



Nulspildsprojektet

Resultatopsamling

August 2019



TEKNOLOGISK
INSTITUT

emcon

Nulspildsprojektet

Resultatopsamling

Rapporten er en opsamling af forsøg og resultaterne genereret i forbindelse med "Nulspildsprojektet".

Formålet med projektet har været at udvikle og dokumentere betoner støbt med genanvendte tilslag fra betonproducenternes eget spildbeton.

Der er i projektet arbejdet med følgende tre produktioner

- Belægninger
- Huldæk
- Fabriksbeton

Forfattere:

- Katja Udbye Christensen, Teknologisk Institut
- Claus Pade, Teknologisk Institut
- Christian Munch-Petersen, EMCON A/S

Nulspildsprojektet er finansieret af Dansk Beton og udført i samarbejde med: Teknologisk Institut, Aalborg Portland A/S, CRH Concrete A/S, DK Beton A/S, IBF og EMCON A/S

Projektet er udført i perioden fra januar 2018 til marts 2019. Rapporten er i august 2019 opdateret med miljødata for naturlige tilslag. Miljødataene for genanvendte tilslag er desuden revideret i forhold til opdateringer i den anvendte database.

dansk
beton



TEKNOLOGISK
INSTITUT

emcon

aalborgportland
CEMENTIR HOLDING



DK Beton
HEIDELBERGCEMENT Group

Indhold

1.	Forord.....	4
2.	Knusning og klassificering af genanvendt tilslag	4
2.1.	Knuseteknologier	4
2.2.	Betydning af alder ved knusning	6
2.3.	Knusning og fraktionering af spildbeton	11
3.	Genanvendelse af spildbeton fra belægningsproduktionen.....	18
3.1.	Udvikling af recepter	18
3.2.	Fuldskalaforsøg	22
4.	Genanvendelse af spildbeton fra huldæksproduktion	23
4.1.	Udvikling af recepter	23
4.2.	Fuldskalaforsøg	28
5.	Genanvendelse af spildbeton fra fabriksbeton	44
5.1.	Udvikling af recepter	44
5.2.	Fuldskalaforsøg	48
6.	Miljødata	56

1. Forord

Genanvendelse af nedknust beton som tilslag i ny beton har der været eksperimenteret med siden 1980'erne, og der findes flere fuldskalaeksempler på, at det kan lade sig gøre at opføre konstruktioner med nedknust beton som tilslag til den nye beton.

Der har imidlertid ikke været en efterspørgsel på sådanne betontyper, og incitamentet for at tage spildprodukterne ind i produktionen af ny beton har ikke hidtil været til stede. De seneste års politiske tiltag vedrørende ressourcestrategi, etablering af certificeringsordninger for bæredygtigt byggeri, samt gennemførelse af flere udviklingsprojekter har medført en hidtil uset interesse for at arbejde med at udnytte ressourcerne i betonaffald. Det gælder både betonaffald som stammer fra nedrivning af bygninger og konstruktioner samt spildbeton fra producenterne egen produktion.

I dette projekt er der arbejdet med at udnytte spildbetonen fra producenterne egen produktion til fremstilling af ny beton. Der har i projektet været fokus på de tre følgende spor:

1. Genanvendelse af spildbeton fra produktion af huldæk. Huldæk udgør ca. 25% af al elementproduktion i Danmark. Det vurderes, at spildproduktionen typisk udgør ca. 8% (5-12%) og særligt stammer fra afskæringer.
2. Genanvendelse af spildbeton til fremstilling af belægningssten og fliser. Det vurderes, at spildproduktionen typisk udgør 2% og primært stammer fra produkter som ikke lever op til de visuelle krav.
3. Genanvendelse af spildbeton fra produktion af fabriksbeton. Her udgør spildproduktionen også ca. 2% og stammer primært fra returbeton som følge af fejlbestillinger eller kasseret beton fx ved brostøbninger.

Der er foruden udvikling og dokumentation af genbrugsbeton, også undersøgt forskellige knuseteknologier, betydningen af alder ved knusning samt udregning af miljødata for processering af det genanvendte tilslag (nedknust beton anvendt som tilslag i ny beton).

2. Knusning og klassificering af genanvendt tilslag

2.1. Knuseteknologier

Spildbeton skal nedknuses for at kunne genanvendes.

Der findes forskellige knuseteknologier på markedet, og de oftest anvendte er:

- Kæbeknuser
- Kegleknuser
- Rotorknuser

Kæbeknuseren består af en fast kæbe og en bevægelig kæbe, der bevæges mod hinanden. Øverst er afstanden mellem kæberne stor, og nederst indstilles afstanden til den ønskede maksimale kornstørrelse af det knuste materiale. En kæbeknuser kan knuse alt – også meget stærke materialer. Materialet bliver fliset (flade korn) og normalt vil der kræves en efterfølgende knusning med en anden maskine, for at materialet er egnet til anvendelse i beton. Kæbeknuserne har et lavt støjniveau og producerer kun lidt støv.

En kegleknuser består af en kegle, der roterer excentrisk inde i en anden kegle. Ved at styre afstanden mellem de to kegler og excentrikkens størrelse, kan der produceres præcist efter ønsket kornstørrelse, og kornene bliver kubiske. Til produktion af tilslag til beton, kan en kegleknuser derfor anvendes med fordel – ofte efter en kæbeknuser, der klarer den grove knusning.

En rotorknuser består af en hurtigt roterende tromle, der slynger materialet mod plader af højstyrkestål, på hvilke spildbetonen knuses ved anslaget. En rotorknuser er billig og effektiv, men producerer meget fint materiale.

I den normale situation vil et mobilt knuseanlæg med visse mellemrum blive flyttet til et produktionssted og den tilstedeværende bunke af spildbeton vil blive nedknust. Disse mobile knuseanlæg er sædvanligvis beregnet til at knuse så meget materiale som muligt – så hurtigt som muligt. Ofte anvendes derfor en rotorknuser.

Ved nedknusningen kan frasorteres evt. armering (fx fra nedknusning af stykker af huldæk). Det gøres på de fleste knuseanlæg med en kraftig elektromagnet. Rustfri armering kan derfor give problemer, da kun nogle rustfri armeringstyper er magnetiske. Fibre kan næppe fjernes fuldstændigt i forbindelse med knusning, og det bør derfor overvejes, om fiberbeton skal indgå i spildbeton til genanvendelse.

Derimod vil der ikke som ved genbrugsmaterialer fra nedrivning være brug for frasortering af plast, tegl, isolering og lignende, fordi disse materialer ikke bør findes i spildbeton.

Et typisk "sæt" mobile maskiner til nedknusning af beton, består af:

- En gravemaskine til at læsse knuser og sorteringsanlæg
- En rotorknuser med sorteringsanlæg
- En frontlæsser til at køre i bunke

Produktiviteten er typisk ca. 2.000 tons i timen og flytning af maskinparken udgør ca. 20.000 kr. og skal foregå som en særtransport.

2.2. Betydning af alder ved knusning

2.2.1. Forsøgsoversigt

Der er støbt 4 betonserier på Teknologisk Institut til undersøgelse af betydningen af betonens alder på egenskaberne af det genanvendte tilslag. Betonemner fra hver serie er knust på en laboratoriekæbeknuser, jf. Figur 3, til tre forskellige terminer. Der er på den nedknuste beton efterfølgende målt absorption (på den grove fraktion, dvs. $d > 4$ mm) og sigtekurver (på hele prøven).

Rent praktisk, vil de fleste producenter formegentlig samle en større bunke af spildbeton inden denne knuses. Derfor vil alder ofte ikke være en parameter af betydning, men forsøgene har haft til formål at give en indikation om, hvorvidt der kan være en fordel eller en ulempe i at knuse til en tidlig termin.

2.2.2. Recepter

De anvendte recepter er gengivet i Tabel 1. Recepterne er valgt med henblik på at repræsentere forskellige styrkeklasser og forskellige delmaterialer.

Tabel 1: Recepter med tilslag i vot-tilstand anvendt til vurdering af betydningen af alder ved knusning.

Materiale	Beton ID	Indhold [kg/m^3]			
		P20	M30P	M30E	E40
Cement		217	273	289	407
Flyveaske		65,2	54,5	57,9	61,0
Sand 0/2 kl. E		808	800	756	654
Granit 4/8 kl. E		-	-	240	240
Ral 4/8 kl. A		236	236	-	-
Granit 8/16 kl. E		-	-	726	726
Søsten 8/16 kl. M		710	710	-	-
Superplast		2,8	3,6	3,8	4,7
Luftindblanding		1,6	1,2	1,4	1,5
v/c forhold [-]		0,70	0,55	0,55	0,40
Densitet [kg/m^3]		2212	2239	2246	2265

2.2.3. Støbning

Der er blandet 40 L beton af hver recept på en Eirich R08/W laboratorieblender, se Figur 1. Der er anvendt følgende blandeprocedure:

- 00 s Tørre delmaterialer blandes
- 30 s Vand tilsættes
- 90 s Luftindblanding tilsættes
- 100 s Plastificering tilsættes
- 110 s Der blandes i yderligere 60 sekunder

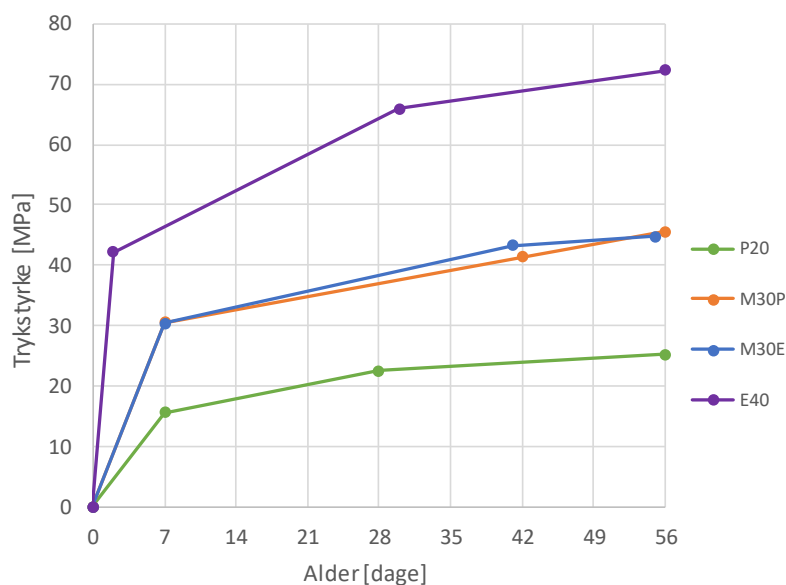


Figur 1: Blander anvendt til støbning af de fire betonserier.

Efter blanding er der støbt 7 stk. prismer med dimensionerne 60x60x400 mm og 9 stk. Ø100 cylindere af hver recept. Umiddelbart efter støbning er emnerne placeret i et klimakontrolleret rum med en temperatur på 20 °C. Emnerne er 24 timer efter støbningen blevet afformet og placeret i vandkar ved 20 °C indtil prøvning.

2.2.4. Trykstyrke

Trykstyrken er målt til samme termin som termin for knusningen iht. DS/EN 12390-3 på 3 stk. Ø100 cylindere pr. termin. Resultaterne fremgår af Figur 2. Det ses som forventet, at E40 har den højeste styrke og P20 har den laveste. Der er ingen styrker under 16 MPa, derfor er styrker under 16 MPa ikke repræsenteret i dette studie. Det kan ikke afvises, at knusning af beton med lavere styrker, kan give andre resultater.



Figur 2: Styrkeudviklingen for de 4 betonserier målt ved samme terminer som knusningen.

2.2.5. Knusning

Knusningen er foretaget på en laboratoriekæbeknuser, se Figur 3. Der er knust 2 prismer pr. recept pr. termin. Terminerne for knusning fremgår af Tabel 2.

Tabel 2: Terminer for knusning angivet som antal døgn efter støbning.

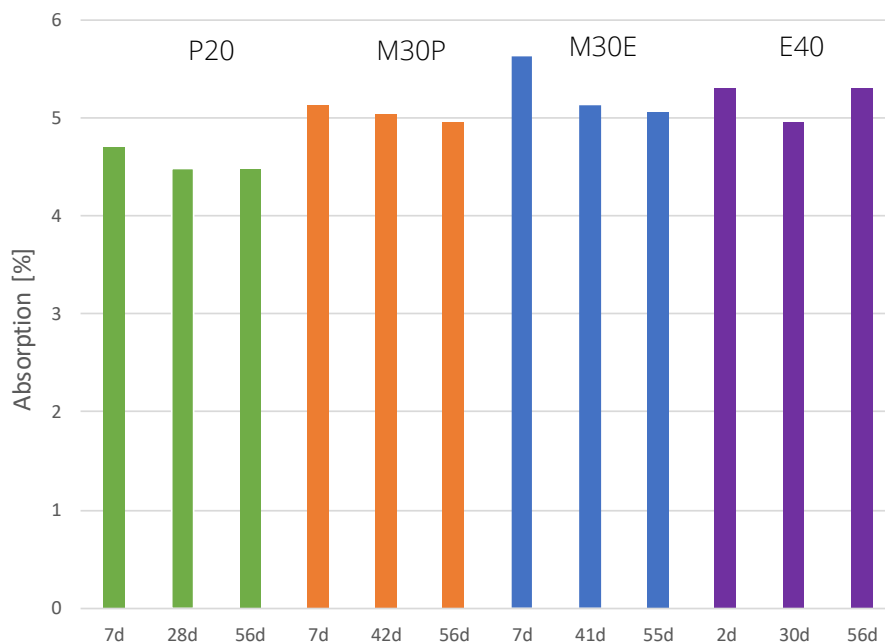
ID	Termin 1	Termin 2	Termin 3
P20	7	28	56
M30P	7	42	56
M30E	7	41	55
E40	2	30	56



Figur 3: Kæbeknuser anvendt til knusning af de 4 betonserier.

2.2.6. Absorption

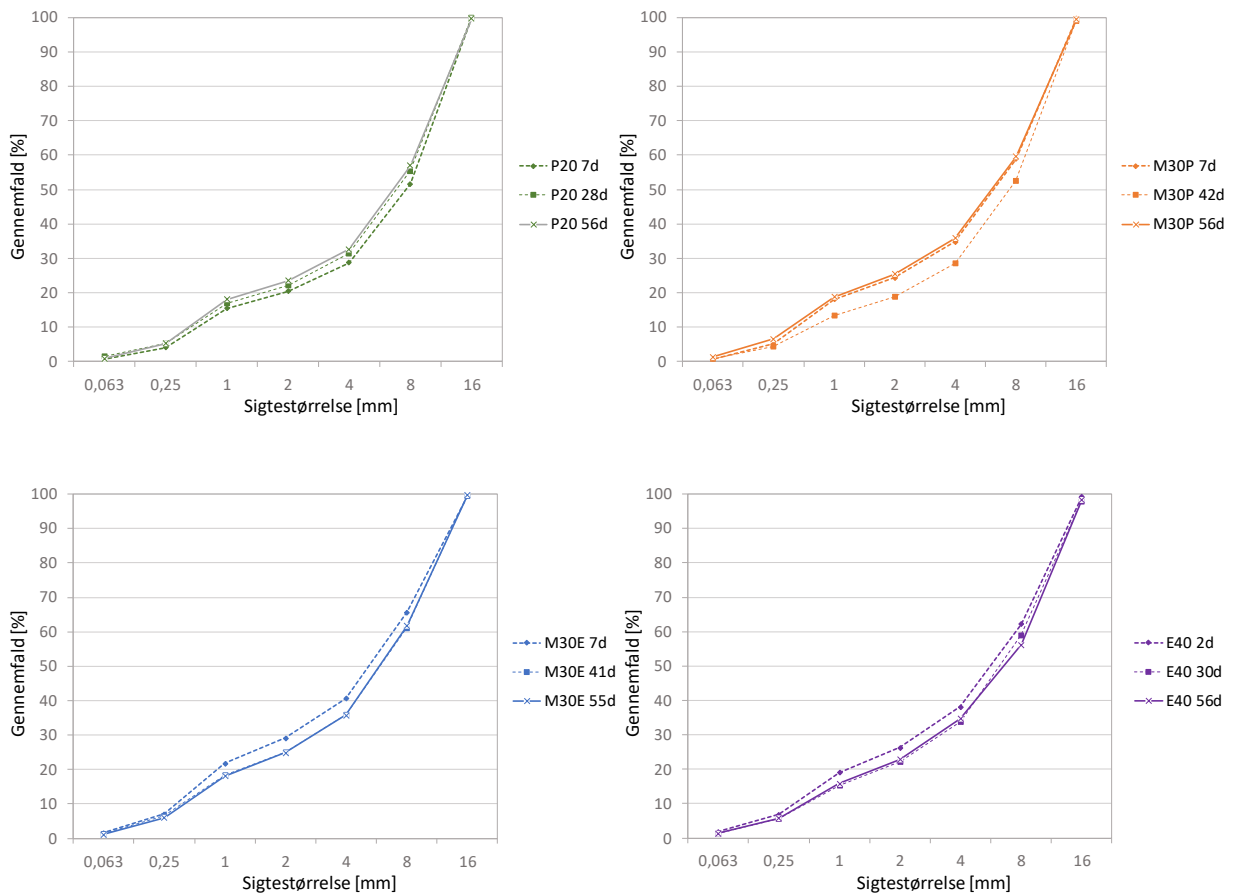
Efter knusning er der bestemt absorption på den grove fraktion iht. DS/EN 1097-6. Resultaterne fremgår af Figur 4. For absorptionsmålingerne ses generelt et lille fald i den målte værdi når alderen (og dermed også trykstyrken) stiger for alle serier på nær E40. Alle absorptionsværdier ligger indenfor et relativt snævert interval, værdierne for P20 er dog de laveste, hvilket kan skyldes, at P20 har det mindste pasta-indhold. Resultaterne for absorptionsmålingerne viser, at de 4 betonserier knust på den pågældende kæbeknuser cirka har samme absorption uanset alder.



Figur 4: Absorption for den grove fraktion ($d > 4$ mm) fra de 4 betonserier knust ved forskellige terminer.

2.2.7. Sigtekurver

Sigtekurverne er bestemt iht. DS/EN 933-1. Resultaterne fremgår af Figur 5. Generelt er de målte sigtekurver relativt ens og der er ikke umiddelbart nogen sammenhæng mellem sigtekurver og alder (og dermed også trykstyrken). Resultaterne viser, at cirka samme kornkurve opnås uanset betonens styrkeklasse og alder for de støbte betonserier knust på den pågældende kæbeknuser.



Figur 5: Sigtekurver for de for de 4 betoner knust ved forskellige terminer.

2.3. Knusning og fraktionering af spildbeton

2.3.1. Prøvningsprogram

De medvirkende betonproducenter har i forbindelse med projektet indsamlet spildbeton fra deres produktioner, som de efterfølgende har fået knust og fraktioneret. IBF har både knust spildbetonen fra belægningsproduktionen og fabriksbetonproduktionen, som derfor er knust og fraktioneret på de samme anlæg. Prøver af den knuste beton er efterfølgende blevet leveret til Teknologisk Institut til klassificering af relevante egenskaber. Fraktionerne modtaget samt de anvendte knusemetoder fremgår af Tabel 3.

Tabel 3: Genanvendte tilslag fra spildbeton modtaget hos Teknologisk Institut til klassificering. RCA=recycled concrete aggregates.

Betonproduktion	Prøve ID	Anvendt knuser	Fraktioner
Belægninger	BRCA	Forknusning med kæbeknuser efterfulgt af kegleknuser	0/5, 2/8, 5/11
Huldæk	HRCA	Rotorknuser	0/4, 4/16
Fabriksbeton	FRCA	Forknusning med kæbeknuser efterfulgt af kegleknuser	0/5, 2/8, 5/11, 8/16

De genanvendte tilslag fra hver produktgruppe er undersøgt for følgende egenskaber:

- Densitet og absorption iht. DS/EN 1097-6
- Sigtekurver iht. DS/EN 933-1
- Kloridindhold iht. DS/EN 14629
- Kornform iht. DS/EN 933-4

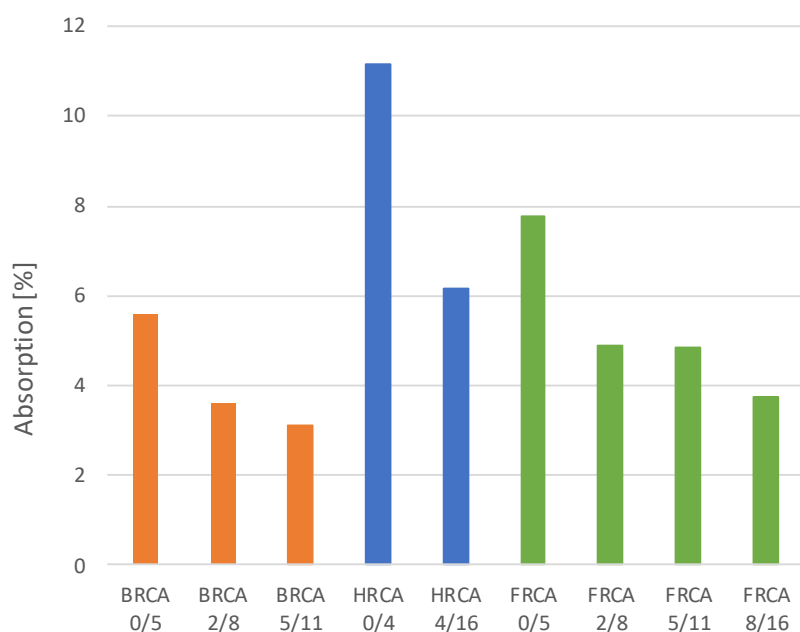
Egenskaberne er efterfølgende anvendt i forbindelse med udviklingen af betonrecepter med den genanvendte spildbeton, jf. afsnit 3.1, 4.1 og 5.1.



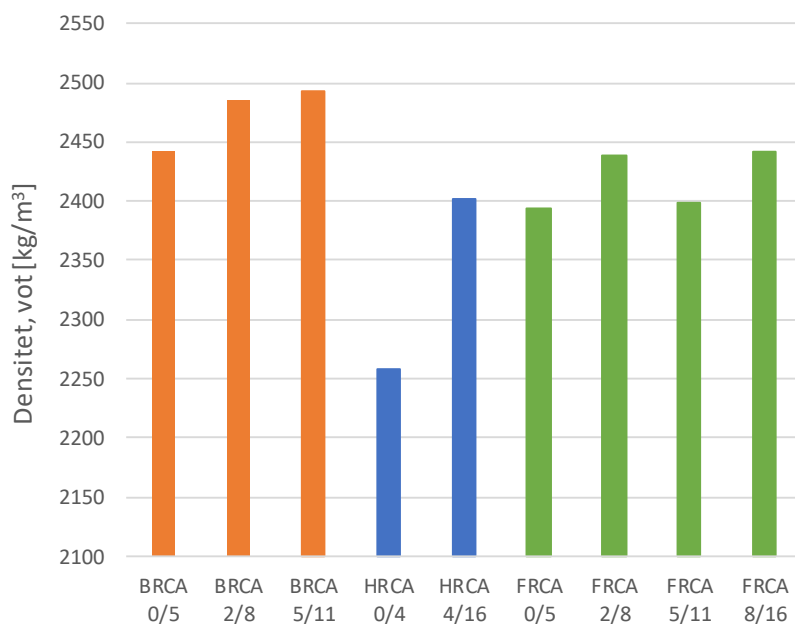
Figur 6: Genanvendte tilslag fra spildbeton. Øverst = HRCA 0/4 og 4/16 (H=huldæk, RCA = recycled concrete aggregates), midterst = BRCA 0/5, 2/8, 5/11 (B=belægningsprodukter), nederst = FRCA 0/5, 2/8, 5/11, 8/16 (F=Fabriksbeton).

2.3.2. Densitet og absorption

Densitet og absorption er bestemt iht. DS/EN 1097-6. Resultaterne fremgår af Figur 7 og Figur 8, og er middelværdien af to målinger. Der ses generelt et fald i absorptionsværdien med stigende kornstørrelse, hvilket kan skyldes, et højere indhold af pasta i de fine fraktioner. Tilsvarende ses en øget densitet for stigende kornstørrelser. Den høje absorption i det genanvendte huldækstilslag er sandsynligvis relateret til det generelt høje pastaindhold i huldæksbeton.



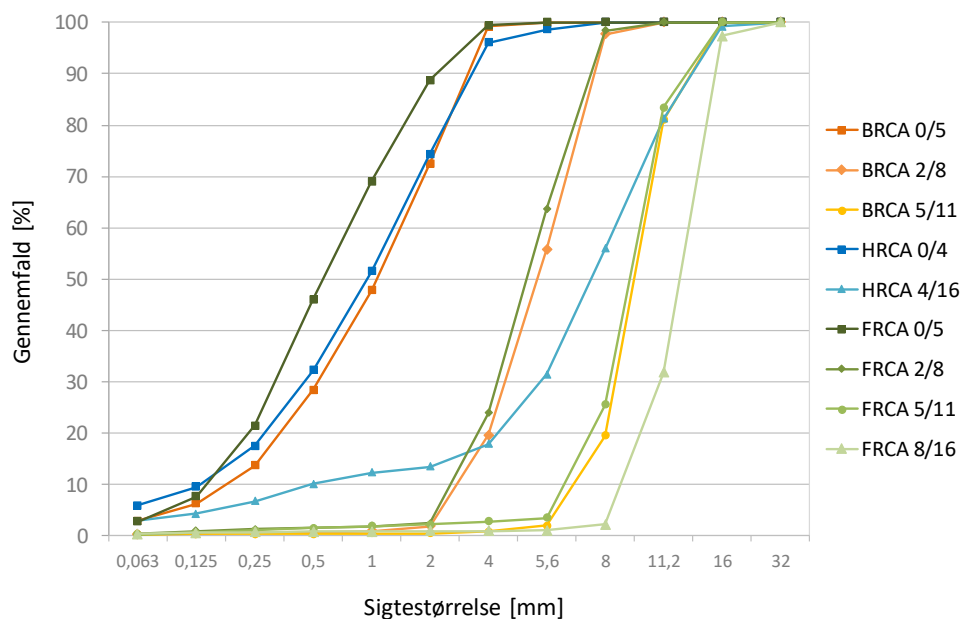
Figur 7: Absorptionsværdier bestemt på det genanvendte tilslag fra spildbeton. Orange = belægningsprodukter, blå = huldæk, grøn = fabriksbeton.



Figur 8: Densitetsværdier bestemt på det genanvendte tilslag fra spildbeton. Orange = belægningsprodukter, blå = huldæk, grøn = fabriksbeton.

2.3.3. Sigtekurver

Sigtekurverne er bestemt iht. DS/EN 933-1. Resultaterne fremgår af Figur 9. Af resultaterne ses, at sigtekurverne for det nedknuste fabriksbeton og de nedknuste belægningsprodukter er forholdsvis ens bortset for 0/5 fraktionen. Eftersom der er anvendt samme knuser og samme fraktioneringsanlæg for belægningsprodukterne og fabriksbetonen er det at forvente, at sigtekurverne vil være nogenlunde ens. Den genanvendte fine tilslag (B0/4, H0/4, F0/5) har alle et højere indhold af finstof ($\leq 0,125$ mm) end hvad der normalt ses i naturligt sand. Tilsvarende indeholder H4/16 næsten $20\% \leq 4\text{mm}$ og $4\% \leq 0,125$ mm.

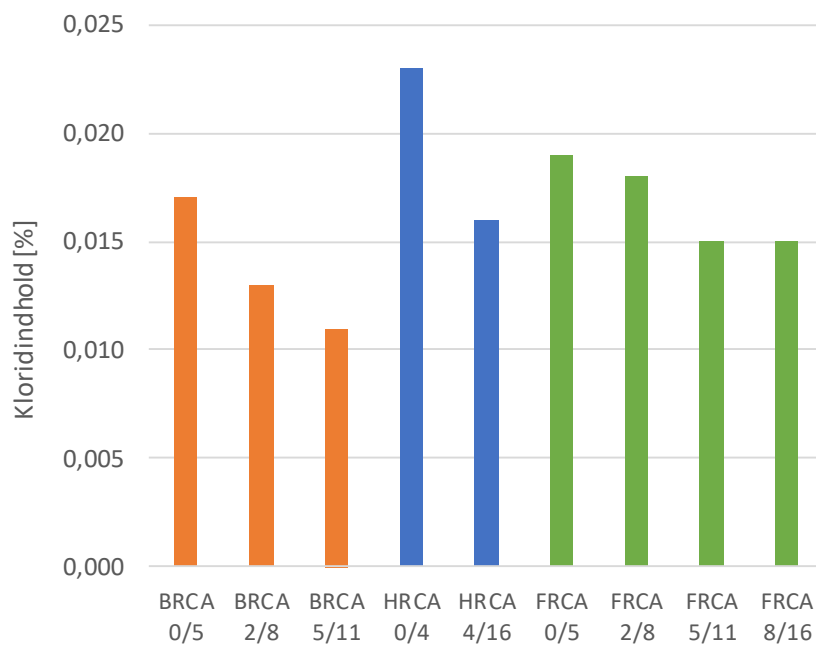


Figur 9: Sigtkurver målt på det genanvendte tilslag fra spildbeton.

2.3.4. Kloridindhold

Der er målt syreopløseligt kloridindhold i det genanvendte tilslag iht. DS/EN 14629. Resultaterne fremgår af Figur 10. Kloridindholdet i tilslag måles normalt som det vandopløselige kloridindhold, men for det genanvendte tilslag er det syreopløselige indhold målt. Der kan være klorider, som er fysisk eller kemisk bundet til cementpastaen i tilslaget, og som derfor ikke nødvendigvis vil blive frigivet når det vandopløselige indhold måles, men derimod vil blive frigivet når det syreopløselige indhold måles. Det vandopløselige klorid indhold vil derfor svare til en nedre værdi, og da alle bundne klorider ikke nødvendigvis vil blive frigivet når det genanvendte tilslag anvendes i en by beton, vil det syreopløselige indhold svare til en øvre værdi. Resultaterne er derfor på den sikre side.

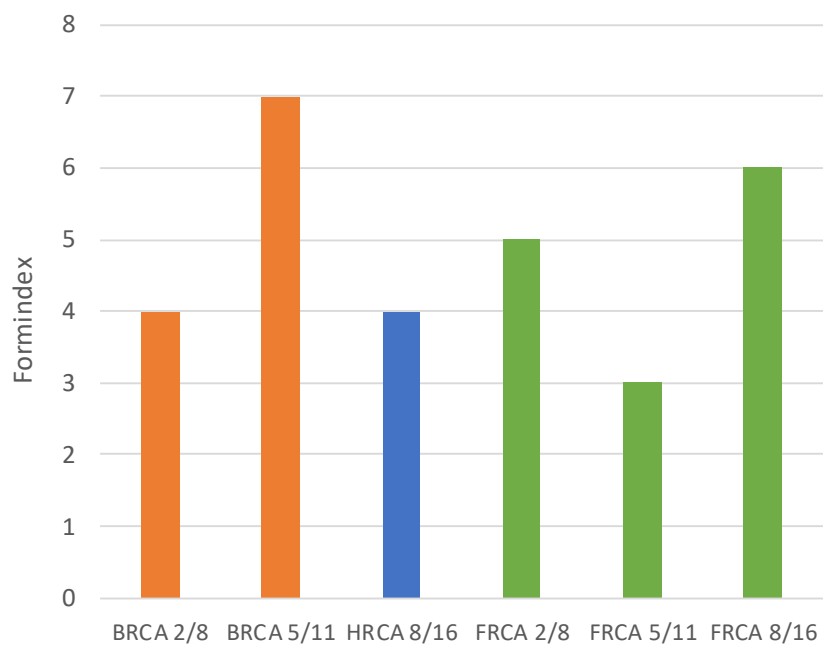
De naturlige tilslag anvendt i recepterne, har et kloridindhold på mellem 0,001-0,005 %. Sammenlignet har de genanvendte betontilslag et indhold på mellem 0,011-0,023 %. Klorider i beton kan enten stamme fra det eksterne miljø eller fra de anvendte delmaterialerne. Da der er tale om knust spildbeton, stammer kloriderne fra de andre delmaterialer, fx cementen. Det samlede kloridindhold for en beton med genanvendte tilslag vil derfor være højere end for beton med naturlige tilslag.



Figur 10: Det syreopløselige kloridindhold.

2.3.5. Kornform

Kornformen er bestemt iht. DS/EN 933-4 på det grove tilslag. Resultatet fremgår af Figur 11 og er et udtryk for mængden af ikke kubiske korn. Værdierne kan gå fra 0-100, hvor 0 svare til tilslag der kun består af kubiske korn og 100 svarer til tilslag som udelukkende består af ikke kubiske korn. Dermed er indholdet af ikke kubiske korn i alle tilslag forholdsvis lavt.



Figur 11: Formindex målt på det grove tilslag.

3. Genanvendelse af spildbeton fra belægningsproduktionen

3.1. Udvikling af recepter

3.1.1. Prøvningsprogram

Der er i projektet udviklet 2 belægningsrecepter med genanvendte tilslag fra spildbeton baseret på en referencerecept fra IBF hvor dele af det naturlige tilslag erstattes af genanvendte tilslag. Der er blandet 50 L beton af hver recept og støbt belægningssten med de nominelle dimensioner, lxbxh 210 x 140 x 70 mm, til bestemmelse af spaltetrækstyrke og frostbestandighed. Udvikling og dokumentation af recepter er foregået i laboratoriet på Teknologisk Institut.

3.1.2. Recepter

Der er i projektet taget udgangspunkt i en recept anvendt hos IBF. Recepten er tilpasset de pågældende produktionsbetingelser, så den ønskede bearbejdelighed er opnået. De udviklede recepter fremgår af Tabel 4. Der er arbejdet med en erstatningsgrad på 5% af den fine fraktion og 5% af den grove fraktion (navngivet B5), samt 20% af den fine fraktion og 20% af den grove fraktion (navngivet B20). Erstatningsgraderne er i forhold til massen af tilslag. Producenten har ønsket, at recepten holdes fortroligt, derfor er recepten gengivet som det totale pasta-, og tilslagsindhold. Pastaindholdet er reduceret i recepterne med genanvendte tilslag, det skyldes at betonen ellers ikke var formstabil. Behovet for en reduktion af pastaindhold kan skyldes pakning, kornform og kornstørrelsesfordelingen af det genanvendte tilslag. Tilslaget er vist i Figur 12, hvor der ses en forskel i kornstørrelsen på det genanvendte- og naturlige tilslag. Vand/cement forholdet er ens for alle blandinger.

Tabel 4: Belægningsrecepter med tilslag i vot-tilstand. BREF = reference, B5 = genbrugsbeton med 5% erstatning af fint og groft tilslag og B20 = genbrugsbeton med 20% erstatning af fint og groft tilslag.

Materiale	Beton ID	Indhold [kg/m ³]		
		BREF	B5	B20
Pasta		469	464	450
Naturlige tilslag		1852	1759	1479
Genanvendte tilslag		0	93	370
Densitet [kg/m ³]		2321	2315	2299



Figur 12: Genanvendte tilslag fra spildbeton fra belægningsproduktionen (øverst) og jomfruelige tilslagsmaterialer (nederst). RCA står for "recycled concrete aggregates".

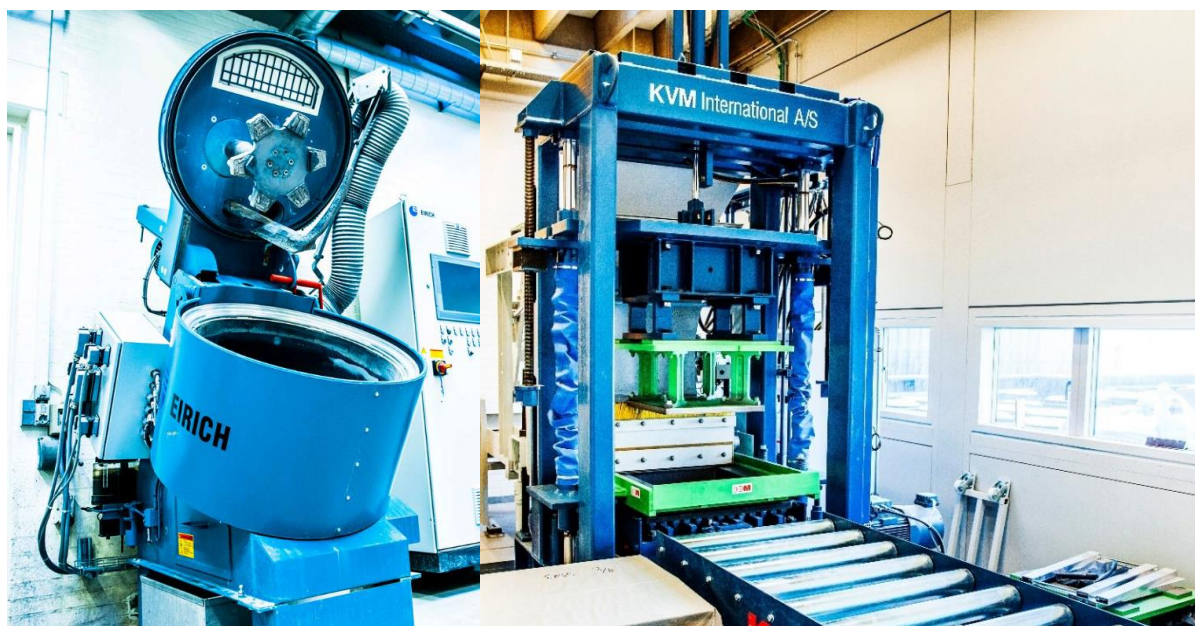
3.1.3. Støbning

Der er blandet 50 L beton af hver recept på en Eirich R08/W, se Figur 13. Tilslagene er 24 timer inden blanding blevet blandet med al blandevand, for at sikre at tilslaget absorberer den mængde vand der svarer til den målte absorption. Der er anvendt følgende blandeprocedure:

- 00 s Tilslag og vand blandes med binder
- 15 s Plastificering tilsættes
- 20 s Der blandes i yderligere 120 sekunder

Efter blanding er der støbt 3 plader med 8 stk. belægningssten med de nominelle dimensioner lxbxh 210 x 140 x 70 mm på en KVM 051 000165620 1 blokstensmaskine, se Figur 13. Belægningsstenene inklusive plader er umiddelbart efter støbning blevet pakket ind i plast med en vandbakke på hver plade

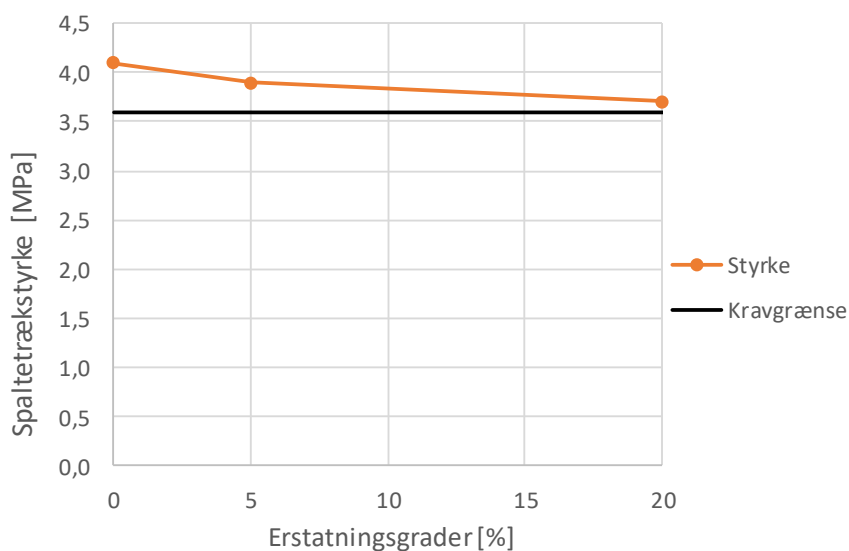
for at udgå udtørring. Belægningsstenene er derefter placeret i et klimakontrolleret rum med en temperatur på 20 °C. Emnerne er 24 timer inden måling af spaltetrækstyrke, blevet placeret i vandkar ved 20 °C.



Figur 13: Anvendt blander (til venstre) og KVM blokstensmaskine anvendt til produktion af belægningssten (til højre).

3.1.4. Spaltetrækstyrke

Spaltetrækstyrken er bestemt efter 3 modenhedsdøgn på 8 stk. belægningssten pr. recept iht. DS/EN 1338. Resultaterne fremgår af Figur 14. Alle recepter lever op til kravet om en gennemsnitlig spaltetrækstyrke på 3,6 MPa og ingen enkelte resultater under 2,9 MPa som angivet i DS/EN 1338. Der ses en reduktion i styrke med stigende erstatningsgrader.



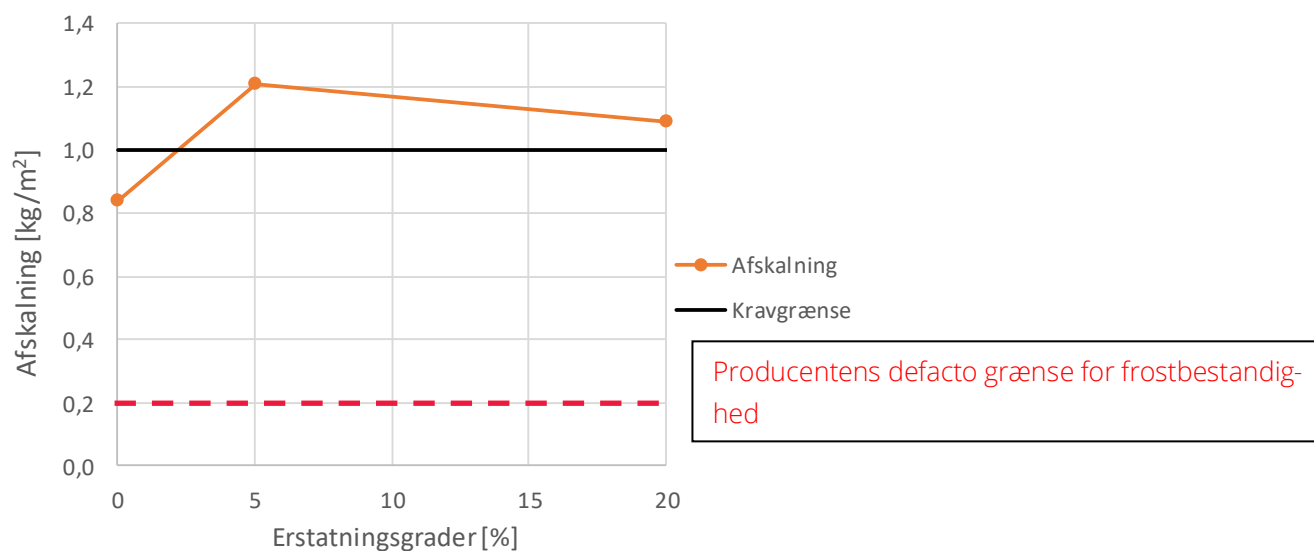
Figur 14: Spaltetrækstyrke for belægningsstenene som funktion af erstatningsgraden. Den gennemsnitlige kravgrænse er markeret med en sort linje.

3.1.5. Frostbestandighed

Frostbestandigheden er bestemt iht. DS/EN 1338. Resultaterne fremgår af Figur 15. Der ses for alle recepter en høj afskalning, hvor kun referencen ligger under gennemsnitskravet på $1,0 \text{ kg/m}^2$. Producenten har oplyst, at de helst ikke ser afskalninger på over $0,20 \text{ kg/m}^2$ og branchen anser generelt en afskalning på $0,84 \text{ kg/m}^2$ for at være for højt.

En petrografisk analyse udført på de 3 recepter før og efter frost/tø prøvning har vist, at en del af det genanvendte tilslag højst sandsynligt stammer fra fabriksbeton og ikke belægningsprodukter. Det er ikke ualmindeligt at belægningsfabrikker ligger i forbindelse med en fabrik, der leverer fabriksbeton, derfor blandes spildbetonen fra de to produktioner ofte. Ikke alt fabriksbeton er egnet til frosteksporer og det kan derfor påvirke resultaterne fra frost/tø-prøvningen yderligere, hvis der er ikke-frostbestandig fabriksbeton i det genanvendte tilslag.

Det er derfor nødvendigt at sikre sig ved forprøvning, at frostbestandigheden af belægningssten og fliser med genanvendte tilslag lever op til kravene til afskalning.



Figur 15: Afskalning efter frost/tø prøvning for belægningsstenene som funktion af erstatningsgraden. Den gennemsnitlige kravgrænse er markeret med en sort linje.

3.2. Fuldskalaforsøg

Grundet udfordringerne med frostbestandigheden for alle recepter, er der i projektet ikke udført fuldskalaforsøg med belægningssten.

4. Genanvendelse af spildbeton fra huldæksproduktion

4.1. Udvikling af recepter

4.1.1. Prøvningsprogram

Der er i projektet udviklet 2 huldæksrecepter med genanvendte tilslag af spildbeton baseret på en referencerecept fra CRH Concrete. Der er støbt 8 stk. Ø100/H90 prøveemner af hver af de 3 recepter til vurdering af bearbejdeligheden ved støbning samt bestemmelse af styrkeudviklingen. Udvikling og dokumentation af recepter er foregået på Teknologisk Institut og dannede baggrund for fuldskalaforsøgene udført hos CRH Concrete.

4.1.2. Recepter

Der er i projektet taget udgangspunkt i en recept anvendt hos CRH Concrete. De udviklede recepter fremgår af Tabel 5. Der er i alle 3 recepter anvendt samme pastasammensætning og -indhold. Der er arbejdet med en erstatningsgrad på 10% af den fine fraktion og 10% af den grove fraktion (navngivet H10/10), samt 10% af den fine fraktion og 20% af den grove fraktion (navngivet H10/20). Erstatningsgraderne er i forhold til massen af tilslag, men den samlede tilslagsvolumen er samtidig holdt konstant. Tilslaget er vist i Figur 16.

Tabel 5: Recepter med tilslag i vot-tilstand. HREF = reference, H10/10 = genbrugsbeton med erstatning af 10% fint- og 10% groft tilslag og H10/20 = genbrugsbeton med erstatning af 10% fint- og 20% groft tilslag.

Materiale	Beton ID	Indhold [kg/m ³]		
		HREF	H10/10	H10/20
Cement		356	356	356
Vand		135	135	135
Sand 0/4 P		802	713	702
Skærver 4/8 P		389	345	302
Skærver 8/16 P		522	464	407
Skærver 8/16 E		201	179	176
HRCA 0/4		0	79,2	78,0
HRCA 4/16		0	110	216
Kompakteringsforbedrende tilsætningsstof		1,78	1,78	1,78

v/c forhold [-]	0,38	0,38	0,38
Densitet [kg/m ³]	2407	2383	2375



Figur 16: Genanvendte tilslag fra spildbeton fra huldæksproduktion (øverst) og jomfruelige tilslagsmaterialer (nederst). RCA står for "recycled concrete aggregates".

4.1.3. Støbning

Der er blandet 7 L beton af hver recept på en Eirich RV02 laboratorieblender, se Figur 17. Tilslagene er 24 timer inden blanding blevet blandet med al blandevand, for at sikre at tilslaget absorberer den mængde vand, der svarer til den målte absorption. Der er anvendt følgende blandedprocedure:

- 00 s Tilslag og vand blandes
- 30 s Tilslag og vand får lov at trække
- 150 s Cement tilsættes og blandingen forsættes
- 180 s Tilsætningsstof tilsættes
- 210 s Der blandes i yderligere 120 sekunder

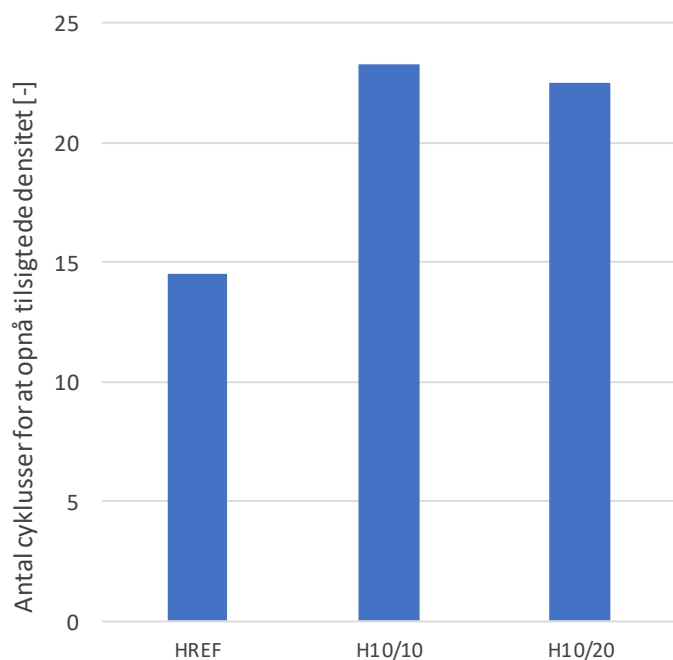
Efter blanding er der støbt 8 stk. Ø100/H90 cylindere af hver recept på en Controls ICT-tester, se Figur 17. Emnerne er kompakteret ved en blanding af rotation og tryk indtil den tilstræbte densitet er opnået. Cylindrerne er efter støbning blevet pakket ind i plastik og placeret i et klimakontrolleret rum med en temperatur på 20 °C. Cylindrerne er umiddelbart inden trykprøvningen pakket ud af plastikken.



Figur 17: Anvendt blander (til venstre) og ICT-tester anvendt til støbning af prøveemner (til højre).

4.1.4. Friske egenskaber

De friske egenskaber vurderes på baggrund af antallet af omdrejninger, som er nødvendige for at opnå den tilstræbte densitet under støbningen. Jo flere omdrejninger, jo lavere er bearbejdeligheden af betonen. Antallet af omdrejninger for de 3 recepter fremgår af Figur 18. Det ses af resultaterne, at bearbejdeligheden falder ved erstatning af naturligt tilslag med genanvendt tilslag. Bearbejdeligheden for H10/10 og H10/20 er nogenlunde ens, hvilket indikerer, at det særligt er den fine fraktion der er skyld i reduktionen af bearbejdelighed. Ifølge de målte sigtekurver, jf. Figur 9, har den fine huldæksfraktion et højere indhold af finstof, end der normalt ses i naturligt tilslag. Et højere finstof indhold giver typisk en reduktion af betons bearbejdelighed.



Figur 18: Friske egenskaber angivet som antallet af omdrejninger der er nødvendige for at opnå den tilstræbte densitet.

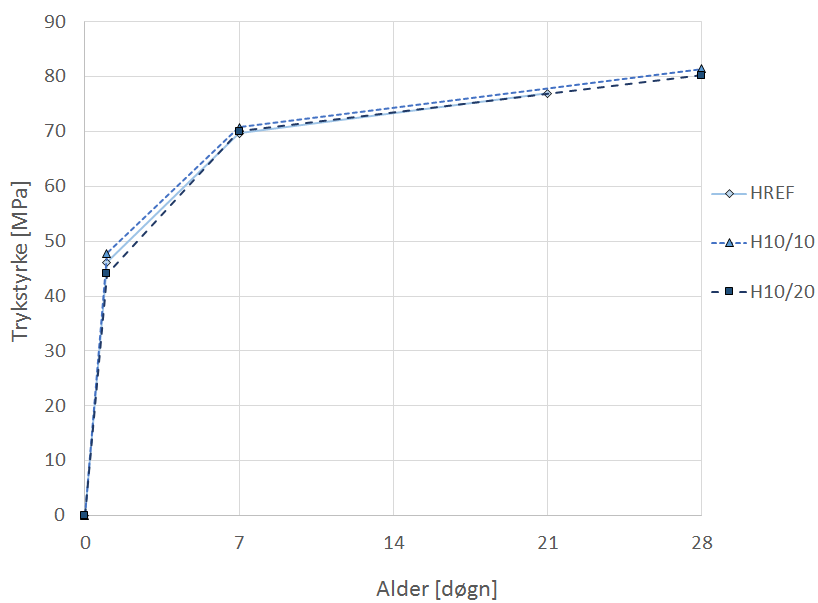
4.1.5. Styrkeudvikling

Trykstyrken er bestemt iht. DS/EN 12390-3 + AC og er målt efter 1, 7 og 28 modenhedsdøgn (21 modenhedsdøgn i stedet for 28 for referencen) på henholdsvis 2, 3 og 3 cylindere. Cylinderne havde en diameter på 100 mm og en højde på 90 mm. Inden prøvningen er endefladerne planet med henblik på at sikre en god kontakt mellem cylinder og trykpladerne i trykpressen, se Figur 19.



Figur 19: Eksempel på prøveemner støbt med huldæksbeton til måling af styrkeudviklingen før slibning (til venstre) og efter slibning (til højre).

Den målte styrkeudvikling fremgår af Figur 20. Trykstyrkerne for genbrugsbetonerne er fuldstændig på samme niveau som trykstyrken for referencen. Resultaterne er ikke omregnet til normcylindere.



Figur 20: Styrkeudvikling for huldæksemner støbt på Teknologisk Institut.

4.2. Fuldskalaforsøg

4.2.1. Prøvningsprogram

Fuldskalastøbningen er udført på CRH Concretes fabrik i Viby Sjælland. Der er taget udgangspunkt i recepterne udviklet hos Teknologisk Institut, jf. afsnit 4.1.2. Prøvningerne er delvist udført hos CRH Concrete og hos Teknologisk Institut. Prøvningerne omfatter:

- Styrkeudvikling og udvikling i elasticitetsmodul iht. DS/EN 12390-3 og DS 423.25 (Teknologisk Institut)
- Svind iht. grundlæggende principper i DS 434.6:1989 med modificeringer (Teknologisk Institut)
- Fugtindhold over tid, metoden er beskrevet i afsnit 4.2.6 (Teknologisk Institut)
- Krybning, metoden er beskrevet i afsnit 4.2.7 (Teknologisk Institut)
- Fuldskala deformationsmåling, metoden er beskrevet i afsnit 4.2.8 (CRH Concrete)
- Forskydningsbæreevne, metoden er beskrevet i afsnit 4.2.9 (CRH Concrete)

4.2.2. Recepter

Der er taget udgangspunkt i referencerecepten, HREF og recepten med 10% fint og 20% groft genanvendt tilslag, H10/20, jf. afsnit 4.1.2. Recepterne er i forbindelse med støbningen tilpasset produktionsudstyret hos CRH Concrete. Der er støbt af to omgange, elementerne støbt i forbindelse med støbning nummer 2 (angivet som HREF (2) og H10/20 (2)) er udelukkende anvendt til måling af forskydningsbæreevnen. Blanderapporterne fremgår af Tabel 6. Bemærk at tilslags sammensætningen i HREF (2) er justeret yderligere.

Tabel 6: Blanderapporter med tilslag i vot-tilstand. HREF (1) = reference støbning 1, HREF (2) = reference støbning 2, H10/20 (1) = genbrugsbeton støbning 1, H10/20 (2) = genbrugsbeton støbning 2.

Materiale	Beton ID	Indhold [kg/m ³]			
		HREF (1)	H10/20 (1)	HREF (2)	H10/20 (2)
Cement		360	361	358	360
Vand		132	133	134	137
Sand 0/4 E		709	619	555	616
Skærver 4/8 P		374	323	667	323
Skærver 8/16 P		631	480	360	482
Skærver 8/16 E		227	175	338	175
HRCA 0/4		-	78	-	74
HRCA 4/16		-	232	-	228
Kompakteringsforbedrende tilsætningsstof		2,54	3,61	2,52	3,63

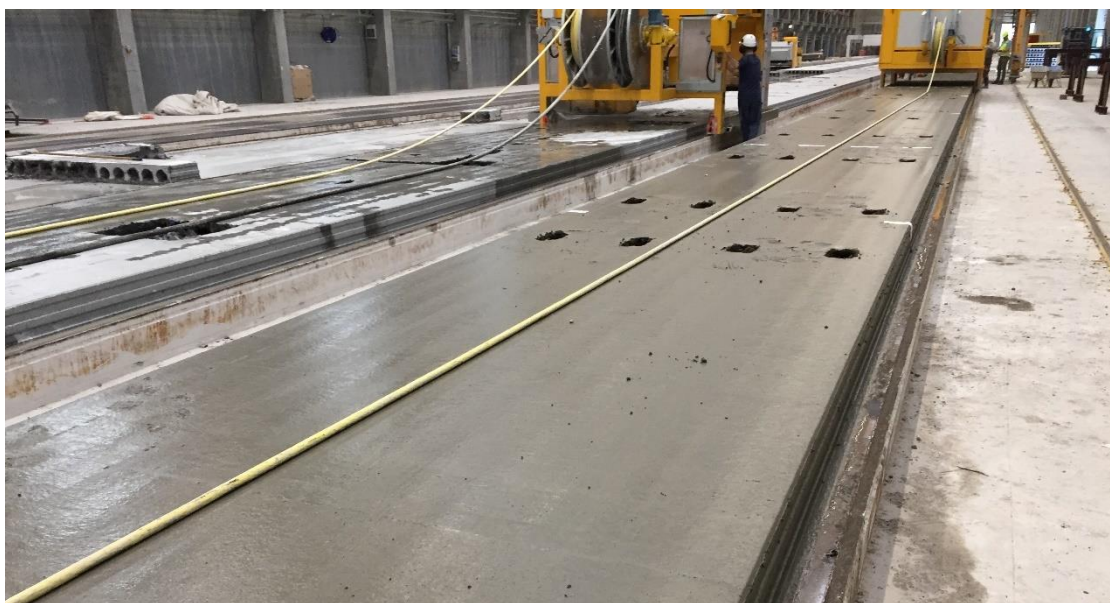
v/c forhold [-]	0,37	0,38	0,38	0,39
Densitet [kg/m ³]	2436	2405	2424	2399
Erstatning af fint tilslag [% massen]	0	11,1	0	10,8
Erstatning af groft tilslag [% massen]	0	19,2	0	18,9

4.2.3. Støbning

Støbningen af huldæk foregik på CRH Concretes fabrik i Viby Sjælland den 19-09-2018 og den 07-11-2018. Støbningen blev gennemført ved først at støbe ca. 30 lbm med genbrugsbeton og herefter i samme bane 30 lbm med referencebeton, se Figur 21. Elementer blev efter støbning lagret i en produktionshal, tildækket for at forhindre evt. indflydelse af sollys på de øverste elementer i stakken. Foruden støbning af huldæk, blev der støbt 22 stk. Ø100 cylindere af hver recept til prøvning hos Teknologisk Institut. Emnerne blev 1 dag efter støbning afformet og placeret i vandkar ved 20 °C (bortset for cylindere anvendt til måling af svind og krybning, jf. afsnit 4.2.5 og 4.2.7)

Inden forsøgene havde betonproducenten udviklet to siloer med en ny stejlere geometri til håndtering af genanvendte tilslag, med henblik på at undgå sammenkitning i siloerne. Siloerne er bygget op på et separat doseringssystem og er fremstillet således at de kan tømmes ved at løfte dem af systemet med truck. Siloerne er vist på Figur 22. Der var ingen problemer med dosering af tilslaget efter flere måneders

opbevaring. Materialetrykket på silobund har i perioden dog også være begrænset, idet hver silo kun indeholder 6,5 tons tilslag.



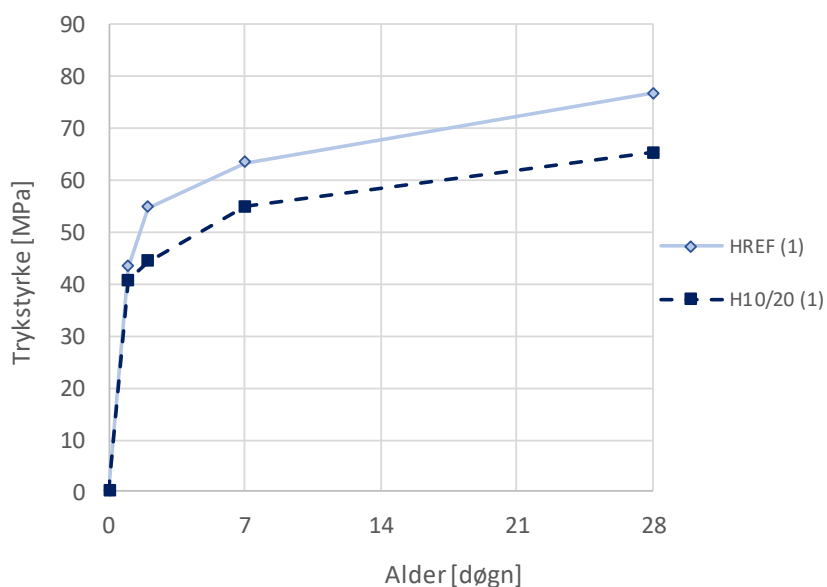
Figur 21: Støbning af huldæk hos CRH Concrete.



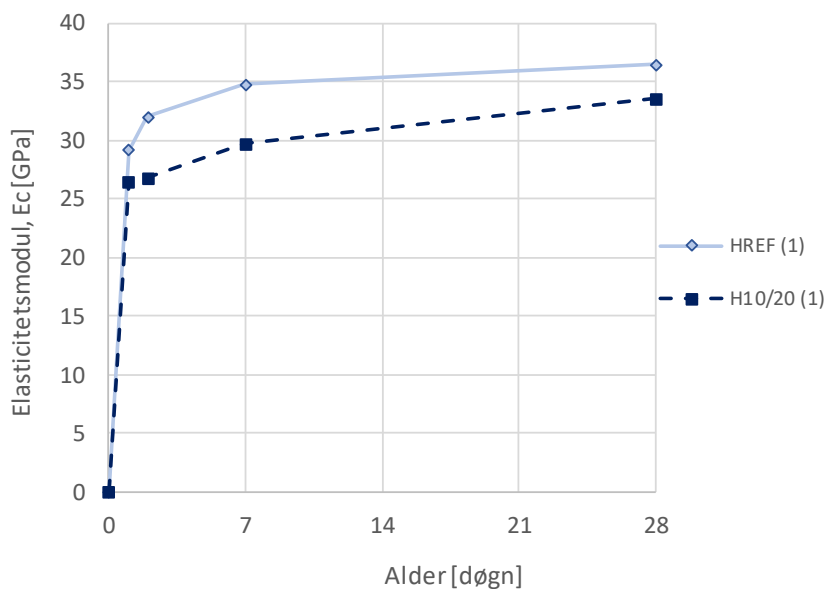
Figur 22: Silosystem hos CRH Concrete udviklet til håndtering af genanvendte tilslag.

4.2.4. Styrkeudvikling og udvikling i elasticitetsmodul

Styrkeudviklingen og udviklingen i elasticitetsmodul er målt efter 1, 2, 7 og 28 modenhedsdøgn iht. DS/EN 12390-3 og DS 423.25 på i alt 4 stk. Ø100 cylindere pr. termin. Resultaterne fremgår af Figur 23 og Figur 24. Af resultaterne ses, at trykstyrken for H10/20 er 15% lavere end trykstyrken for HREF målt efter 28 døgn, og E-modulet er 8% lavere end E-modulet for HREF målt efter 28 døgn. Trykstyrkerne målt i forbindelse med receptudviklingen viste i midlertidig forholdsvis ens trykstyrker for referencen og de to genbrugsbetoner, jf. afsnit 4.1.5. I forbindelse med støbningen hos CRH Concrete, gav laboranten udtryk for at genbrugsbetonen var for "våd" og at han derfor forudså lavere styrker. Reduktionen i styrke og E-modul for H10/20, kan derfor muligvis skyldes et øget vandindhold i betonen.



Figur 23: Styrkeudvikling for huldæksemner støbt hos CRH Concrete.



Figur 24: Udvikling i E-modul for huldæksemner støbt hos CRH Concrete.

4.2.5. Svind

Betonernes svind er målt på 3 prøveemner for hver recept efter grundlæggende principper beskrevet i DS 434.6:1989 med modificeringer.

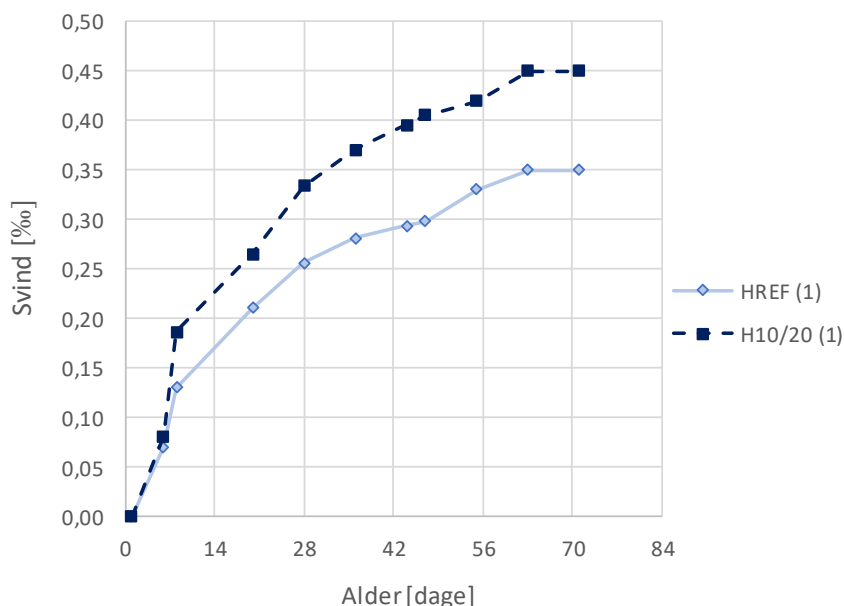
Hvert prøveemne bestod af 2 Ø100 cylindere limet sammen til et samlet prøveemne med en diameter på 100 mm og en højde på 400 mm. I hver ende af prøveemnet blev der pålimet en måletap i udborede huller. Afformning af betoncylindrene og sammenlimning til prøveemner er udført 1 døgn efter udstøbning. Udboring af huller og limning af måletappe er udført før betoncylindrene er taget ud af formene, umiddelbart efter afformning er betoncylindrene limet sammen.

Efter limen er hærdet, er emnerne placeret i klimarum ved 23°C og 50% RH. Hele processen fra limning af måletappe til sammenlimning af betoncylindre tager cirka 1,5 time, betonen har i den tid i største mulige omfang været beskyttet mod udtørring gennem indpakning i plastik. Svindmålingen er begyndt umiddelbart efter at prøveemnerne er placeret i klimarummet og efterfølgende gentaget hver uge indtil differencekriteriet fra DS 434.6:1989 som minimum er opfyldt. Differencekriteriet defineres som opfyldt når længdeændringen, som middelværdi af de sidste tre uger, er mindre end eller lig med 0,02‰. Betonens svind defineres som gennemsnittet af de sidste 4 målinger til og med differencekriteriets opfyldelse.

Der er brugt en referencestang med nominel længde på 415mm. Den effektive længde mellem måletapperne, referencelængden for svindbestemmelsen, er for de testede prøveemner 366 mm.

Svindforløbet er vist i Figur 25, hvor der ses et højere svind for betonen med genanvendte tilslag. Svindet bestemt iht. til definitionen i DS 434.6:1989 er på baggrund af målingerne:

- HREF: 0,28 ‰
- H10/20: 0,40 ‰



Figur 25: Gennemsnitlig svind målt over tid.

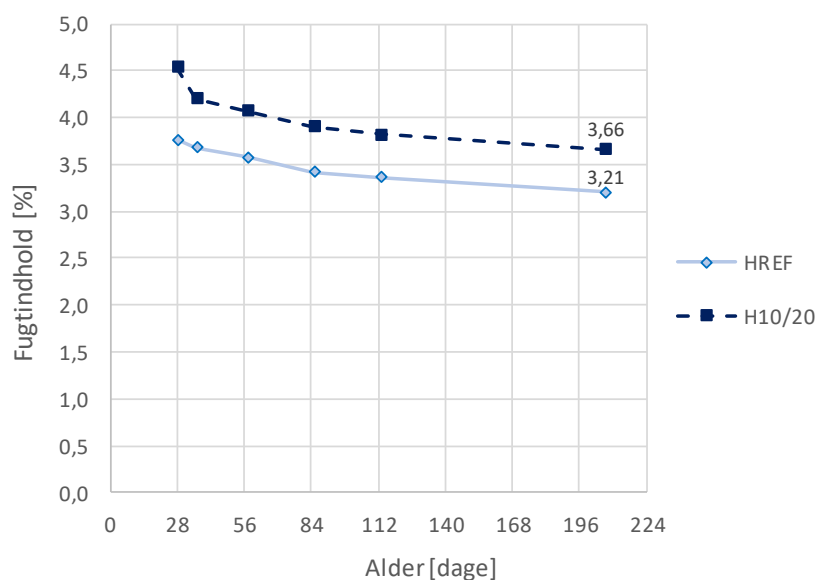
4.2.6. Fugtindhold over tid

Fugtindholdet over tid er målt på to prøveemner for hver recept udskåret fra de støbte huldæk iht. en metode udviklet i forbindelse med projektet. Hvert prøveemne vejede ca. 100 kg. Emnerne blev forseglet i hver ende, for at sikre at fordampning kun kunne ske gennem de overflader som normalt vil være blottet i anvendelsestilstand, se Figur 26. Prøveemnerne har under hele testforløbet være placeret i et klimarum ved 23°C og 50% RH og er kun blevet fjernet i forbindelse med vejning. Masseændringen over tid er et udtryk for en ændring i fugtindholdet. Fugtindholdet til de forskellige prøvningsterminer er udregnet på baggrund af initial fugtindholdet ved prøvningsstart. Initial fugtindholdet er bestemt ved udtørring ved 105°C indtil en konstant masse er opnået. Initialfugtindholdet er bestemt på 2 prøveemner for hver recept.



Figur 26: Udsåret huldæksemner til måling af fugtindhold over tid.

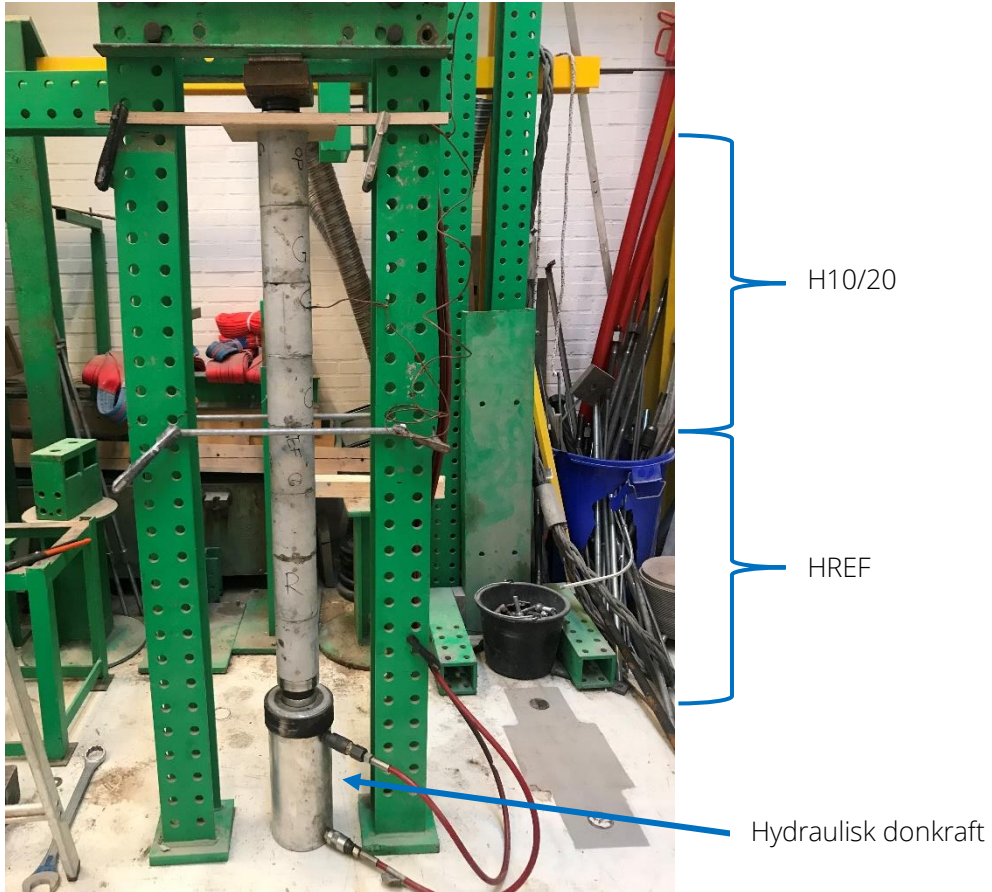
Det målte fugtindhold fremgår af Figur 27. Fugtindholdet i betonen med genanvendte tilslag er højest, hvilket kan skyldes at det genanvendte tilslag har en højere absorption end det naturlige tilslag, og derfor vil fugtindholdet naturligt være højere, eventuelt i kombination med at fugtindholdet i det genanvendte tilslag er estimeret for lavt ved betonfremstillingen, hvilket har resulteret i højere vandindhold i betonen end svarende til vot recepten. Hvis det sidste skulle være tilfældet, kan det formentlig også forklare de lidt lave styrker, der observeres for beton med genanvendt beton som tilslag.



Figur 27: Fugtindhold i huldæk målt over tid.

4.2.7. Krybning

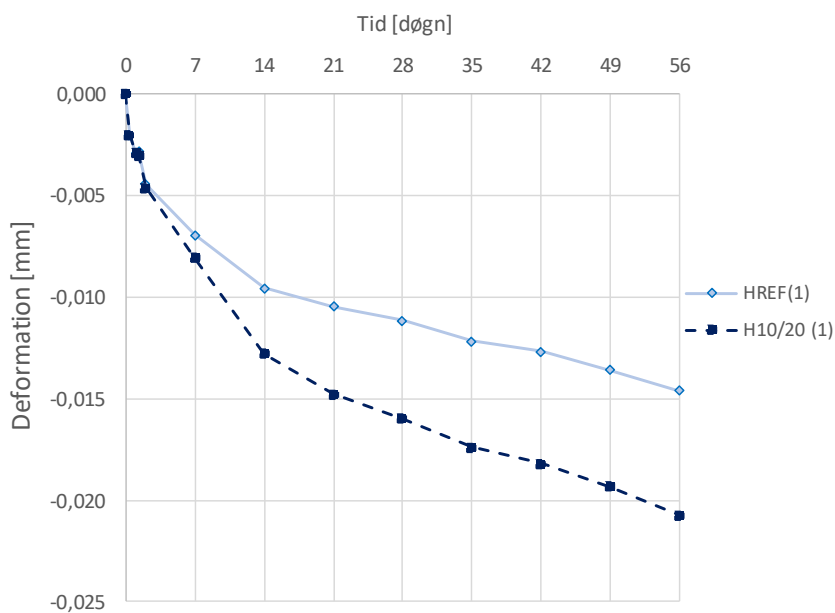
Til bestemmelse af krybning er der udviklet en forsøgsopstilling på Teknologisk institut, hvor krybningen måles som udviklingen i deformationen over 2 måneder på prøveemner belastet med en konstant last svarende til en spænding på 15 MPa. Forsøgsopstillingen er vist i Figur 28. Den består af 8 cylindere (4 fra hver recept) med en diameter på 100 mm og en højde på 150 mm, der er limet sammen. På hver cylinder er der pålimet 4 demec punkter (2 demec punkter på modstående sider) til aflæsning af en relativ længde, se Figur 29. Resultaterne er vist i Figur 30. Her ses en højere deformation over tid (som følge af krybning) for genbrugsbetonen end for referencen. Den øgede krybning kan dels skyldes, at det totale pastaindhold i H10/20 (1) er cirka 14 % højere end pastaindholdet i HREF (1) grundet indholdet af pasta i det genanvendte tilslag, og dels den lavere trykstyrke.



Figur 28: Forsøgsopstilling anvendt til måling af krybning på huldæksemner.



Figur 29: Pålimet demec punkter (til venstre) og demec måler (til højre) anvendt til måling af deformation over tid som følge af krybning.

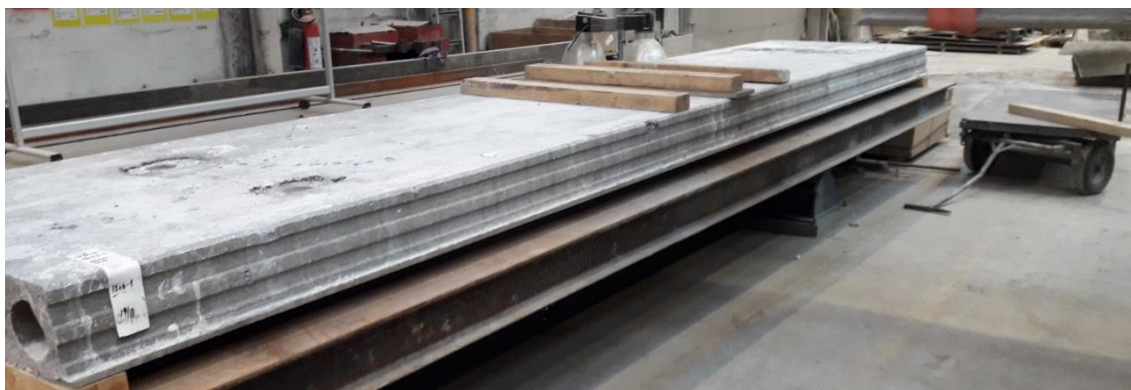


Figur 30: Deformation ved konstant belastning målt over tid.

4.2.8. Fuldskala deformationsmåling

Der er målt deformation på 2 producerede huldæk fra hver recept 1 måned og 2 måneder efter støbning. Huldækkene blev belastet med 160% af balancelasten i 15 minutter. Balancelasten svarer til den last som teoretisk set ophæver pilhøjden, som de forspændte liner skaber.

Elementerne er fremstillet med 7 ½" liner i hvert element, dermed svarer 160% af balancelasten til 3 huldæk med en længde på 3,5 m. Lasten er påført som en linjelast på midten af hver plade. Ballastelementerne støtter udelukkede på den midterste trælægte, se Figur 31-Figur 33.



Figur 31: Forsøgsopstilling til fuldskaladeformationsmåling inden belastningen er påført.

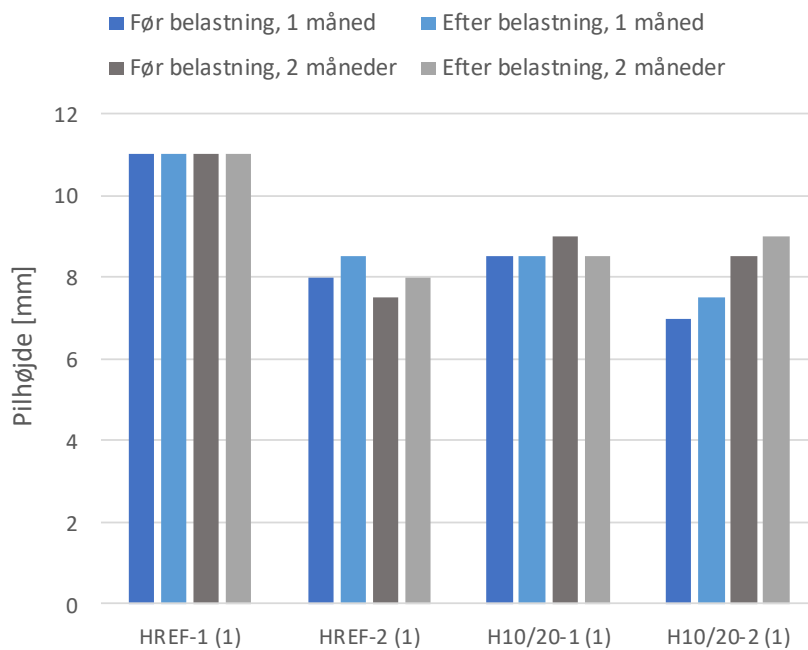


Figur 32: Forsøgsopstilling til fuldskala deformationsmåling med belastning.

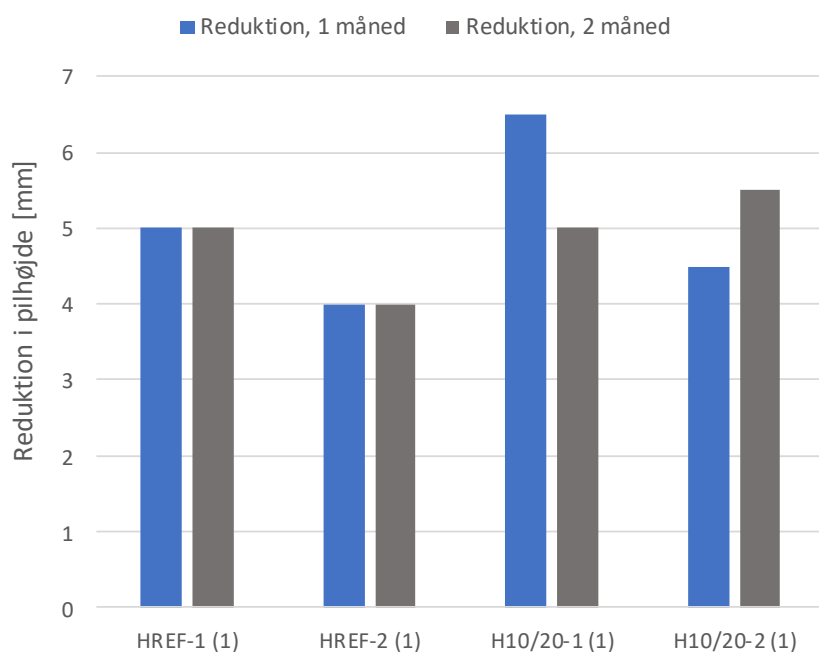


Figur 33: Forsøgsopstilling til fuldskala deformationsmåling, hvor det ses, at ballasten udelukkende ligger på den midterste trælægte.

Pilhøjden er målt før belastning, under belastning og efter belastning. Resultaterne fremgår af Figur 34 og Figur 35. Der er enkelte målte resultater, som ikke er som forventet, dette kan muligvis tilskrives den måleusikkerhed der har været i forsøget.



Figur 34: Pilhøjden før og efter belastning målt 1 måned (blå) og 2 måneder (grå) efter støbning.



Figur 35: Reduktion i pilhøjden under belastning målt 1 måned (blå) og 2 måneder (grå) efter støbning.

Der blev inden belastning konstateret lineindglidning, som kan have indflydelse på den målte pilhøjde. Lineindglidningen er derfor målt før belastning og efter aflastning, jf. Tabel 7 og Tabel 8. Kravet til maksimal lineindglidning er ifølge EN 1168 2 mm målt som gennemsnittet for én plade ende og 3 mm for enkelt liner. Af resultaterne ses det, at lineindglidningen er størst for elementerne med den mindste pilhøjde, hvilket også er forventeligt. Lineindglidningen er stort set ens før og efter aflastning, derfor vurderes resultaterne for deformation at være brugbare.

Tabel 7: Lineindglidning målt på elementer 1 måned efter støbning.

Beton ID	Inden belastning [mm]	Efter aflastning [mm]
HREF-1	1,9	2,0
HREF-2	4,3	4,3
H10/20-1	1,9	2,1
H10/20-2	3,3	3,3

Tabel 8: Lineindglidning målt på elementer 2 måneder efter støbning.

Beton ID	Inden belastning [mm]	Efter aflastning [mm]
HREF-1	2,1	2,1
HREF-2	4,4	4,5
H10/20-1	2,3	2,4
H10/20-2	3,5	3,6

Af resultaterne i Figur 24 fremgår det, at betonen med genanvendte tilslag har det laveste E-modul, dermed må det også forventes, at pilhøjden inden belastning er større og modsat, at pilhøjden efter belastning er lavere. Grundet lineindglidningen, er det svært at vurdere betydningen af det reducerede E-modul på pilhøjden før belastning. Udregnes reduktionen i pilhøjden under belastning er den gennemsnitlige reduktion 4,5 mm for referencen og 5,5 mm for genbrugsbetonen for målingen udført 1 måned efter støbning, tilsvarende fås en reduktion på 4,5 mm for reference og 5,3 mm for genbrugsbetonen for målingen udført 2 måneder efter støbning. Med en forskel på de målte E-moduler efter 28 døgn på 8%, jf. afsnit 4.2.4, burde reduktionen i pilhøjden være 4,9 mm for H10/20 når reduktionen for HREF er 4,5 mm. Eftersom alle målinger er lavet til nærmeste halve mm, vurderes det, at resultaterne stemmer godt overens indenfor den forventede usikkerhed. Dermed viser målingerne, at genbrugsbetonens lavere E-modul har en betydning for den målte pilhøjde, når huldækkene belastes.

4.2.9. Forskydningsbæreevne

I forhold til test af forskydningsbæreevne, hvor belastning øges til brud, har lineindglidning en væsentlig indflydelse på testresultatet og derfor blev de første producerede testemner kasseret. Til måling af forskydningsbæreevnen har CRH Concrete i stedet støbt 4 fire nye testemner, herunder 2 stk. testplader med referencebeton og 2 stk. testplader med genbrugsbeton samt Ø100 cylindere til måling af trykstyrken. Resultaterne for trykstyrken (HREF (2) og H10/20 (2)) fremgår af Tabel 9 sammen med trykstyrkerne for første støbningen (HREF (1) og H10/20 (1)). Her ses det, at trykstyrken for genbrugsbetonen er faldet hvorimod trykstyrken for referencen er nogenlunde ens. Dermed er forskellen mellem styrkerne for referencen og genbrugsbetonen øget yderligere.

Tabel 9: Trykstyrke målt for første blanding brugt til fuldskala deformationsmålinger (1) og for anden blanding brugt til forskydningsbæreevne (2).

Beton ID	Trykstyrke [MPa]	
	1 døgn	28 døgn
HREF (1)	43,4	76,7
HREF (2)	39,7	77,6
H10/20 (1)	40,7	65,3
H10/20 (2)	27,5	58,2

For at kunne sammenligne resultaterne fra forskydningstesten, er der foretaget en beregning af, hvilken forskydningsbæreevne som forventes ved de aktuelle trykstyrker målt efter 28 døgn. Den forventede forskydningsbæreevne fremgår af Tabel 10 sammen med de målte forskydningsbæreevner. Forsøgsopstillingen er vist i Figur 36.

Tabel 10: Forventet forskydningsbæreevne (beregnet ud fra de målte trykstyrker ved 28 døgn) og den målte forskydningsbæreevne.

Beton ID	Forventet forskydningsbæreevne [kN]	Målt forskydningsbæreevne [kN]
HREF (2)	218,7	236,7
H10/20 (2)	192,7	206,8

Den forventede forskydningsbæreevne for H10/20 er 12% mindre end den for HREF. Til sammenligning er den målte forskydningsbæreevne for H10/20 13% mindre end den for HREF. Det forventede forhold mellem forskydningsbæreevnen for referencen og genbrugsbetonen vurderes på baggrund af resultaterne at være opnået, hvilket betyder, at hvis trykstyrken er ens, vil forskydningsbæreevnen for en referencebeton og en genbrugsbeton ligeledes forventes at være ens. Forskydningsbæreevnen for begge betoner er tilfredsstillende i forhold til producentens krav på 192,3 kN.



Figur 36: Forsøgsopstilling anvendt til måling af forskydningsbæreevne hos CRH Concrete.

5. Genanvendelse af spildbeton fra fabriksbeton

5.1. Udvikling af recepter

5.1.1. Prøvningsprogram

Der er i projektet udviklet 2 fabriksbetonrecepter med genanvendte tilslag fra spildbeton baseret på en referencerecept til passiv eksponeringsklasse fra DK Beton. Der er blandet 40 L beton af hver recept, og de friske egenskaber er målt over tid. Der er desuden støbt 10 stk. Ø100 cylindere til bestemmelse af styrkeudviklingen. Udvikling og dokumentation af recepter er foregået på Teknologisk Institut og dannede baggrund for fuldskalaforsøgene udført hos DK Beton.

5.1.2. Recepter

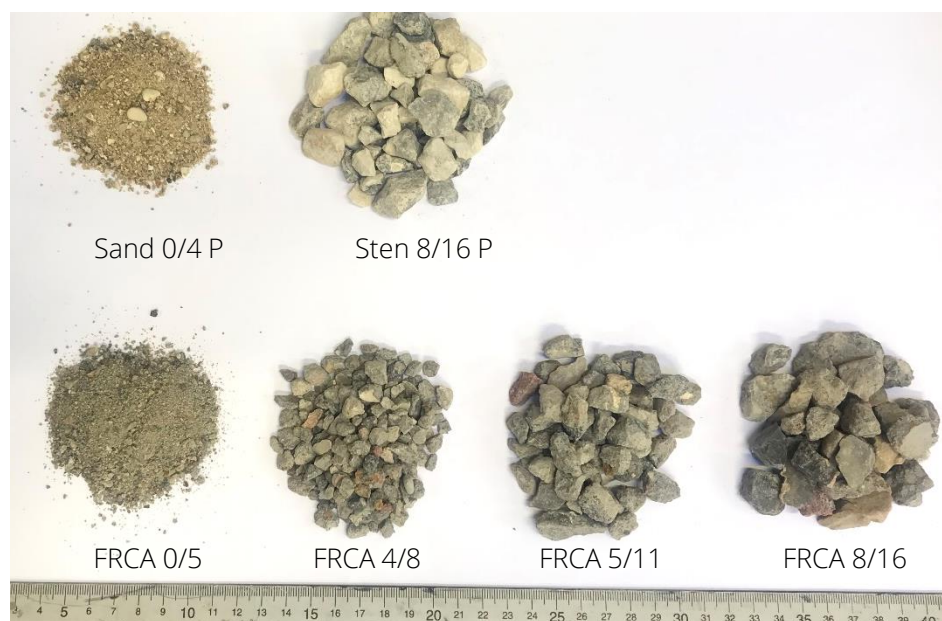
Der er i projektet taget udgangspunkt i en recept anvendt hos DK Beton. Recepten er tilpasset produktionsbetingelserne hos Teknologisk Institut således at den ønskede bearbejdelighed er opnået. De udviklede recepter fremgår af Tabel 11. Der er i alle 3 recepter anvendt samme pastasammensætning og -indhold. Der er arbejdet med en erstatningsgrad på 10% af den fine fraktioner og 10% af den grove fraktion (navngivet F10/10), samt 10% af den fine- og 20% af den grove fraktion (navngivet F10/20). Erstatningsgraderne er i forhold til massen af tilslag, men den samlede tilslagsvolumen er samtidig holdt konstant. Tilslaget er vist i Figur 37.

Tabel 11: Recepter med tilslag i vot-tilstand. FREF = reference, F10/10 = genbrugsbeton med erstatning af 10% fint- og 10% groft tilslag og F10/20 = genbrugsbeton med erstatning af 10% fint- og 20% groft tilslag.

Materiale	Beton ID	Indhold [kg/m ³]		
		FREF	F10/10	F10/20
Cement		190	190	190
Emifiller		47,6	47,6	47,6
Vand		158	158	158
Sand 0/4 P		896	802	800
Sten 8/16 P		961	860	763
FRCA 0/5		0	89,1	88,9
FRCA 2/8		0	23,9	47,7
FRCA 5/11		0	23,9	47,7
FRCA 8/16		0	47,8	95,4
Plast		1,9	1,9	1,9
Superplast		2,1	2,1	2,1

v/c forhold* [-]	0,84	0,84	0,84
Densitet [kg/m ³]	2257	2246	2242

* Bemærk at filleren ikke medregnes i v/c forholdet.



Figur 37: Genanvendte tilslag fra spildbeton fra fabriksbetonproduktionen (nederst) og jomfruelige tilslagsmaterialer (øverst). RCA står for "recycled concrete aggregates".

5.1.3. Støbning

Der er blandet 40 L beton af hver recept på en Eirich R08W laboratorieblender, se Figur 38. Tilslagene er 24 timer inden blanding blevet blandet med al blandevand, for at sikre at tilslaget absorbere den mængde vand der svarer til den målte absorption. Der er anvendt følgende blandedprocedure:

- 00s Tilslag og vand blandes
- 30s Tilslag og vand får lov at trække
- 150s Cement tilsættes
- 180s Plastificering tilsættes
- 210s Der blandes i yderligere 120 sekunder

Efter blanding er der støbt 10 stk. Ø100 cylindere som umiddelbart efter støbning er placeret i et klimakontrolleret rum med en temperatur på 20 °C. Emnerne er 24 timer efter støbningen blevet afformet og placeret i vandkar ved 20 °C indtil måling af trykstyrke og E-modul.



Figur 38: Blander anvendt til blanding af fabriksbeton.

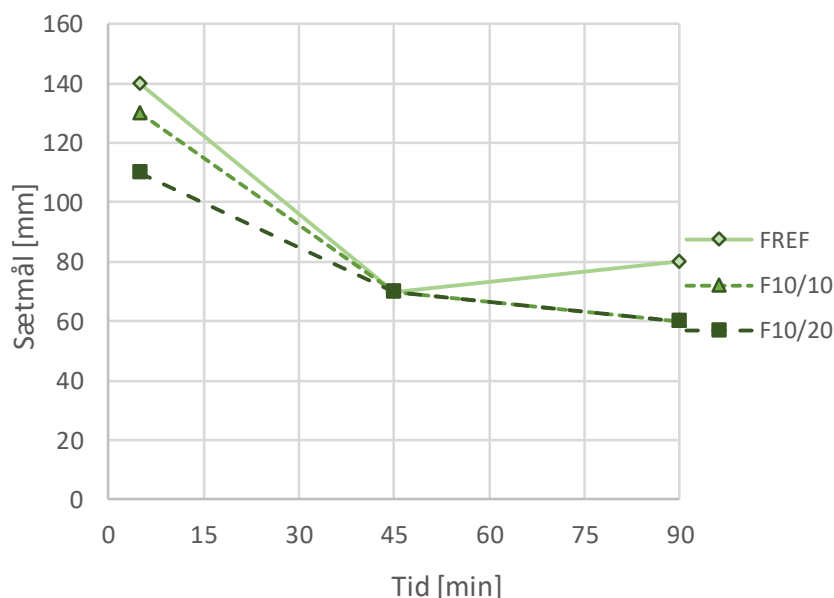
5.1.4. Luftindhold

Luftindholdet er bestemt iht. DS/EN 12350-7 for hver recept 5 minutter efter blanding. Luftindholdet har stor betydning for den målte trykstyrke, og derfor ønskes samme totale luftindhold i alle blandinger. For de 3 recepter er der målt følgende luftindhold:

- FREF: 1,3%
- F10/10: 1,4%
- F10/20: 1,3%

5.1.5. Sætmål

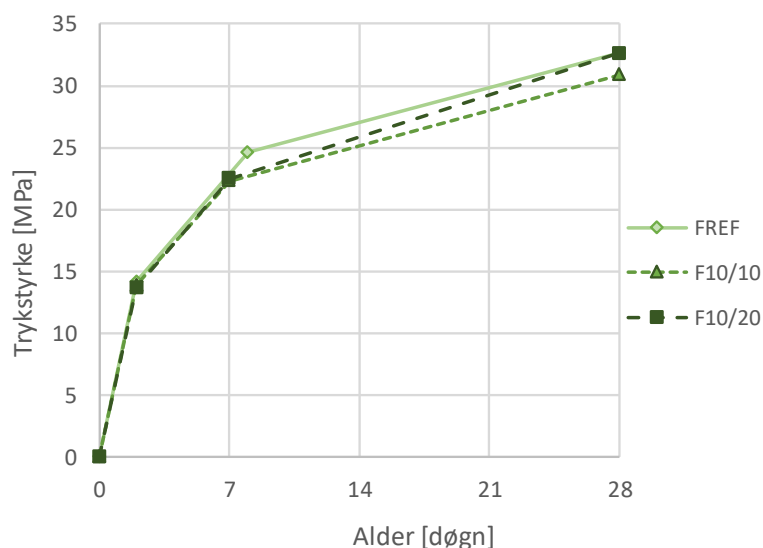
Sætmålet er bestemt iht. DS/EN 12350-2 for hver recept 5, 45 og 90 minutter efter blanding, resultaterne fremgår af Figur 39. Sætmålet er 5 minutter efter støbning højest for FREF og laveste for F10/20. Der ses en lavere bearbejdelighed umiddelbart efter blanding, når dele af det naturlige tilslag erstattes med det genanvendte tilslag. Forskellen i bearbejdelighed hænger bl.a. sammen med tilslaget form og kornkurve, hvor der for den nedknuste fabriksbeton ses et højere indhold af finstof, end der normalt ses i naturligt tilslag jf. Figur 9.



Figur 39: Målt sætmål som en funktion af tiden.

5.1.6. Styrkeudvikling

Styrkeudviklingen er målt efter 2, 7 (8 for HREF) og 28 modenhedsdøgn iht. DS/EN 12390-3 på 3 stk. Ø100 cylindere pr. termin. Resultaterne fremgår af Figur 40. Alle resultater ligger inden for et relativt snævert interval, og der fremgår ikke at være nogen ændring i styrkerne efter erstatning af dele af det naturlige tilslag med genanvendte tilslag.



Figur 40: Styrkeudvikling for fabriksbeton støbt på Teknologisk Institut.

5.2. Fuldskalaforsøg

5.2.1. Prøvningsprogram

Fuldskalastøbningen er udført på DK Betons fabrik i Køge. Der er taget udgangspunkt i recepterne udviklet hos Teknologisk Institut, jf. afsnit 5.1.2. Prøvningerne er delvist udført hos DK Beton og hos Teknologisk Institut. Prøvningerne omfatter:

- Luftindhold iht. DS/EN 12350-7 (DK Beton)
- Sætmål iht. DS/EN 12350-2 (DK Beton)
- Styrkeudvikling og udvikling i elasticitetsmodul iht. DS/EN 12390-3 og DS 423.25 (Teknologisk Institut)
- Svind iht. grundlæggende principper i DS 434.6:1989 med modificeringer (Teknologisk Institut)

5.2.2. Recepter

Der er taget udgangspunkt i referencerecepten, FREF og recepten med 10% fint og 20% groft genanvendt tilslag, F10/20, jf. afsnit 5.1.2. Recepterne er i forbindelse med støbningen justeret for at tilpasse produktionsudstyret hos DK Beton. Der er desuden tilsat luftindblandingsmiddel. Recepterne fremgår af Tabel 12.

Tabel 12: Blanderapporter med tilslag i vot-tilstand. HFREF = reference til passiv miljøeksponering, H10/20 = genbrugsbeton.

Materiale	Beton ID	Indhold [kg/m ³]	
		FREF	F10/20
Cement		196	189
Filler		48,5	47,0
Vand		163	161
Sand 0/4 P		853	755
Sten 8/16 P		917	717
FRCA 0/5		-	80,4
FRCA 2/8		-	41,3
FRCA 5/11		-	40,7
FRCA 8/16		-	90,5
Plast		2,01	1,94
Superplast		0,74	0,71
Luftindblanding		0,46	0,44

v/c forhold [-]	0,85	0,86
Densitet [kg/m ³]	2181	2125
Erstatning af fint tilslag [% massen]	0	9,6
Erstatning af groft tilslag [% massen]	0	19,4

* Bemærk at filleren ikke medregnes i v/c forholdet.

5.2.3. Støbning

Støbningen af fabriksbeton foregik på DK Betons fabrik i Køge den 08-10-2018. Det genanvendte tilslag er afvejet og tilsat blandingen manuelt. Efter blanding blev betonen tømt ud i en betonbil, se Figur 41. Der er støbt 16 stk. Ø100 cylindere af hver recept samt 2 stk. prismer af FREF og 3 stk. prismer af F10/20

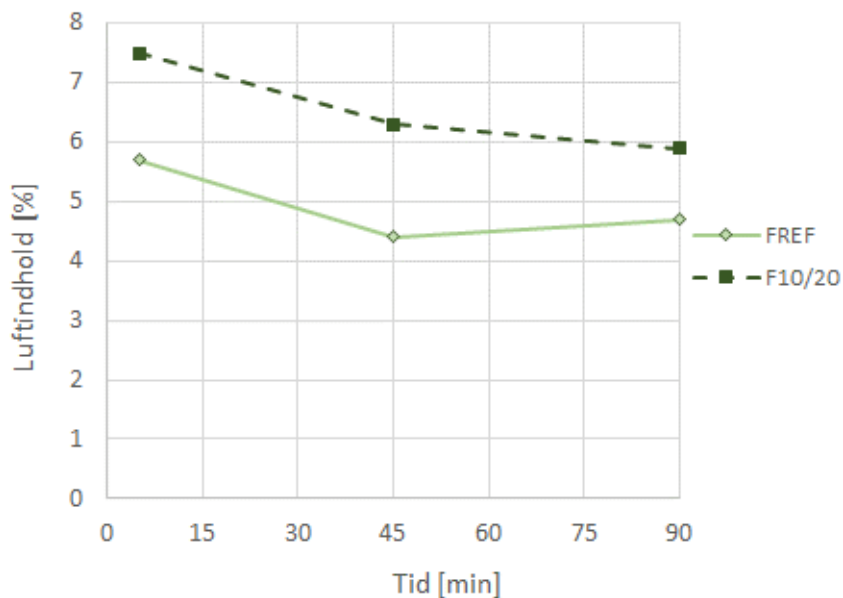
med dimensionerne 100x100x400 mm til måling af svind. Cylinderne er afformet efter 24 timer og placeret i vandkar ved 20 °C.



Figur 41: Støbning af beton hos DK Beton.

5.2.4. Luftindhold

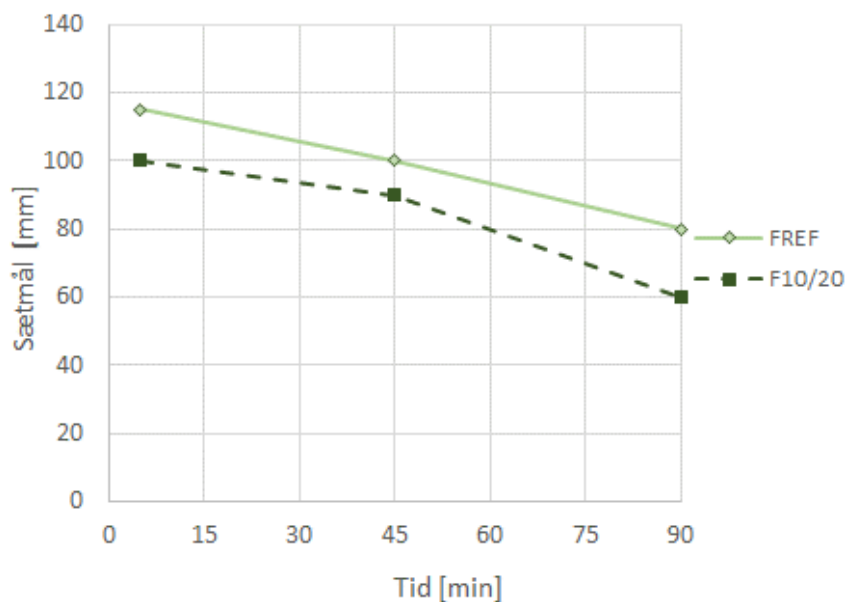
Luftindholdet er bestemt iht. DS/EN 12350-7 for hver recept 5, 45 og 90 minutter efter blanding. Resultatet fremgår af Figur 42, hvoraf det ses, at luftindholdet er størst for genbrugsbetonen, samt at ændringen over tid er tilnærmelsesvis ens for de to betoner



Figur 42: Luftindholdet i den friske beton målt over tid.

5.2.5. Sætmål

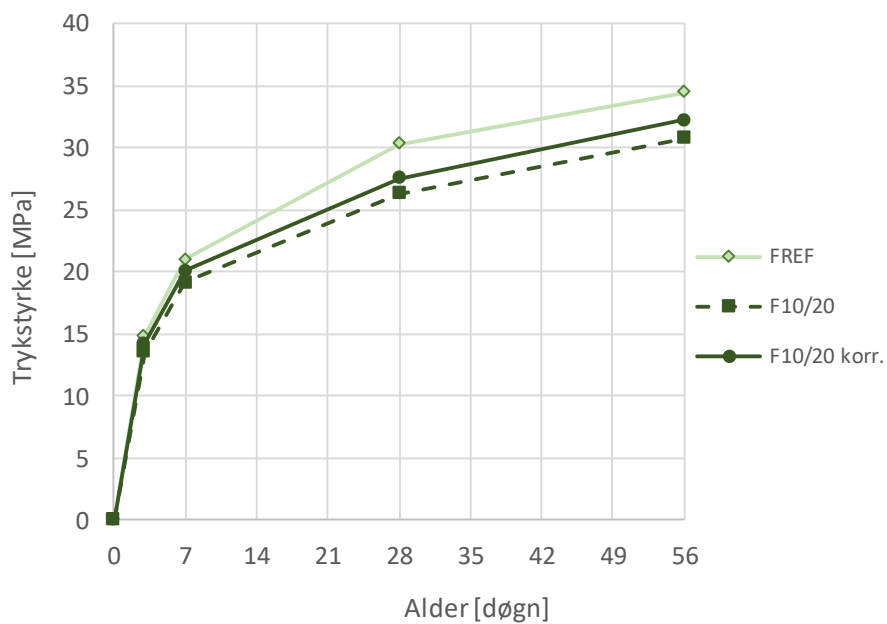
Sætmålet er bestemt iht. DS/EN 12350-2 for hver recept 5, 45 og 90 minutter efter blanding, resultaterne fremgår af Figur 43. Sætmålet er generelt 10-20 mm lavere for genbrugsbetonen, hvilket stemmer godt overens med resultaterne opnået i forbindelse med receptudviklingen. Reduktionen i sætmål er nogenlunde ens for de to betoner.



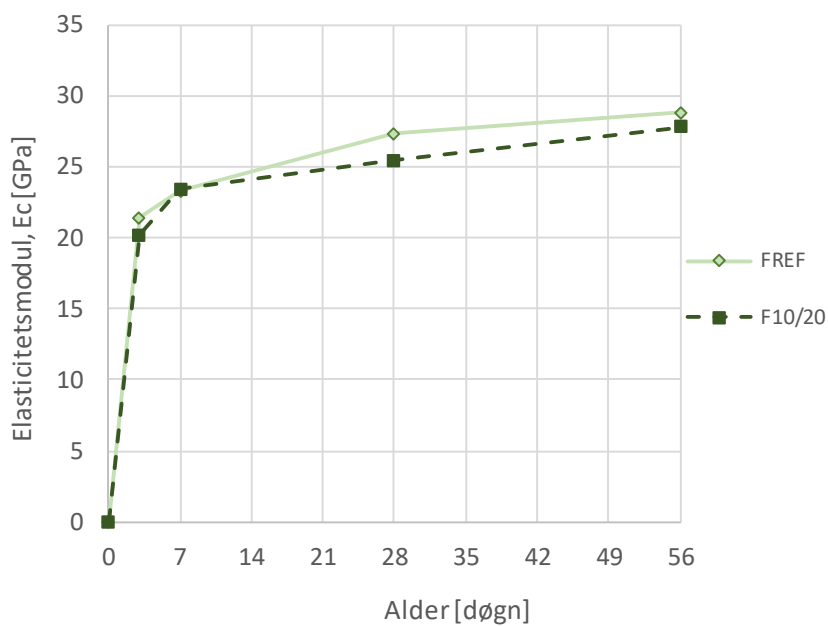
Figur 43: Sætmål målt over tid.

5.2.6. Styrkeudvikling og udvikling i elasticitetsmodul

Styrkeudviklingen og udviklingen i elasticitetsmodul er målt efter 3, 7, 28 og 56 modenhedsdøgn iht. DS/EN 12390-3 og DS 423.25 på i alt 4 stk. Ø100 cylindere pr. termin. Resultaterne fremgår af Figur 44 og Figur 45. Trykstyrken for genbrugsbetonen, F10/20 er efter 56 døgn 10,7 % lavere end referencen, FREF. Korrigeres der for forskellen i luftindhold målt efter 90 minutter iht. Bolomeys korrigerede formel, er trykstyrken for F10/20 6,4% lavere end den for FREF. E-modulet for F10/20 er desuden også en smule lavere end det målt for FREF.



Figur 44: Styrkeudvikling for fabriksbeton støbt hos DK Beton. F10/20 korr. er den forventede trykstyrke i henhold til Bolomeys formel, hvis luftindholdet målt efter 90 minutter, var det samme som for FREF.



Figur 45: Udvikling i E-modul for fabriksbeton støbt hos DK Beton.

5.2.7. Svind

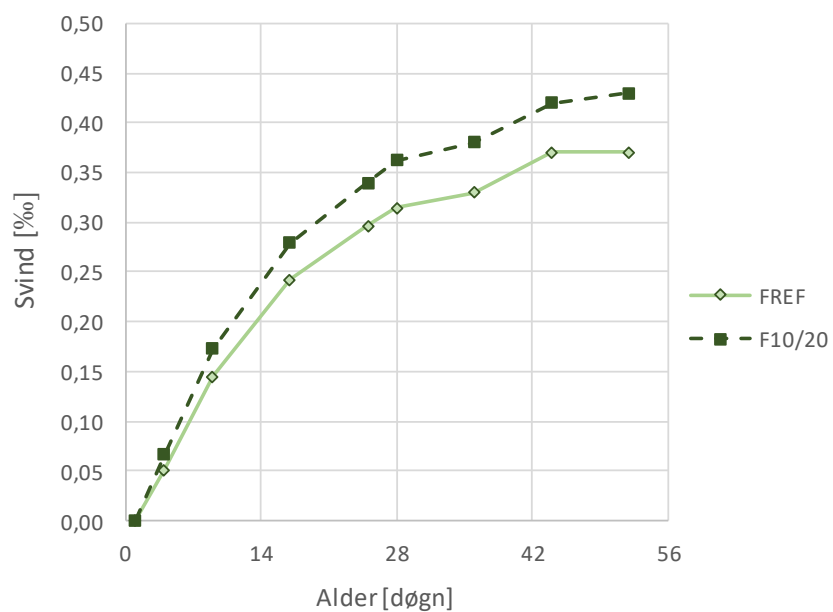
Betonernes svind er målt efter grundlæggende principper beskrevet i DS 434.6:1989 med modificeringer. Målingerne er udført på 2 prøveemner for FREF og 3 prøveemner for F10/20 med dimensionerne 100x100x400 mm.

Prøveemnerne er afformet 1 døgn efter udstøbning og umiddelbart efter placeret i klimarum ved 23°C og 50% RH. Svindmålingen er begyndt efter prøveemnerne er placeret i klimarummet og efterfølgende gentaget hver uge indtil differencekriteriet fra DS 434.6:1989 som minimum er opfyldt. Differencekriteriet defineres som opfyldt når længdeændringen, som middelværdi af de sidste tre uger, er mindre end eller lig med 0,02‰. Betonens svind defineres som gennemsnittet af de sidste 4 målinger til og med differencekriteriets opfyldelse.

Der er brugt en referencestang med nominel længde på 415mm. Den effektive længde mellem måletapperne, dvs. referencelængden for svindbestemmelsen, er for de testede prøveemner 348 mm.

Svindforløbet er vist i Figur 46, hvor der ses et lidt større svind for betonen med genanvendte tilslag. Et øget svind kan potentielt medføre flere revnedannelser i betonen. Svindet bestemt iht. til definitionen i DS 434.6:1989 bliver:

- FREF: 0,35 ‰
- F10/20: 0,40 ‰

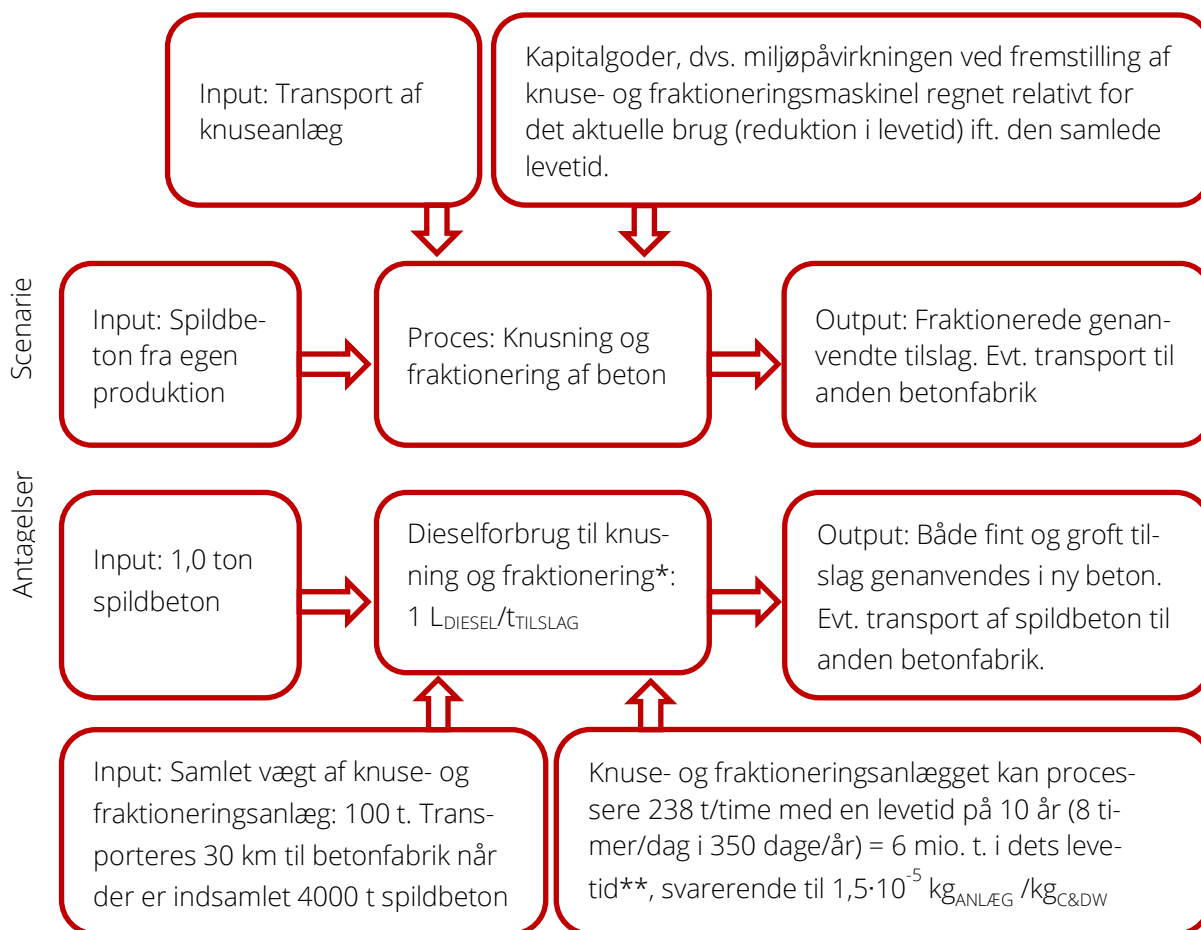


Figur 46: Målt svind som funktion af antal dage efter støbning.

6. Miljødata

6.1. Genanvendte betontilslag

Miljøpåvirkningen forbundet med produktionen af 1 ton nedknust betontilslag af spildbeton fra egen produktion er beregnet vha. GaBi værktøjet. Det er antaget, at et mobilt knuse- og fraktioneringsanlæg transporteres til betonproducentens fabrik, hvor spildbetonen processeres til tilslag når der er indsamlet 4000 t spildbeton. Det anvendte scenarie med tilhørende antagelser er illustreret i Figur 47.



Figur 47: Processeringsscenarie og antagelser anvendt til udregning af miljødata for genanvendte betontilslag.

*Dieselforbruget i forbindelse med knusning og fraktionering er baseret på oplysninger fra betonproducenterne involveret i projektet. Andre knuse- og fraktioneringsanlæg kan have et andet forbrug.

**Datakilde: Coelho, A., & de Brito, J. (2013). Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal--Part I: energy consumption and CO2 emissions. Waste Management, 33(5), 1258–67. doi:10.1016/j.wasman.2013.01.025

De nødvendige LCA datasæt er blevet hentet fra GaBi databasen. Vurdering af miljøpåvirkningen er blevet udført på basis af den af EU anbefalede ILCD metode inklusive PEF (Product Environmental Footprint) videreudviklingen.

De beregnede miljødata fremgår af Tabel 13. Dataene kan bruges som input til udregning af miljøvaredeklarerationer på beton, hvor nedknust beton fra egen spildproduktion genanvendes som tilslag i ny beton. Resultaterne er ikke tredjepartsverificerede. Bemærk at der i ISO-standard 14044 er krav til tredjepartsovervågning, såfremt resultaterne skal anvendes til markedsføring med sammenlignende påstande.

Data kan derimod ikke umiddelbart anvendes til en vurdering af, hvilken metode for håndtering og genanvendelse af spildbetonen der er miljømæssigt mest fordelagtigt, f.eks. nyttiggørelse som ubudne bærelag kontra genanvendelse som tilslag i ny beton. Ved denne type vurdering, bør miljøpåvirkningen af hvordan betonen alternativt ville blive genanvendt eller nyttiggjort medregnes.

Tabel 13: Miljøpåvirkning for produktion af 1 ton genanvendte tilslag fra egen spildbeton.

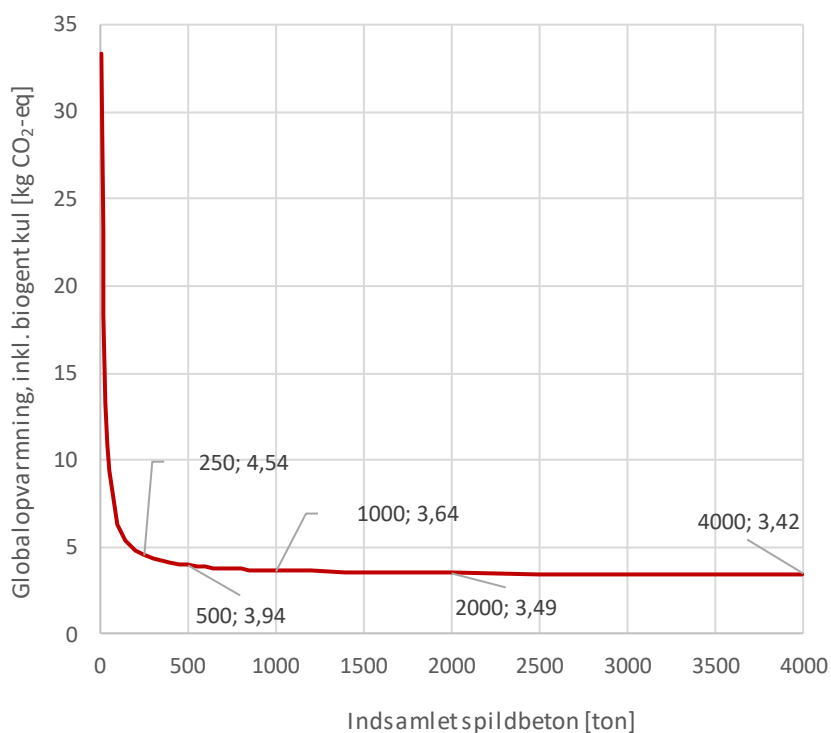
Miljøparameter	Enhed	Transport af knuse- og fraktioneringsanlæg	Dieselforbrug til processering	Knuse- og fraktioneringsanlæg	Total
Forsuring	[Mole H+ eq.]	4,49E-04	3,52E-02	2,81E-04	3,59E-02
Global opvarmning, ekskl. biogent kul	[kg CO2-eq.]	7,41E-02	3,31E+00	3,27E-02	3,42E+00
Global opvarmning, inkl. biogent kul	[kg CO2-eq.]	7,49E-02	3,31E+00	3,26E-02	3,42E+00
Økotoxicitet, ferskvand	[CTUe]	1,12E-02	4,13E+00	1,85E+00	5,99E+00
Eutrofiering, ferskvand	[kg P-eq.]	3,65E-07	1,53E-04	4,37E-05	1,97E-04
Eutrofiering, saltvand	[kg N-eq.]	2,22E-04	1,52E-02	4,10E-05	1,55E-02
Eutrofiering, jord	[Molf N-eq.]	2,40E-03	1,66E-01	4,08E-04	1,69E-01
Human toksicitet, cancer effekt	[CTUh]	4,57E-10	9,14E-08	3,72E-08	1,29E-07
Human toksicitet, ikke-cancer effekt	[CTUh]	5,19E-09	1,75E-07	7,84E-08	2,59E-07
Ioniserende stråling, Human eksponering	[kBq U235 eq.]	2,00E-04	2,27E-01	1,80E-03	2,29E-01
Jordkvalitet	[kg C deficit eq.]	4,60E-02	8,37E+00	5,32E-02	8,47E+00
Nedbrydning af ozonlaget	[kg CFC-11 eq.]	2,14E-17	6,07E-07	2,01E-09	6,09E-07
Emissioner af partikel	[kgPM2,5-eq.]	1,27E-05	4,42E-03	6,17E-05	4,49E-03
Fotokemisk ozondannelse	[kg NMVOC]	4,08E-04	4,57E-02	1,62E-04	4,63E-02
Nettoforbrug af ferskvand	[m³ eq.]	8,41E-05	3,69E-03	2,98E-04	4,07E-03
Udtynding af ressourcer	[kg Sb-Equiv.]	2,69E-08	1,96E-05	5,61E-06	2,52E-05

Da alle produktionssteder ikke nødvendigvis har mulighed for at nedknuse spildbetonen og/eller genanvende den, er det muligt at tilføje den forventede miljøpåvirkning ved transport af betonen til f.eks. en central lokalitet for nedknusning og genanvendelse. Miljøpåvirkningen for transport af 1 ton beton 1 km fremgår af Tabel 14.

Tabel 14: Miljøpåvirkning for transport af spildbeton/genanvendte tilslag til anden betonfabrik pr. ton beton pr. km.

Miljøparameter	Enhed	Transport af spildevand/genanvendte tilslag, 1 km
Forsuring	[Mol H+ eq.]	4,70E-04
Global opvarmning, ekskl. biogent kul	[kg CO2-eq.]	7,65E-02
Global opvarmning, inkl. biogent kul	[kg CO2-eq.]	7,73E-02
Økotoxicitet, ferskvand	[CTUe]	1,16E-02
Eutrofiering, ferskvand	[kg P-eq.]	3,78E-07
Eutrofiering, saltvand	[kg N-eq.]	2,32E-04
Eutrofiering, jord	[Mol N-eq.]	2,53E-03
Human toksicitet, cancer effekt	[CTUh]	4,73E-10
Human toksicitet, ikke-cancer effekt	[CTUh]	5,38E-09
Ioniserende stråling, Human eksponering	[kBq U235 eq.]	2,07E-04
Jordkvalitet	[kg C deficit eq.]	4,75E-02
Nedbrydning af ozonlaget	[kg CFC-11 eq.]	2,21E-17
Emissioner af partikel	[kgPM2,5-eq.]	1,36E-05
Fotokemisk ozondannelse	[kg NMVOC]	4,28E-04
Nettoforbrug af ferskvand	[m ³ eq.]	8,70E-05
Udtynding af ressourcer	[kg Sb-Equiv.]	2,78E-08

I miljødataene i Tabel 13, er det antaget, at der samles 4000 ton spildbeton inden knusning. I Figur 48 er betydningen af mængden af indsamlet spildbeton ved knusning på miljøparameteren "Globalopvarmning inkl. biogent kul". illustreret. Grafen viser en eksponentiel stigning i CO₂-udleningen ved faldende mængde af indsamlet spildbeton. Hvis der f.eks. i stedet er indsamlet 2000 ton, bliver der udledt 2,2 % mere kg CO₂-eq pr. ton genanvendte tilslag. Indsamles der derimod kun 250 ton bliver der udledt 32,9 % mere.

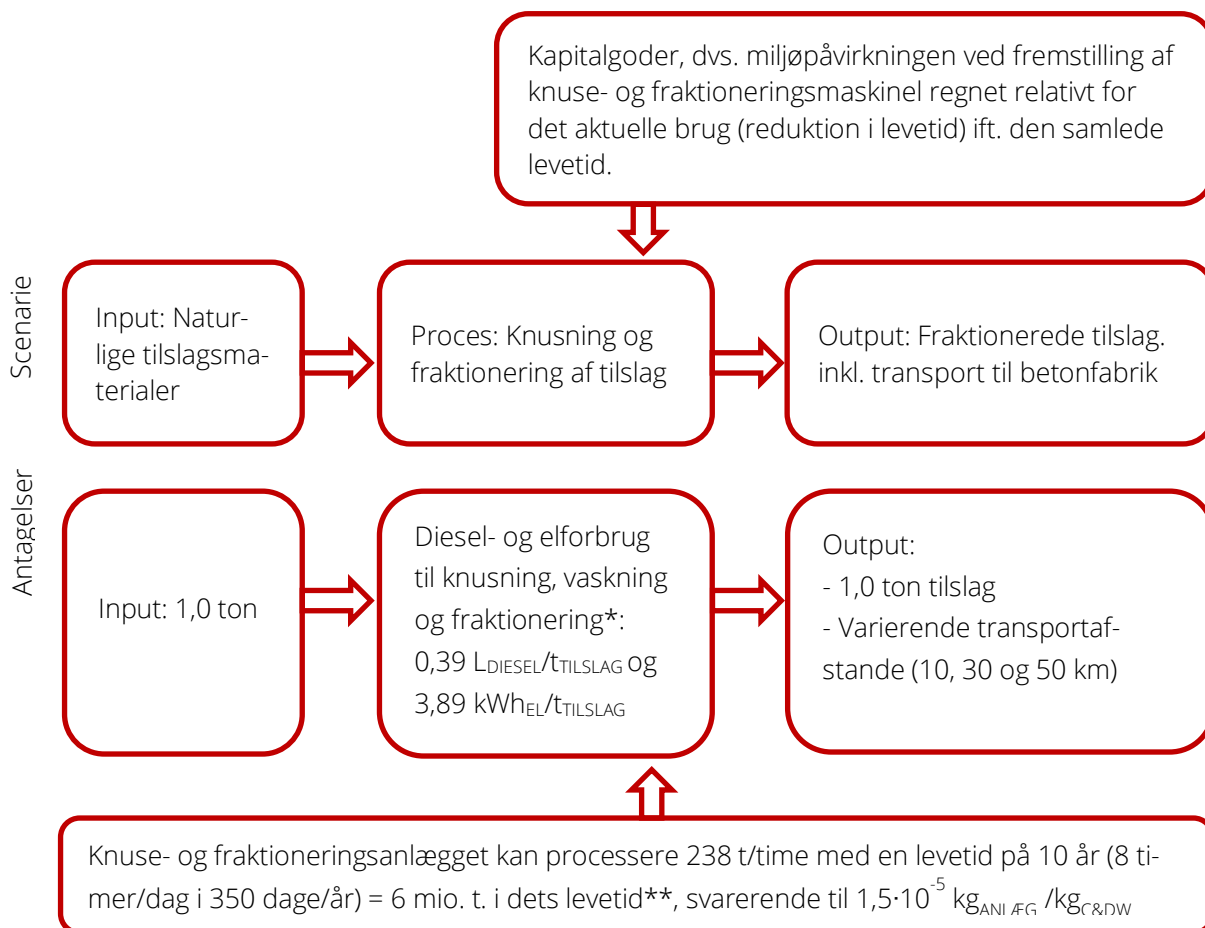


Figur 48: Total CO₂ udledning pr. ton produceret genanvendte tilslag som en funktion af mængden af indsamlet spildbeton ved knusning .

6.2. Jomfruelige tilslag

Miljøpåvirkningen forbundet med produktionen af 1 ton jomfruelige tilslag fra grusgrav er beregnet vha. GaBi værktøjet.

Det er antaget, at der anvendes et stationært knuse-, vaske- og fraktioneringsanlæg hos tilslagsproducenten samt genanvendt vand. Det anvendte scenarie med tilhørende antagelser er illustreret i Figur 49.



Figur 49: Processeringsscenarie og antagelser anvendt til udregning af miljødata for jomfrueligt tilslag.

*Diesel- og elforbruget i forbindelse med processeringen af tilslag er baseret på oplysninger fra en tilslagsleverandør til en af projektets medvirkende betonproducenter. Andre anlæg kan have et andet forbrug.

**Datakilde: Coelho, A., & de Brito, J. (2013). Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal--Part I: energy consumption and CO2 emissions. Waste Management, 33(5), 1258–67. doi:10.1016/j.wasman.2013.01.025

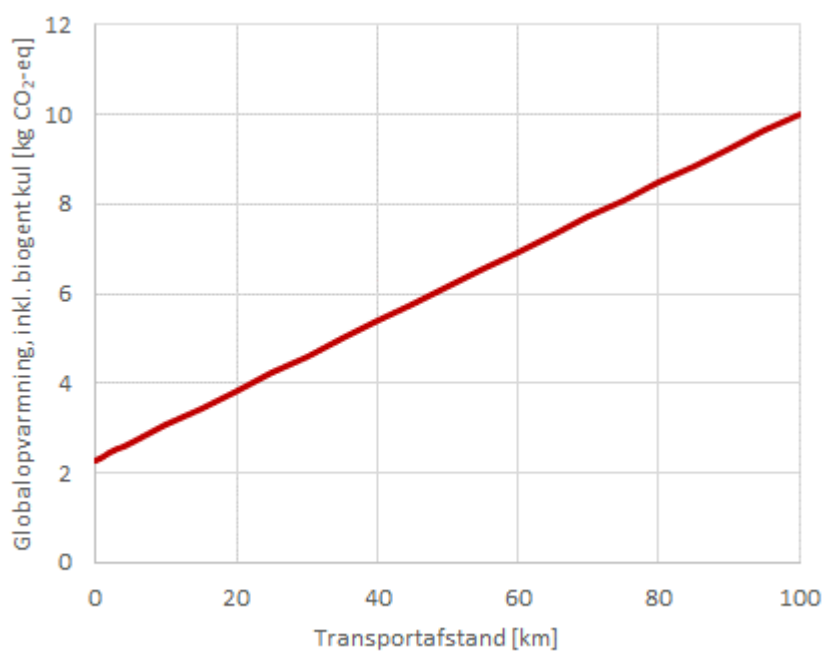
De nødvendige LCA datasæt er blevet hentet fra GaBi databasen. Vurdering af miljøpåvirkningen er blevet udført på basis af den af EU anbefalede ILCD metode inklusive PEF (Product Environmental Footprint) videreudviklingen.

De udregnede miljødata ekskl. transport fremgår af Tabel 15. Resultaterne er ikke tredjepartsverificerede.

Tabel 15: Miljøpåvirkning for produktion af 1 ton jomfruelige tilslag (ekskl. transport).

Miljøparameter	Enhed	Diesel- og elforbrug til processering	Knuse- og fraktioneringsanlæg	Total ekskl. transport
Forsuring	[Mole H+ eq.]	1,55E-02	2,81E-04	1,58E-02
Global opvarmning, ekskl. biogent kul	[kg CO2-eq.]	2,26E+00	3,27E-02	2,29E+00
Global opvarmning, inkl. biogent kul	[kg CO2-eq.]	2,26E+00	3,26E-02	2,29E+00
Økotoxicitet, ferskvand	[CTUe]	1,65E+00	1,85E+00	3,51E+00
Eutrofiering, ferskvand	[kg P-eq.]	6,46E-05	4,37E-05	1,08E-04
Eutrofiering, saltvand	[kg N-eq.]	6,53E-03	4,10E-05	6,57E-03
Eutrofiering, jord	[Molf N-eq.]	7,05E-02	4,08E-04	7,09E-02
Human toksicitet, cancer effekt	[CTUh]	3,69E-08	3,72E-08	7,41E-08
Human toksicitet, ikke-cancer effekt	[CTUh]	9,61E-08	7,84E-08	1,75E-07
Ioniserende stråling, Human eksponering	[kBq U235 eq.]	2,07E-01	1,80E-03	2,09E-01
Jordkvalitet	[kg C deficit eq.]	3,97E+00	5,32E-02	4,02E+00
Nedbrydning af ozonlaget	[kg CFC-11 eq.]	2,39E-07	2,01E-09	2,41E-07
Emissioner af partikel	[kgPM2,5-eq.]	1,81E-03	6,17E-05	1,87E-03
Fotokemisk ozondannelse	[kg NMVOC]	1,92E-02	1,62E-04	1,94E-02
Nettoforbrug af ferskvand	[m³ eq.]	1,73E-02	2,98E-04	1,75E-02
Udtynding af ressourcer	[kg Sb-Equiv.]	1,02E-05	5,61E-06	1,58E-05

I Figur 50 er betydningen af transportafstanden af tilslaget til betonproducenten på miljøparameteren "Globalopvarmning inkl. biogent kul". illustreret. Grafen viser en lineær stigning i CO₂-udledningen ved stigende transportafstande. Ved en transportafstand på cirka 29,7 km bliver CO₂-udledningen for transporten lige så stor, som udledningen ved produktionen af tilslaget, dvs. den samlede udledning bliver fordoblet.



Figur 50: Total CO₂ udledning pr. ton produceret tilslag som en funktion af transportafstanden til betonproducenten.

De udregnede miljødata inkl. 10, 30 og 50 km transport fremgår af Tabel 16. Resultaterne er ikke tredjepartsverificerede. Bemærk at der i ISO-standard 14044 er krav til tredjepartsverificering, såfremt resultaterne skal anvendes til markedsføring med sammenlignende påstande.

Tabel 16: Miljøpåvirkning for produktion af 1 ton jomfruelige tilslag (inkl. transport).

Miljøparameter	Enhed	Total, inkl. 10 km transport	Total, inkl. 30 km transport	Total, inkl. 50 km transport
Forsuring	[Mol H+ eq.]	2,05E-02	2,99E-02	3,93E-02
Global opvarmning, ekskl. biogent kul	[kg CO2-eq.]	3,06E+00	4,59E+00	6,12E+00
Global opvarmning, inkl. biogent kul	[kg CO2-eq.]	3,06E+00	4,61E+00	6,16E+00
Økotoksicitet, ferskvand	[CTUe]	3,63E+00	3,86E+00	4,09E+00
Eutrofiering, ferskvand	[kg P-eq.]	1,12E-04	1,19E-04	1,27E-04
Eutrofiering, saltvand	[kg N-eq.]	8,89E-03	1,35E-02	1,82E-02
Eutrofiering, jord	[Mol N-eq.]	9,62E-02	1,47E-01	1,97E-01
Human toksicitet, cancer effekt	[CTUh]	7,88E-08	8,83E-08	9,78E-08
Human toksicitet, ikke-cancer effekt	[CTUh]	2,29E-07	3,36E-07	4,44E-07
Ioniserende stråling, Human eksponering	[kBq U235 eq.]	2,11E-01	2,15E-01	2,19E-01
Jordkvalitet	[kg C deficit eq.]	4,50E+00	5,45E+00	6,40E+00
Nedbrydning af ozonlaget	[kg CFC-11 eq.]	2,41E-07	2,41E-07	2,41E-07
Emissioner af partikel	[kgPM2,5-eq.]	2,01E-03	2,28E-03	2,55E-03
Fotokemisk ozondannelse	[kg NMVOC]	2,37E-02	3,22E-02	4,08E-02
Nettoforbrug af ferskvand	[m³ eq.]	1,84E-02	2,01E-02	2,19E-02
Udtynding af ressourcer	[kg Sb-Equiv.]	1,61E-05	1,66E-05	1,72E-05