Sætmålet er højere for betonerne med nedknust beton sammenlignet med referencen, dog skal det bemærkes at doseringen af superplast har været lidt højere for Bjælke30 og Bjælke60 som det fremgår af tabel 4. Resultaterne indikerer således, at erstatning af granittilslaget med den konkrete nedknuste beton giver et positivt bidrag til konsistensen. Dette kan skyldes en mere kubisk kornform og/eller bedre pakning af den nedknuste beton.

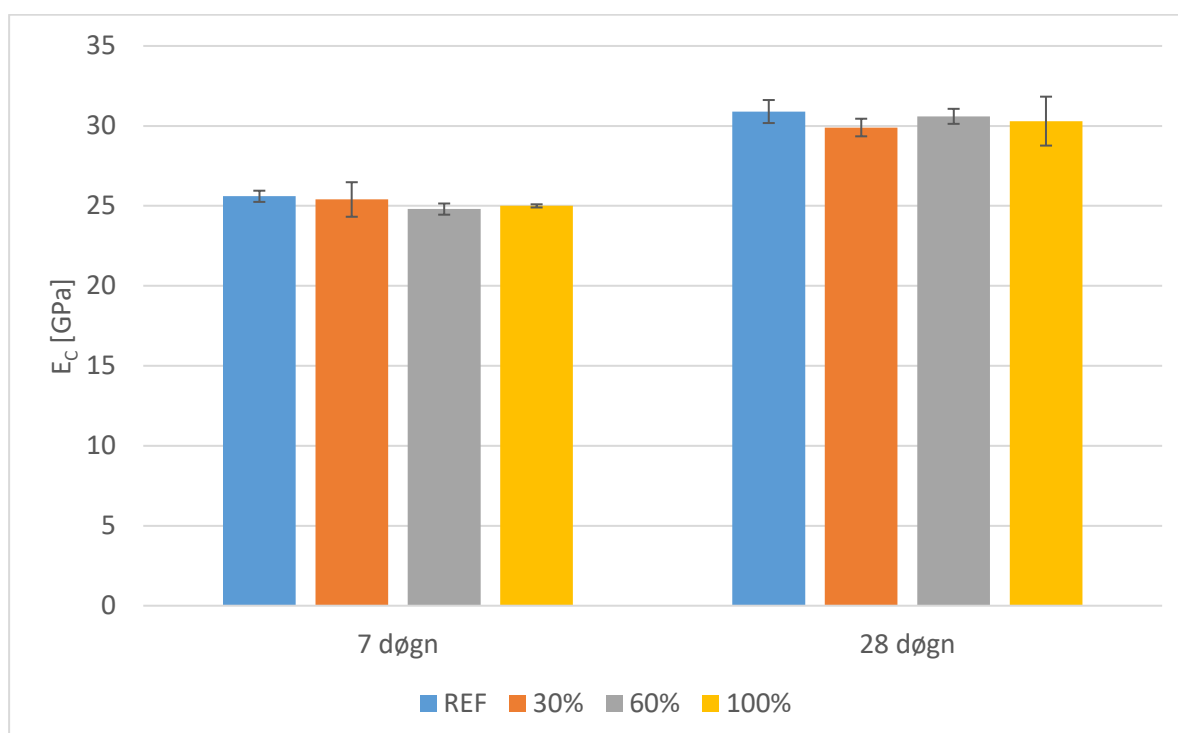
Luftindholdet er højere for betonerne med nedknust beton. Doseringen af luftindblandingsmiddel er reduceret gradvist ved forøgelse af erstatningsgrad som det fremgår af tabel 4. Erstatning af granittilslaget med denne nedknuste beton øger altså tilsyneladende luftindholdet, hvilket ikke umiddelbart kan forklares.

Resultaterne fra bestemmelse af trykstyrke (2, 7 og 28 døgn) og E-modul (7 og 28 døgn) fremgår af henholdsvis figur 3 og 4. Trykstyrke resultater er gennemsnit fra prøvning af 3 cylindre til 2 døgn og 5 cylindre til 7 og 28 døgn, mens E-modul resultater er gennemsnit fra prøvning af 3 cylindre.

Betonen med 30% erstatning har til alle terminer lidt lavere trykstyrke end referencen, mens betonerne med 60 og 100 % erstatning til alle terminer har en højere styrke. Til 2 og 7 døgn er der en tendens til at styrken stiger med erstatningsgraden. Der er således ingen bekymring i forhold til opfyldelse af krav til styrke ved erstatning af granittilslag med den konkrete nedknuste beton. Det samme kan siges om E-modul, hvor resultaterne er forholdsvis ens for alle betoner til begge terminer.



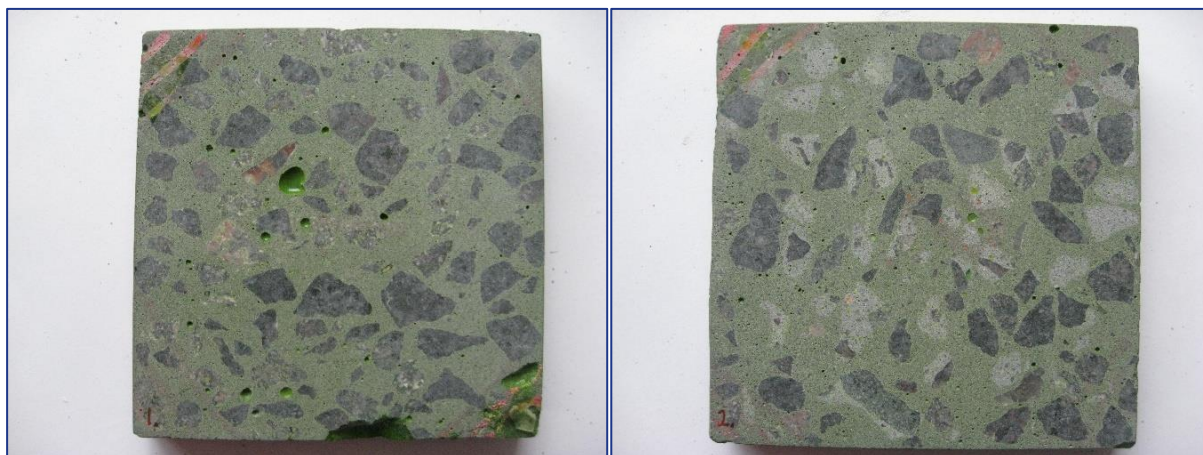
Figur 3. Trykstyrke resultater for betoner med nedknust beton fra bjælker og referencebeton.



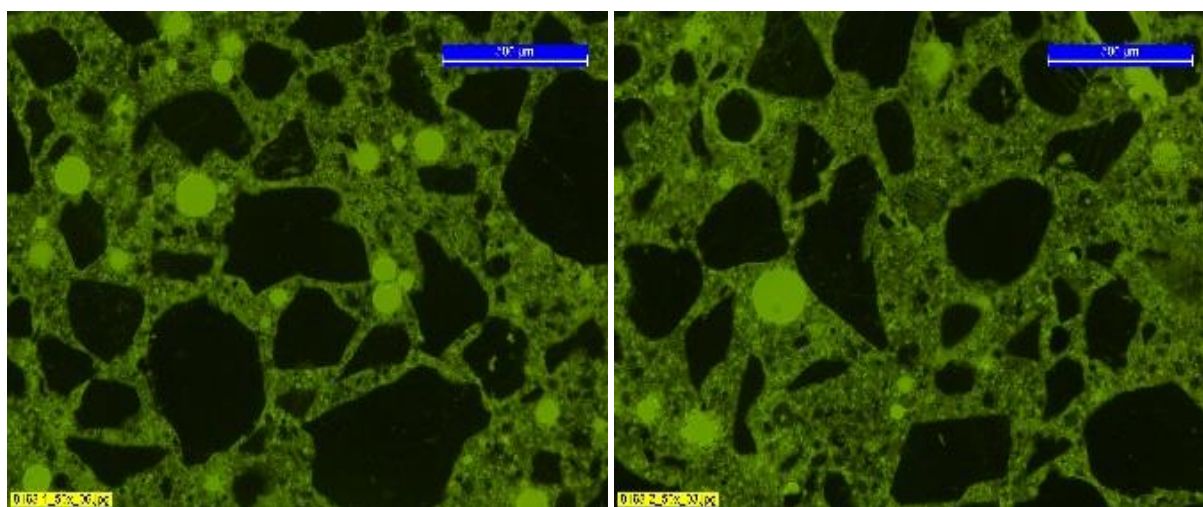
Figur 4. E-modul (E_c) resultater for betoner med nedknust beton fra bjælker og referencebeton.



De højere styrker for betoner med 60 og 100 % erstatning kunne teoretisk set skyldes et lavere V/C forhold som resultat af at den nedknuste beton skulle have absorberet mere vand end den absorption, som blev bestemt ved prøvning. Dette ville dog sandsynligvis også resultere i et konsistenstab i forhold til referencen, hvilket ikke var tilfældet (se tabel 5). For at undersøge dette er der for referencbetonen og betonen med 60 % erstatning (som har den højeste styrke ved 28 døgn) fremstillet et fluorescensimprægneret planslib (se figur 5) og tyndslib. Tyndslib fremstår med nogenlunde samme lysintensitet under UV-lys (se figur 6), hvilket indikerer samme kapillarporøsitet og dermed samme V/C forhold. Den petrografiske analyse af betonen med 60 % erstatning viser desuden, at pastaen i den nedknuste beton har en lavere kapillarporøsitet end pastaen i den nye beton og der er god vedhæftning mellem den nedknuste beton og pastaen. Der er ingen tegn på at den nedknuste beton har suget vand fra pastaen.



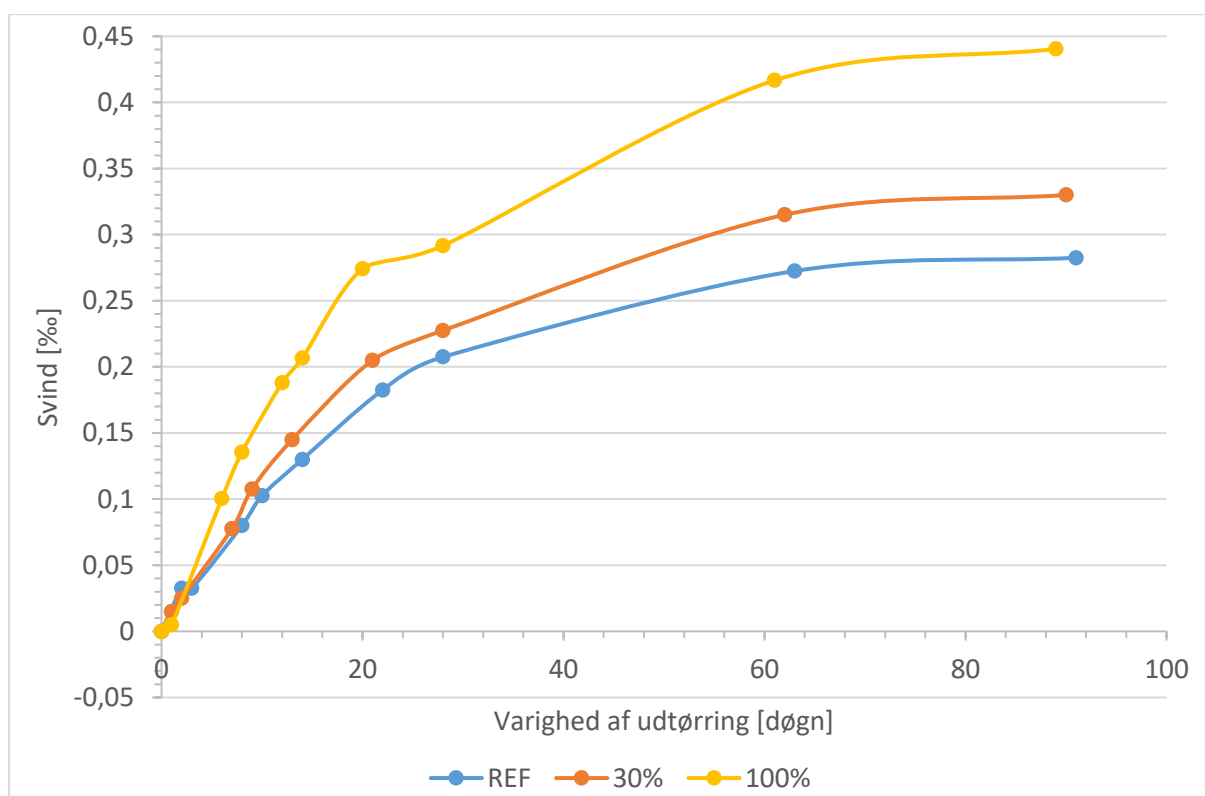
Figur 5. Fluorescensimprægneret planslib af REF (til venstre) og Bjælke60 (til højre).



Figur 6. Tyndslib af REF (til venstre) og Bjælke60 (til højre) i 50x forstørrelse under UV-lys.



Svind er målt for referencebetonen og betonerne med 30 og 100 % erstatning. Der er anvendt en modificeret version af DS 434.6, hvor der er støbt bjælker (10x10x40 cm) med måletapper i enderne. Bjælkerne er blevet afformet 24 timer efter støbning og den første måling er udført umiddelbart herefter. Derefter er de blevet placeret i et klimakammer ved 20°C og 50% relativ fugtighed. Der er efterfølgende udført målinger løbende op til omkring 90 døgn. Resultater fremgår af figur 7, hvor det ses at svindet stiger med erstatningsgrad.



Figur 7. Svind for betoner med nedknust beton fra bjælker og referencebeton.

Der er udført luftporeanalyse og test af frostbestandighed for betonen med 100 % erstatning, som repræsenterer et worst-case scenarie (størst erstatningsgrad). Det vil sige, at hvis den giver tilfredsstillende resultater, så må det antages, at det også vil være tilfældet for de andre betoner. Resultater fremgår af tabel 7 og 8, hvor det ses at luftporestrukturen er tilfredsstillende (afstandsfaktor mindre end 0,20 mm), mens frostbestandighed kan karakteriseres som værende "meget god" iht. SS 137244 (afskalning efter 56 cykler mindre end 0,10 kg/m²).

Tabel 7. Resultater fra luftporeanalyse.

	Bjælke100
Luftindhold	5,9 %
Specifik overflade	34 mm ⁻¹
Afstandsfaktor	0,13 mm



Tabel 8. Resultater fra test af frostbestandighed. Afskalning (kg/m²) efter hhv. 14, 28, 56 og 112 cykler.

	m14	m28	m56	m112	m56/m28	m112/m56
Bjælke100	0,03	0,04	0,06	0,17	1,8	2,7

5.2. Beton med nedknust beton fra banebro

De friske egenskaber af betonerne blev målt lige efter blanding (5 min) og 30 minutter efter blanding. Resultater for sætmål og luftindhold fremgår af henholdsvis tabel 9 og 10.

Tabel 9. Resultater for måling af sætmål.

	REF	Bro30	Bro100
Sætmål, 5 min [mm]	120	150	120
Sætmål, 30 min [mm]	70	100	70

Tabel 10. Resultater for måling af luftindhold.

	REF	Bro30	Bro100
Luft, 5 min [%]	6,2	5,9	7,2
Luft, 30 min [%]	4,8	4,8	5,0

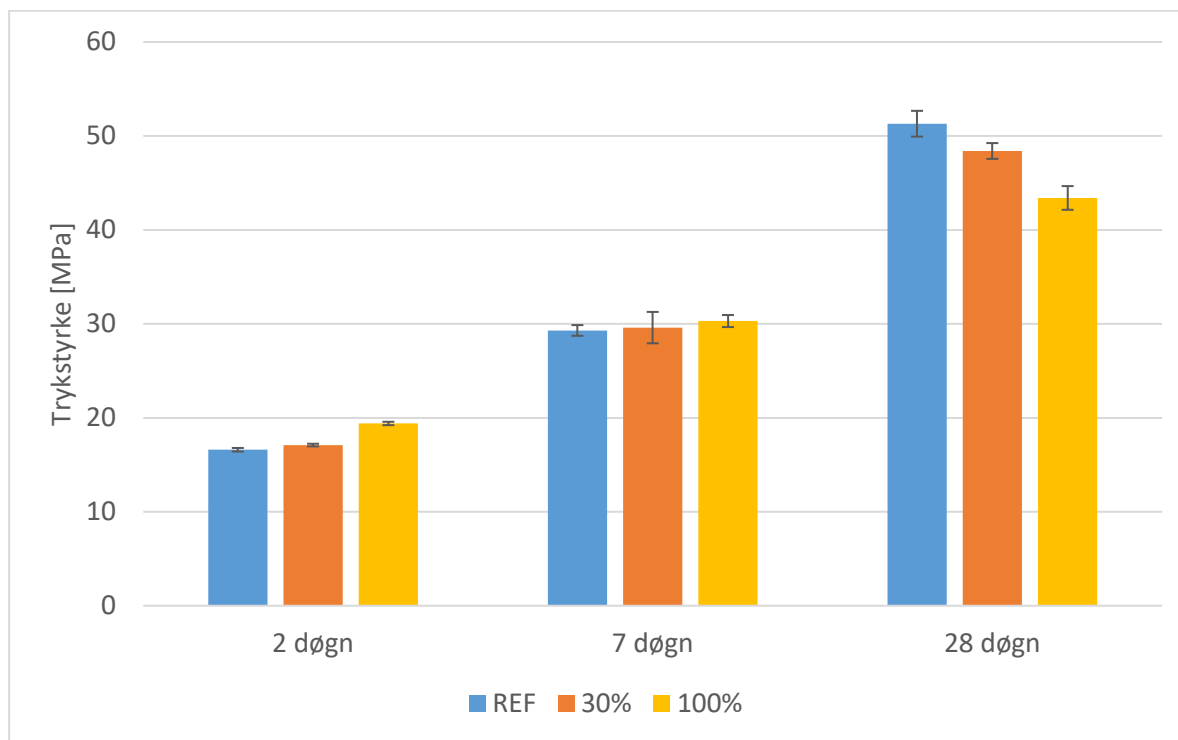
Sætmålet er ens for referencebetonen og Bro100. For Bro30 er sætmålet lidt højere, men doseringen af superplast har også været lidt højere som det fremgår af tabel 4. Umiddelbart er der altså ikke noget der tyder på, at det påvirker konsistensen væsentligt at erstatte granittilslaget med den konkrete nedknuste beton.

Luftindholdet er forholdsvis ens i referencebetonen og Bro30, mens det er højere i Bro100 på trods af, at doseringen af luftindblandingsmiddel er reduceret som det fremgår af tabel 4. Samme tendens blev observeret for betonerne med nedknust beton fra bjælker som beskrevet tidligere.

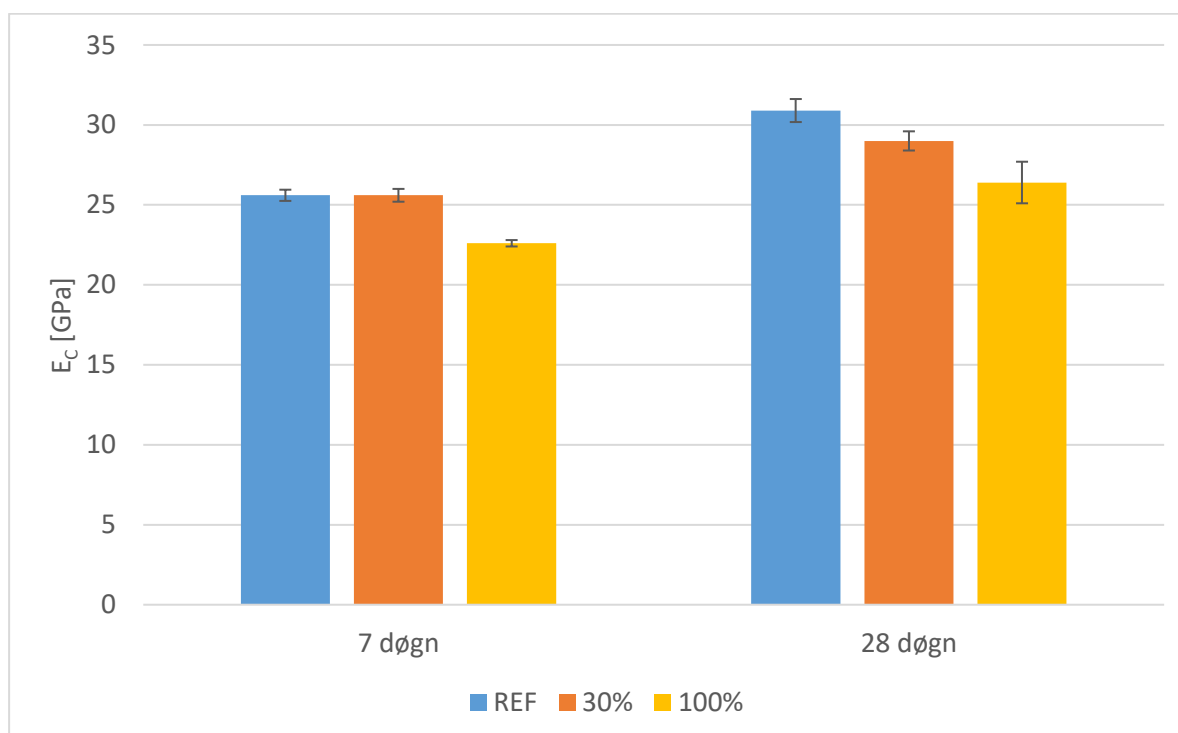
Resultaterne fra bestemmelse af trykstyrke (2, 7 og 28 døgn) og E-modul (7 og 28 døgn) fremgår af henholdsvis figur 8 og 9. Trykstyrke resultater er gennemsnit fra prøvning af 2 cylindre til 2 døgn og 5 cylindre til 7 og 28 døgn, mens E-modul resultater er gennemsnit fra prøvning af 3 cylindre.

Betonen med 30 % erstatning har til 2 og 7 døgn samme trykstyrke som referencen, mens den efter 28 døgn er lavere. Betonens med 100 % erstatning går fra at have højere styrke til samme niveau til markant lavere styrke til henholdsvis 2, 7 og 28 døgn. Til 28 døgn falder styrken med stigende erstatningsgrad. Forklaringen på dette er sandsynligvis, at til de tidlige terminer er det pastaen der bestemmer styrken og jo ældre betonen bliver jo mere er det tilslagene og pastaens vedhæftning til disse der bestemmer styrken. Således er styrke/hårdhed af tilslagene af nedknust beton fra banebroen lavere end for granittilslagene (og tilslagene af nedknust beton fra bjælkerne). Se yderligere forklaring sidst i dette afsnit.

For E-modul ses til 7 døgn at betonen med 30 % erstatning er på niveau med referencen mens betonen med 100% erstatning er lavere. Til 28 døgn falder E-modulet med stigende erstatningsgrad som det var tilfældet for styrken.



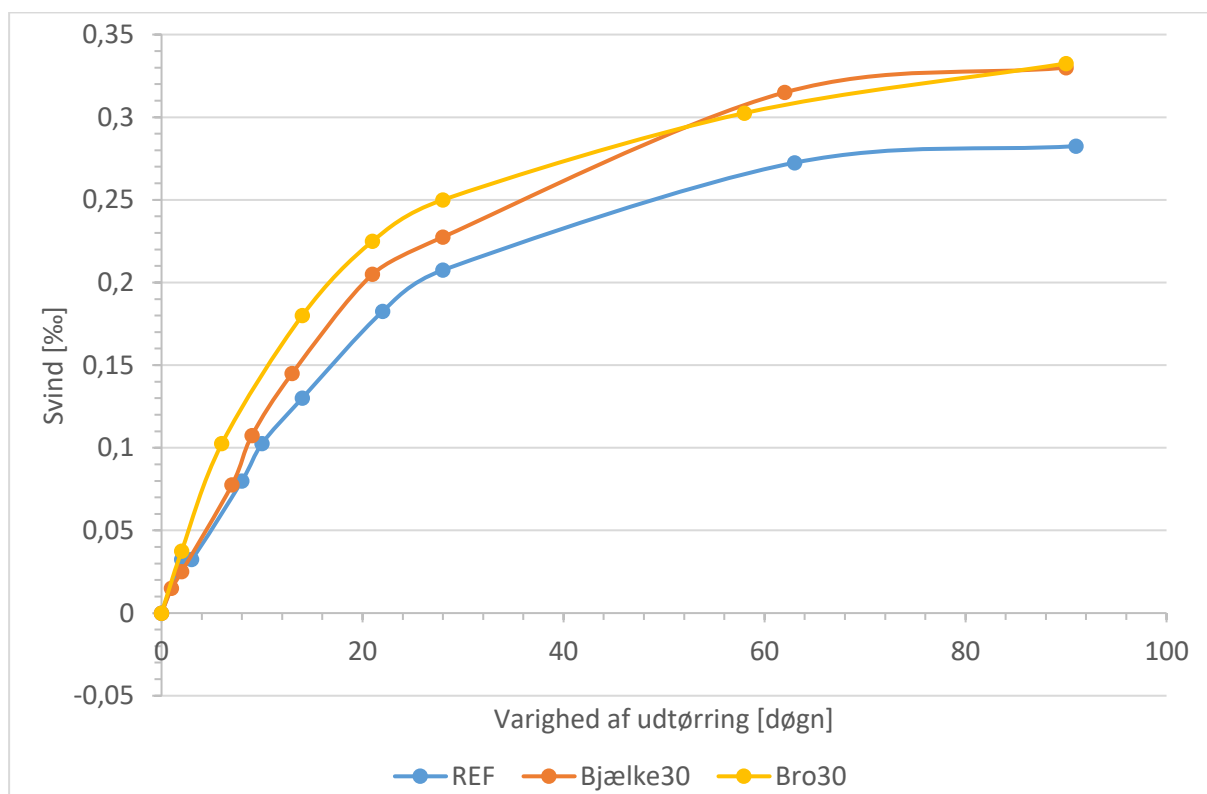
Figur 8. Trykstyrke resultater for betoner med nedknust beton fra banebro og referencebeton.



Figur 9. E-modul (E_c) resultater for betoner med nedknust beton fra banebro og referencebeton.



Svind er målt for Bro30 og er på niveau med Bjælke30 som det fremgår af figur 10.



Figur 10. Svind for forskellige betoner.

Der er udført luftporeanalyse og test af frostbestandighed for Bro30 og Bro100 og resultater fremgår af tabel 11 og 12.

Tabel 11. Resultater fra luftporeanalyse.

	Bro30	Bro100
Luftindhold	5,7 %	5,3 %
Specifik overflade	40,0 mm ⁻¹	40,9 mm ⁻¹
Afstandsfaktor	0,12 mm	0,12 mm

Tabel 12. Resultater fra test af frostbestandighed. Afskalning (kg/m²) efter hhv. 14, 28 og 56 cykler.

	m14	m28	m56	m56/m28
Bro30	0,19	0,26	0,29	1,1
Bro100	0,26	0,79	1,34	1,7



Begge betoner har tilfredsstillende (og ens) luftporestruktur, men der er stor forskel på afskalning i test af frostbestandighed. På baggrund af resultaterne kan betonen med 30 % erstatning karakteriseres som havende "god" frostbestandighed, mens betonen med 100 % erstatning må karakteriseres som havende "ikke acceptabel" frostbestandighed iht. SS 137244.

For at undersøge baggrunden for den ikke acceptable frostbestandighed er der udført petrografisk analyse af både betonen med 100 % erstatning samt udvalgte større korn af den nedknuste beton fra banebroen (se figur 11).



Figur 11. Gennemskåret prøve af beton med 100 % erstatning (til venstre) og udvalgte større korn af nedknust beton fra banebro (til højre).

Den petrografiske analyse viser, at pastaen i den nedknuste beton fremstår meget uens i forhold til sammensætning, kapillarporøsitet og luftindhold. Kapillarporøsiteten er dog generelt højere end i den nye beton. Desuden indeholder den nedknuste beton både tæt og porøs flint, hvoraf den porøse flint vurderes ikke at være frostbestandig. Disse observationer forklarer hvorfor der ses en reduceret styrke i forhold til referencebetonen og den dårlige frostbestandighed.

6. Opsummering

Undersøgelserne i nærværende rapport har omfattet dokumentation af egenskaber af 5 forskellige betoner baseret på erstatning af granittilslag i en referencebeton med 2 forskellige typer nedknust beton. Undersøgelserne viser, at hvis kvaliteten af den nedknuste beton er på niveau med den beton den anvendes i, så kan der opnås både friske og hærdnede egenskaber på niveau med referencebetonen, uafhængigt af erstatningsgraden, dog observeres et større svind.