



Miljø- og
Ligestillingsministeriet
Miljøstyrelsen

Fremtidens cementprodukter baseret på genanvendte byggematerialer MUDP-projekt

MUDP Rapport

Marts 2025

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Signe Strange Grønberg – Teknologisk Institut

Jennifer Anette Canul Polanco – Teknologisk Institut

Benjamin Alexander Regaard Ebert – Teknologisk Institut

Emil Damgaard-Møller – Teknologisk Institut

Chi-Manh Tran – Saint-Gobain Weber A/S

Henrik Hansen – RGS Nordic A/S

Rasmus Brødsgaard Buch – RGS Nordic A/S

ISBN: 978-87-7038-721-7

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram

Projektet, som er beskrevet i denne rapport, er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet, der støtter udvikling, test og demonstration af miljøteknologi.

MUDP investerer i udvikling af fremtidens miljøteknologi til gavn for klima og miljø i Danmark og globalt, samtidig med at dansk vækst og beskæftigelse styrkes. Programmet understøtter dels den bredere miljødagsorden, herunder rent vand, ren luft og sikker kemi, men understøtter også regeringens målsætninger inden for klima, biodiversitet og cirkulær økonomi.

Det er MUDP's bestyrelse, som beslutter, hvilke projekter der skal modtage tilskud. Bestyrelsen betjenes af MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen.

MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5, 5000 Odense | Tlf. +45 72 54 40 00

Mail: ecoinnovation@mst.dk
[MUDP's hjemmeside](#)

Denne slutrapport er godkendt af MUDP, men det er alene rapportens forfatter/projektlederen, som er ansvarlige for indholdet. Rapporten må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord	6
1. Sammenfatning og konklusion	7
2. Introduktion	9
2.1 Hvad er beton?	9
2.1.1 Hydratisering af Portlandcement	9
2.2 Tilslagets rolle i beton	9
2.3 Vigtigheden af sand for miljøet	10
3. Beton med genanvendt tilslag	11
3.1 Betonstandarder for beton med genanvendt tilslag	11
3.1.1 Anvendelse af genanvendt tilslag iht. DS 206:2024	11
3.1.1.1 Eksponeringsklasser og miljøpåvirkninger	12
3.2 Overvejelser i forbindelse med genanvendt tilslag	13
4. Nedknusning og bearbejdning af beton	15
4.1 Proces for udvælgelse, nedknusning og indledende bearbejdning af beton	15
4.1.1 Screening og udvælgelse af oparbejdningsteknologier	16
4.1.1.1 Nedknusning	16
4.1.1.2 Frasortering af finmaterialet	17
4.2 Analyser af neddelt betonfraktion	17
4.2.1 Mikroskopianalyse af tyndslib af neddelt beton	18
4.2.2 Kornstørrelsesfordeling – opdeling via sigtetårn	19
4.3 Frasortering af finmaterialet fra neddelt beton	20
4.3.1 Opbygning af aspirator med cyklon	21
4.3.2 Effekten af aspiratorbearbejdning på kornstørrelsesfordeling	21
5. Teststøbning med neddelt beton som erstatning for sand	24
5.1 Baggrund for udførelse af tests på prøvestøbninger	25
5.1.1 Mekaniske tests: Trykstyrke og bøjningsstyrke	25
5.1.2 Flydemål	26
5.2 Data fra mørtelteststøbninger med neddelt beton som fint tilslag	27
5.2.1 Diskussion af data	28
5.3 Bestemmelse af fugtindhold og vandabsorption af neddelt betonprøver	29
5.3.1 Bestemmelse af fugtindhold	30
5.3.2 Bestemmelse af absorption og korndensitet	30
5.3.2.1 Metode 1: Desorptionsisoterm	31
5.3.2.2 Metode 2: EN 1097-6:2013	32
5.3.2.3 Resultatet af de to metoder	33
5.3.3 Måling af cementpastaindhold	33
5.4 Opsummering og konklusion på baggrund af data	35
6. Vurdering af omkostninger og forretningspotentiale	36
6.1 Forretningsmodel for neddelt betonaffald som erstatning for naturligt sand	38
6.2 Situationer, hvor genanvendt tilslag vil være en økonomisk rentabel løsning	39

6.3	Afsluttende bemærkninger	39
7.	Referencer	41
	Bilag 1.Risikovurderinger	42
Bilag 1.1	Risikomatrice – Nedknusning	42
Bilag 1.2	Risikomatrice – Teknologi til frasortering af finmaterialet	43

Forord

Dette er slutrapporten for projektet "Fremtidens cementprodukter baseret på genanvendte byggematerialer". Projektet var et samarbejde mellem Saint-Gobain Weber A/S, RGS Nordic A/S og Teknologisk Institut med det formål at undersøge mulighederne for at anvende genanvendt byggeaffald, i form af den finkelte betonaffaldsfraktion, som erstatning for naturligt sand i produktionen af højkvalitetscementprodukter hos Saint-Gobain Weber.

Projektet blev støttet af Miljøstyrelsens MUDP-program og havde en planlagt løbetid på to år fra starten af 2023. I løbet af projektperioden valgte to af projektets partnere at lukke projektet før tid, idet de vurderede, at det ikke var muligt at skabe en fælles, rentabel forretning på projektets resultater. Den forventede businesscase var således ikke tilstrækkelig attraktiv på grund af de høje omkostninger, der er forbundet med oparbejdning af den finkelte betonfraktion, og på grund af udfordringer med at opretholde den ønskede kvalitet og ensartethed i de producerede mørtelprodukter. Hertil kom en relativt høj CAPEX, som ikke umiddelbart stod mål med det forventede forretningspotentiale.

Projektledeisen blev varetaget af Signe Strange Grønberg, Teknologisk Institut, og det primære arbejde i projektet er udført af Chi-Manh Tran og Bruno Jensen (Saint-Gobain Weber A/S), Henrik Hansen, Rasmus Brødsgaard Buch og Ebbe Tubæk Naamansen (RGS Nordic A/S) samt Jennifer Anette Canul Polanco, Benjamin Alexander Regaard Ebert, Emil Damgaard-Møller, Allan Robertson Petersen og Jonas Palle (Teknologisk Institut).

Projektet løb i perioden februar 2023 til april 2024 med økonomisk støtte fra Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP), som administreres af Miljøstyrelsen.

1. Sammenfatning og konklusion

Dette projekt havde til formål at undersøge mulighederne for at genanvende den findelte fraktion (≤ 4 mm, efterfølgende refereret til som sandfraktion) af nedknust betonaffald som erstatning for naturligt sand i produktionen af høj kvalitetscementprodukter hos Saint-Gobain Weber. Motivationen bag projektet var at reducere forbruget af naturligt sand, da overudnyttelse af denne ressource kan medføre alvorlige konsekvenser for økosystemer, biodiversitet og klima. Ved at genanvende byggeaffald, som fx beton fra nedrevne bygninger, kan man potentielt mindske behovet for sandsugning og fremme en mere cirkulær økonomi inden for byggebranchen.

I projektets start screenedes forskellige teknologier til nedknusning og sortering af betonaffald. Baseret på en risikovurdering valgtes en slagleknuser til nedknusning, efterfulgt af en aspirator med cyklon til frasortering af dele af finmaterialet ($< 74 \mu\text{m}$) fra den resterende sandfraktion (≤ 4 mm). Den oparbejdede sandfraktion blev analyseret ved mikroskopi, og kornstørrelsesfordelingen blev karakteriseret med sigtetårn. Analyserne viste, at sandfraktionen af den knuste beton bestod af sandkorn og cementpasta med et højt indhold af finmateriale, som delvist kunne frasorteres ved brug af aspirator med cyklon.

For at teste den oparbejdede sandfraktions egnethed som erstatning for naturligt sand blev der udført en række teststøbninger af mørtel (cement, vand og sand), hvor 100 % af sandet blev erstattet med den oparbejdede sandfraktion. De støbte mørtelprøver blev testet for mekaniske egenskaber som trykstyrke og bøjningsstyrke, og frisk mørtel blev testet for egenskaber såsom flydemål. Resultaterne blev sammenlignet med en referencemørtel med fintilsag bestående af naturligt sand frem for genanvendt tilsag.

Resultaterne viste lovende tendenser, idet den støbte mørtel med oparbejdet, genanvendt, sandfraktion som tilsag, overordnet set havde egenskaber, som opfyldte minimumskravene ved 100 % erstatning af sandet. Derudover viste det sig, at fjernelse af dele af finmaterialet ($< 0,74$ mm) ved hjælp af aspirator med cyklon forbedrede mørtlens styrke. Dog observerede man variationer i styrke og flydemål mellem forskellige nedknusningsbatcher, hvilket primært tilskrives forskelle i fugtindhold i den genanvendte sandfraktion.

På baggrund af projektets resultater konkluderede man, at det teknisk set er muligt at anvende den findelte betonfraktion som erstatning for naturligt sand i cementprodukter, forudsat at fugtindholdet og indholdet af finmateriale i fraktionen kontrolleres og ensrettes. Dette vil kræve yderligere udvikling af metoder til at opnå en ensartet kvalitet af den oparbejdede fraktion. Her til kom, at tørringsomkostninger for den neddelte betonfraktion ville resultere i en for høj CAPEX såvel som OPEX for den samlede proces.

Overordnet set viser projektet, at genanvendelse af betonaffald som erstatning for sand i cementprodukter er en lovende mulighed for at reducere forbruget af naturligt sand og fremme cirkulariteten inden for byggebranchen. Dog er der stadig tekniske og økonomiske udfordringer, der skal overvindes, før konceptet kan implementeres i større skala. Yderligere forskning og udvikling er nødvendig for at optimere processerne, ensrette materialeegenskaberne og forbedre den økonomiske bæredygtighed.

To af projektets partnere ønskede på baggrund af forretningsmodellen for processen ikke at fortsætte projektet. Det blev vurderet, at teknologien ikke var økonomisk rentabel for projektets partnere på nuværende tidspunkt. De høje omkostninger forbundet med oparbejdning af betonfraktionen samt den relativt lave pris på naturligt sand udgjorde for de to partnere en betydelig udfordring for den økonomiske bæredygtighed af konceptet. På baggrund heraf blev projektet lukket tidligere end planlagt.

2. Introduktion

2.1 Hvad er beton?

Beton er et af de mest anvendte byggematerialer i verden (Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources., 2019). Betons enestående egenskaber gør den velegnet til en lang række konstruktioner, fra bygninger og broer til veje og dæmnings. Overordnet set består beton af fire hovedingredienser:

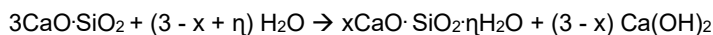
Beton = cement + vand + sand (fint tilslag) + sten (groft tilslag)

Når disse komponenter blandes, danner de en plastisk masse, der hærdner og opnår en stenhård konsistens. Cementen, der typisk er af typen Portlandcement, fungerer som bindemiddel og reagerer kemisk med vandet til en pasta, der binder tilslaget sammen. Tilslaget, der udgør op imod 80 % af betonblandingsens volumen, består af både sand og sten i forskellige størrelser.

Når betonblandingen hærdner, finder der en kemisk reaktion sted mellem cementen og vandet, der får blandingen til at størkne og opnå sin endelige styrke i en proces som kaldes hydratisering.

2.1.1 Hydratisering af Portlandcement

Portlandcementklinker består primært af calciumsilikater som Ca_3SiO_5 (tricalciumsilikat), Ca_2SiO_4 (dicalciumsilikat), $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ (tricalciumaluminat) og $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ (tetracalcium aluminoferrit). Når cementen blandes med vand, finder der en række kemiske reaktioner sted, hvor calciumsilikaterne og calciumaluminatet opløses og danner hydratiseringsprodukter, hvor den primære reaktion er:



Hydratiseringen af tricalciumsilikat er kompleks, hvor reaktionsproduktet er calciumsilikathydrater (Hewlett, 2019). De dannede calciumsilikathydrater udgør de primære, bindende faser i den hærdede cementpasta, der holder tilslaget sammen og giver betonen dens styrke. Hydratiseringsprocessen er eksotermisk og udvikler varme, hvilket påvirker reaktionshastigheden. Når betonblandingen hærdner, finder hydratiseringsreaktionen sted gradvist over en længere periode. Denne proces kan tage flere uger eller måneder, afhængigt af de givne forhold såsom temperatur og fugtighed. Den endelige styrke afhænger af graden af hydratisering og af forholdet mellem de forskellige råmaterialer og materialernes kvalitet. Betonens trykstyrke afhænger i høj grad af forholdet mellem vand og cement (v/c), og generelt gælder det, at jo lavere v/c, jo højere styrke (Nielsen, 2016).

Ved at variere blandingsforholdet, cementtypen og tilslagsmaterialerne kan man designe beton med vidt forskellige egenskaber, der er tilpasset de konkrete krav til en given konstruktion. Alsidigheden, tilgængeligheden, styrken og den relativt lave pris er nogle af årsagerne til, at beton er et af de mest udbredte byggematerialer i verden i dag.

2.2 Tilslagets rolle i beton

Tilslaget, som udgør op imod 80 % af betonens samlede volumen, alt efter betontype, består af både en fin- og en grovfraction – hhv. sand og sten. Det er vigtigt, at tilslaget sammensættes, så det passer til betonens anvendelse. Tilslagets type, form, størrelse og graderingssam-

mensætning (fordeling af kornstørrelser i tilslaget) har indflydelse på betons mekaniske egenskaber. Et velgraderet tilslag, der består af partikler i forskellige størrelser, giver en tæt kornpakning, hvilket bevirker, at man kan anvende en mindre mængde cementpasta. For at opnå høj betonstyrke skal tilslaget desuden have høj kornstyrke (Munch-Petersen, 2013).

Sandet, der udgør en mindre fraktion af tilslaget, bidrager således til at udfylde hullerne mellem de større stenfraktioner og giver dermed en mere kompakt struktur og en højere styrke. Sandet skal også indeholde partikler af forskellig størrelse (fint til groft sand) for yderligere at højne pakningstætheden og herved betonens styrke. Omvendt kan for meget fint sand medføre et øget vandbehov og dermed svække betonblandingen. Derudover påvirker sandkornenes form og overflade betonens bearbejdelighed og vedhæftning til cementpastaen. Ru og kantede sandpartikler giver bedre binding til cementpastaen, mens afrundede sandkorn nedsætter friktionen og forbedrer bearbejdeligheden. Sandets renhed er også vigtig, da urenheder, som fx ler, kan forringe betonens egenskaber.

Tilslagets grovfraktion, sten, bidrager primært med styrke. Stærke stenmaterialer som granit eller basalt giver en højere trykstyrke end svagere materialer som kalksten eller letklinkenødder. Omvendt kan anvendelse af letvægstilslag, som internt hærdningsmedie, have en positiv effekt på betons evne til at modstå revnedannelse.

Den korrekte tilslagskvalitet og -sammensætning, herunder den rette sandblanding, er således essentiel for at opnå de ønskede mekaniske egenskaber i beton. Ved at vælge det rette tilslag sammen med det rette design af betonmix kan der designes en beton, der er stærk, sej, bearbejdelig og holdbar nok til at modstå de påvirkninger, betonen udsættes for i brugstiden.

Når det som i nærværende projekt ønskes at udskifte tilslagets finfraktion, sand, med neddelt betonaffald, bør der være særlig fokus på styrke og bearbejdelighed, da netop disse egenskaber i væsentlig grad påvirkes af tilslagets finfraktion.

2.3 Vigtigheden af sand for miljøet

Sand er en af verdens mest udnyttede naturressourcer, kun overgået af vand. Årligt udvindes der globalt omkring 50 milliarder tons sand, svarende til 18 kg pr. verdensborger dagligt (Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources., 2019). Sand er en essentiel råvare i mange industrier, herunder cementproduktion, betonproduktion, glas- og solcellefremstilling.

Efterspørgslen på sand er så enorm, at den ikke kan imødekommes med naturlige ressourcer som sand og grus uden negative konsekvenser for økosystemer, særligt i floddeltaer og kystområder, hvor sandsugning kan forårsage erosion, nedbrydning af habitater og tab af biodiversitet (The UK Green Building Council, 2024).

Det er derfor nødvendigt at finde alternativer til naturligt sand. Nærværende projekt har som mål at anvende betonaffald, f.eks. fra nedrevne bygninger, som erstatning for sand i produktionen af ny beton. Ved at genanvende det nedbrudte byggeaffald i stedet for sand kan forbruget af naturligt sand nedbringes og således mindske den miljømæssige påvirkning ved produktion af beton.

3. Beton med genanvendt tilslag

For at mindske miljøaftrykket fra betonproduktion ses der i dag eksempler på, at tilslag genanvendes, fx ved at erstatte dele af tilslaget med neddelt betonaffald (genanvendt tilslag). Det er primært det grove tilslag i form af sten, som erstattes med genanvendt tilslag. Udfordringen med at anvende neddelt beton som erstatning for den fine tilslagsfraktion, sand, er imidlertid, at det nedbrudte betonaffald ofte har anderledes egenskaber end sand. Det gælder blandt andet, hvad angår evnen til absorption af vand, indhold af finmateriale (særligt i form af cementpasta), kornformer, kornstørrelsesfordeling samt overflademorfologi generelt, hvilket gør det vanskeligt at anvende det nedbrudte betonaffald direkte som erstatning for sand i høj kvalitetsprodukter. Derfor kræver det udvikling af nye oparbejdningsmetoder og produktrecepter at kunne udnytte betonaffaldet optimalt som erstatning for sand i cementbaserede produkter.

Det er derfor vigtigt, at det fine, genanvendte tilslag skal kunne oparbejdes til en reproducerbar, ensartet fraktion mht. mængden af cementpasta samt form og størrelsesfordeling af partiklerne. Det er forventeligt, at visse reformuleringer af beton- og mørtelrecepter kan være nødvendige, da de nuværende recepter er tilpasset egenskaberne ved naturligt sand.

3.1 Betonstandarder for beton med genanvendt tilslag

Hvilke krav og standarder en beton med genanvendt tilslag skal opfylde, afhænger af den påtænkte anvendelse af betonen. For en lang række anvendelser skal betonen opfylde den europæiske standard EN 206 2013+A2:2021 samt den danske standard DS 206:2024, som indeholder supplerede krav og præciseringer for anvendelsen af EN 206 2013+A2:2021 i Danmark. Tilslag anvendt til beton skal opfylde kravene i den harmoniserede standard EN 12620 + A1:2008; det gælder også genanvendt tilslag.

Når en standard er harmoniseret, skal produktet CE-mærkes for at kunne bringes på markedet. Det er desuden ikke tilladt at stille nationale krav til en harmoniseret standard. Formålet med harmoniserede standarder er at lette handlen på tværs af grænser i EU.

Standarderne indeholder bl.a. krav til produktion, testmetoder, kvalitetssikring og egenskaber af tilslag og beton. Det er også et krav, at standarderne overholdes ved brug af genanvendt tilslag, hvilket er essentielt for, at den mere cirkulære beton kan fungere som et reelt alternativ til traditionel beton. Beton med genanvendt tilslag skal således som minimum overholde samme krav som en beton med naturligt tilslag. Standarderne bidrager bl.a. til at sikre tilfredsstillende kvalitet og holdbarhed.

3.1.1 Anvendelse af genanvendt tilslag iht. DS 206:2024

En række af de krav, som stilles til tilslagets egenskaber og til betonens sammensætning, kan findes i det danske tillæg til EN 206 2013+A2:2021, DS 206:2024 i hhv. annekse E og F. EN 206 2013+A2:2021 angiver også forslag hertil; forslag som dog udelukkende er informative, hvorfor det er kravene i DS 206:2024, som er gældende.

Standarden angiver flere typer af tilslag, herunder naturligt tilslag, procestilslag, genanvendt tilslag, højovnsslagge, let tilslag og kalcineret flint. Hver type tilslag har forskellige egenskaber og anvendelsesområder. For genanvendt tilslag stilles der krav om, at det stammer fra beton anvendt til konstruktioner, eller beton, som opfylder kravene til beton iht. DS 206:2024. Dvs.

tilslaget som udgangspunkt ikke må komme fra betonrør, betonbrønde, betonbelægningsprodukter, porebeton, puds eller mørtel fra murværkskonstruktioner.

Kravene i DS 206:2024 afhænger af, hvilke miljøer betonen skal anvendes i. Som minimum kræves det dog, at følgende egenskaber dokumenteres for sandfraktionen (kornstørrelse ≤ 4 mm), hvoraf der også stilles specifikke krav til enkelte af egenskaberne:

- Sortering af tilslag
- Kornstørrelsesfordeling
- Indhold af finstof
- Densitet og vandabsorption
- Volumenstabilitet
- Kloridindhold og vandopløselige alkalier
- Syreopløseligt sulfat
- Totalt svovlindhold
- Organisk materiale.

DS 206:2024 tillader brugen af genanvendt tilslag, men med visse begrænsninger. Blandt andet tillader standarden op til 20 % (masse) knust beton i groft tilslag og 10 % i fint tilslag uden krav til ekstra test af betonen. For at bruge højere erstatningsgrader kræves yderligere dokumentation og tests, men så tillades til gengæld op til 100 % erstatning af både fint og groft tilslag. Standarden er under løbende revision, og fremtidige versioner kan ændre disse bestemmelser.

3.1.1.1 Eksponeringsklasser og miljøpåvirkninger

Den europæiske standard, EN 206 2013+A2:2021, definerer en række eksponeringsklasser, som beskriver forskellige miljøer, som beton kan blive udsat for. Den danske standard DS 206:2024 giver eksempler på eksponeringer i dansk miljø, som passer til de forskellige eksponeringsklasser, og grupperer eksponeringsklasserne i fire grupper af såkaldte miljøpåvirkninger. Miljøpåvirkningen er bl.a. afgørende for krav til tilslag og betonens mixdesign, idet kravene bidrager til at sikre, at betonens holdbarhed er tilfredsstillende ved anvendelse under den pågældende miljøpåvirkning. Eksempler på påvirkninger, som en beton skal kunne modstå, er klorider fra havvand, frost eller kemisk påvirkning.

De fire miljøpåvirkninger kaldes Passiv, Moderat, Aggressiv og Ekstra Aggressiv. Beton fra disse kategorier omtales derfor ofte som P-, M-, A- eller E-beton. Eksempler på forskellige miljøer omfattet af de respektive miljøpåvirkninger er opsummeret i TABEL 1.

TABEL 1. Oversigt over betonkategorier og eksempler på miljø, som de forskellige kategorier af beton skal kunne modstå.

Miljøpåvirkning	Betontype	Eksponeringsklasser	Eksempel på miljø
Passiv	P-beton	• X0, XC1	• Indendørs uden fugt • Udendørs uden frost eller kemiske påvirkninger og enten tørt eller permanent vådt
Moderat	M-beton	• XC2, XC3, XC4 XF1, XA1	• Udendørs udsat for moderat vandmætning og frost • Indendørs med høj luftfugtighed
Aggressiv	A-beton	• XD1, XS1, XS2 XF2, XF3, XA2	• Permanent kontakt med havvand og saltholdig jord • Høj vandmætning kombineret med frost • Kontakt med luftbåret klorid
Ekstra Aggressiv	E-beton	• XD2, XD3, XS3 XF4, XA3	• Meget aggressive kemiske miljøer • Beton udsat for tørsalt eller sprøjt fra havvand • Svømmebassiner

Genanvendt tilslag kan kun bruges i P-beton, medmindre producentens produktionskontrollsystem sikrer, at tilslaget udelukkende stammer fra beton, som efterlever kravene til miljøpåvirkningen svarende til den ønskede anvendelse, fx kan dokumenteret, neddelt A-beton anvendes som tilslag i ny P, M og A-beton, men ikke i E-beton.

3.2 Overvejelser i forbindelse med genanvendt tilslag

På baggrund af standarderne EN 206:2013 + A2:2021 og DS 206:2024 er der gjort følgende overvejelser vedr. anvendelse af genanvendt sandfraktion af tilslag.

Valg af miljøpåvirkning

Når der anvendes genanvendt tilslag, skal producenten, som tidligere nævnt, kunne garantere, at det genanvendte tilslag udelukkende stammer fra beton med samme klassificering. Dvs. at det til alt andet end P-beton kræves, at tilslaget stammer fra en sporbar kilde med samme klassificering. Det blev i projektgruppen besluttet at arbejde mod at fremstille P-beton og således ikke afgrænse projektet til en bestemt betonklasse for det genanvendte tilslag, men derimod kunne anvende alle klasser neddelt beton som fintilslag i ny P-beton. Dog er det værd at nævne at der grundet den højere værdi af E-beton ift. P-beton opnås den maksimale, relative værdiskabelse ved at genanvende neddelt E-beton i E-beton og neddelt P-beton i P-beton for at undgå nedklassificering af betonfraktionen. Valget af P-beton er truffet som et kompromis mellem volumen og kvalitet og hermed pris af det endelige produkt samt det tilgængelige volumen af sporbar beton. Således ekskluderes muligheden for i projektet at udvikle M-, A- og E-beton med genanvendt tilslag.

Volumen og forretningspotentiale

På baggrund af produktionsvolumen af det endelige produkt hos Saint-Gobain Weber samt det tilgængelige volumen af sporbart P-beton hos RGS Nordic blev det vurderet, at det for at øge volumen og mindske udgifterne skulle være den fulde sandfraktion ≤ 4 mm, som skulle indgå i projektets produktudvikling (se afsnit 4.2).

Opbevaring og bearbejdning af neddelt beton

Grundet betonens evne til at suge vand i betonens cementpasta og det faktum, at det genanvendte tilslags fugtindhold er central for vand/cement-forholdet og dermed også for trykstyrken af de nye, cementbaserede produkter, blev det vurderet, at den neddelte beton skulle opbevares under tag forud for sortering. Store variationer i det genanvendte tilslags fugtindhold kan gøre det mere udfordrende at styre den nødvendige vandmængde i nye cementbaserede produkter. Denne opbevaring var dog utilstrækkelig til at styre det genanvendte tilslags fugtindhold (se afsnit 4). Da ikke kun fugt optaget fra luften, men også den iboende mængde vand i betonaffaldet forud for nedknusning varierede kraftigt, var lufttørring under tag var utilstrækkeligt til at sikre et ensartet og tilstrækkeligt lavt fugtindhold i den nedledte beton. Ydermere påvirkede fugtindholdet i den neddelte beton sorteringen, som det beskrives i kapitel 3.

Mængde af erstattet tilslag

Selvom DS 206 tillader at anvende 100 % erstatning af det naturlige tilslag med genanvendt tilslag, er det forventeligt, at mængden af genanvendt tilslag, som fortsat sikrer, at produkterne overholder alle krav til betonens egenskaber, kan variere på tværs af produktporteføljen.

Udvælgelse af produkter til genanvendt tilslag

Beton har mange forskellige anvendelsesmuligheder. Der er beton, som anvendes i konstruktioner, men også beton, som anvendes til facader, belægningsprodukter, rør og brønde. Desuden anvendes mørtel (som svarer til beton men uden tilsat sten) til fx pudsning og vedhæftning af klinker. Grundet den varierende farve af et genanvendt tilslag blev det vurderet, at produkter med krav til æstetik, som fx poleringsbeton, ikke skulle indgå som en del af de betontyper,

hvor i dele af tilslaget skulle være baseret på genanvendt tilslag, da der for æstetisk beton stilles krav til ensartethed i produktet og ingen batch-til-batch-variation i udseende.

4. Nedknusning og bearbejdning af beton

Den nedrivningsbeton, der indleveres til RGS Nordic består ofte af store stykker beton, oftest med dimensioner af flere meter; fx beton, som har fungeret som bærende vægge i en konstruktion. Betonen kan være blandet med andre materialer såsom armering eller glasuld (se FIGUR 1).

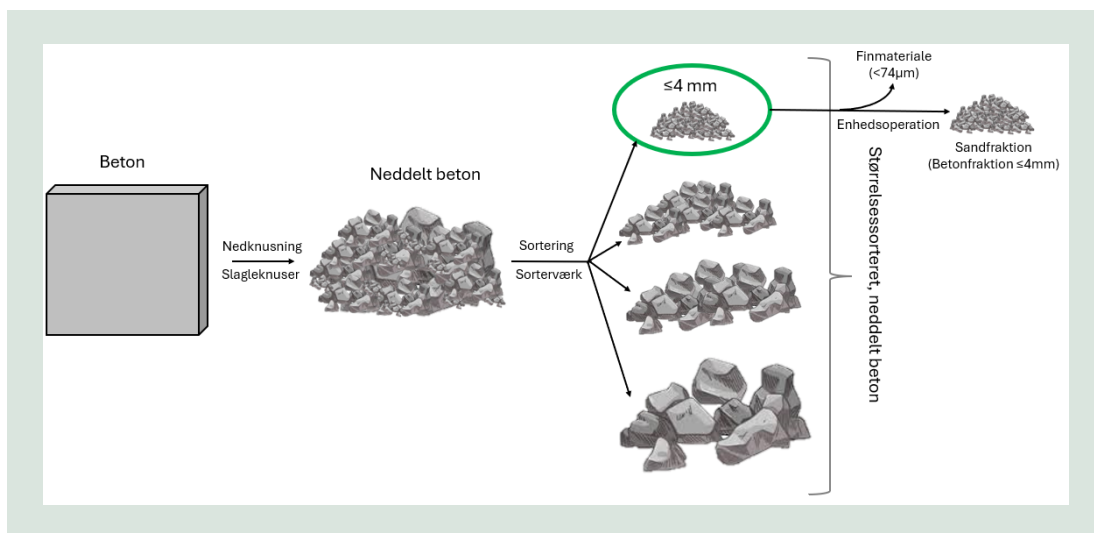


FIGUR 1. Eksempler på konstruktionsbeton, som er leveret til RGS Nordic forud for bearbejdning. Den indleverede beton kan fx indeholde armering, indstøbt isolation (glas- eller stenuld), gips, maling eller lak samt andre fremmedlegemer.

For at genanvende neddelte betonaffald som erstatning for dele af tilslaget i beton eller ved brug af beton som erstatning for fx stabilgrus i vejkonstruktioner og lignende neddeles betonaffaldet i forskellige fraktioner. I nedknusningsprocessen skal armering, isolering eller andre fremmedelementer frasorteres betonen, for at den neddelte beton kan indgå som erstatning for naturligt sand eller sten. Frasortering og nedknusning sker i samme proces, og den neddelte, frigjorte betonfraktion opdeles i størrelser i et sorterværk (se FIGUR 2).

4.1 Proces for udvælgelse, nedknusning og indledende bearbejdning af beton

I projektets første fase blev det besluttet at foretage tests med et forenklet system af sporbare fejlproduktioner af beton. Dvs. at betonen aldrig har indgået i en egentlig konstruktion, som fx en bygning, og at den præcise betontype og klasse er kendt. Materialet blev udvalgt med det formål at kontrollere og fastholde så mange parametre som muligt i løbet af udviklingsarbejdet. Sporbarheden af det genanvendte tilslag vil fortsat være et krav til det endelige produkt, men projektets overordnede mål var at flytte sig fra fejlproduktion til sporbar nedrivningsbeton i løbet af projektet. Betonen blev neddelte med en slagleknuser, og den neddelte beton blev separeret i størrelser med et sorterværk som illustreret i FIGUR 2. Sandfraktionen, som er ≤ 4 mm, er den fraktion, der i projektet arbejdes videre med som erstatning for fintilslaget i Saint-Gobain Webers cementbaserede produkter (mørtel).



FIGUR 2. Grafisk oversigt over nedknusning og proces for sortering af nedrivningsbeton. Sandfraktionen (≤ 4 mm) er markeret med en grøn ring. Efter sortering med sorterværk skal dele af finmaterialet frasorteres, og den oparbejdede sandfraktion testes som erstatning for naturligt sand i produktion af ny beton.

4.1.1 Screening og udvælgelse af oparbejdningsteknologier

For at sikre at udvælgelsen af teknologi til både nedknusning og sortering af den neddelte betonfraktion ville sikre at vi arbejder med den mest lovende teknologi, blev der opstillet kravspecifikationer for begge processer (Se Bilag 1.1 og Bilag 1.2). Givet de opstillede kravspecifikationer blev der udført en screening for mulige teknologier, og der blev udført en risikovurdering for de identificerede, potentielt relevante teknologier. Med udgangspunkt i risikovurderingen blev det besluttet, hvilken teknologi projektet skulle tage udgangspunkt i, og hvilke områder det var væsentligst at afdække først for at vurdere teknologiens relevans for projektets overordnede formål.

I kravspecifikationen blev det oplyst, hvilke krav der var til den endelige teknologis performance indenfor en række forskellige parametre. Kravene blev prioriteret efter vigtighed ved at tildele kravspecifikationerne en score fra 1 til 5, hvor 5 var vigtigst.

I screeningsarbejdet blev der screenet for mulige teknologier, som kunne anvendes indenfor hhv. nedknusning og sortering. Der blev afsøgt teknologier fra bl.a. fødevarebranchen, spildevandshåndteringsområdet og landbrugsindustrien for at afsøge mulige teknologier, som kunne imødekomme nedknusnings- og sorteringsbehovet.

For hver teknologi blev det vurderet, hvor sandsynligt det var, at teknologien fejlede indenfor hvert af de opstillede krav i kravspecifikationen. Sandsynligheden var fastsat på baggrund af et fagligt funderet skøn af teknologiens egnethed i forhold til den enkelte parameter. Sandsynligheden blev vurderet i henhold til en skala fra 1 til 5, hvor 5 er udtryk for størst sandsynlighed for, at teknologien vil fejle indenfor den givne parameter.

For samlet at evaluere teknologien udregnes produktet af vigtigheden af det enkelte krav og risikoen for at teknologien fejler på denne parameter. Derved opnås en risikomatrix, hvor en høj score afspejler, at en teknologi har høj sandsynlighed for at fejle på en kritisk parameter. Risikomatrixen giver et overblik over dels risikoen ved forskellige teknologier, dels hvilke parametre det er vigtigst at afklare tidligt i forløbet.

4.1.1.1 Nedknusning

Med hensyn til nedknusning var det væsentligt, at operationen:

- kunne knuse betonen homogent i fraktionen omkring 1 mm
- foregik i én proces og ikke krævede ekstra enhedsoperationer
- ikke forurener det nedknuste beton (fx med vand)
- havde en høj produktionskapacitet.

På baggrund af de opstillede kravspecifikationer blev der udført en screening for relevante nedknusningsteknologier. Fælles for alle nedknusningsteknologierne er, at de egner sig godt til hårde, sprøde materialer som beton, men teknologierne afviger på både virkemåde og forventet fordeling af kornstørrelser for den pågældende sandfraktion. De identificerede mulige nedknusningsteknologier var:

- Kæbeknuser (jaw crusher)
- Kegleknuser (cone crusher)
- Slagleknusere (impact crusher)/rotationsknusere (horisontal)
- VSI impact crusher (vertikal).

På baggrund af erfaring og risikovurderingen (Bilag 1.1) blev det besluttet, at der i projektet skulle arbejdes med nedknusning af betonen med en slagleknuser, fordi slagleknuseren forventeligt ville generere et relativt homogent output og samtidig ikke kræve anden enhedsoperation end sortering med sorteranlægget. Store stykker ville kunne passere slagleknuseren igen, hvis nedknusningen ikke var tilstrækkelig ved første knusning.

4.1.1.2 Frasortering af finmaterialet

Mulige teknologier til justerbar frasortering af finmaterialet blev identificeret og vurderet.

Nedenfor ses bruttolisten af identificerede mulige teknologier.

- Sigtetårn
- Aspirator med cyklon
- Flushed bed
- Syrevask
- Vandfald med blæser
- Udvaskning af flere fraktioner med vand
- Båndfilter.

Disse teknologier udnytter forskellige fysiske og kemiske principper til at separere partikler baseret på deres størrelse, vægtfylde, densitet eller kemiske sammensætning. Nogle teknologier er bedre egnede til fine partikler, mens andre er effektive til grovere partikler. I nogle tilfælde kan en kombination af flere teknologier give et bedre resultat, men da en tilføjelse af yderligere procestrin vil være et fordyrende element, er en kombination af teknologier ikke som udgangspunkt en mulig løsning.

På baggrund af risikovurderingen (Bilag 1.2) blev det vurderet, at aspirator med cyklonen ville være den mest lovende teknologi til succesfuldt at frasortere dele af finmaterialet (<74 µm) fra sandfraktionen (<4mm) (FIGUR 2). Finmaterialet i en neddelt betonfraktion vil typisk bestå af ren cementpasta, og derved vil netop denne fraktion være den, som suger mest vand, og som derved kan påvirke egenskaberne i den nye beton betragteligt. Det er på forhånd vurderet, at netop kontrol over mængden af finmateriale vil blive afgørende for betonens egenskaber, men kontrol over mængden af finmateriale bidrager også til at sikre, at der ikke opstår batch-to-batch-variationer.

4.2 Analyser af neddelt betonfraktion

Betonen blev neddelt ved slagleknuser og opdelt i fraktioner ved sorterværk efter kornstørrelse i følgende fraktioner:

- 0-4 mm
- 0-2 mm
- 2-4 mm.

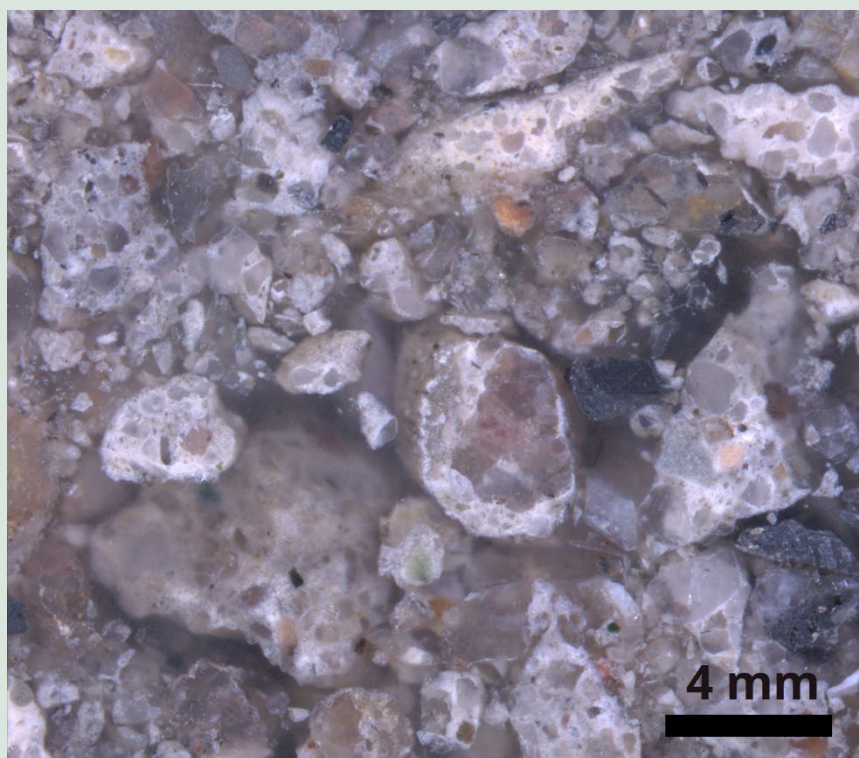
Herefter blev der foretaget indledende analyser af kornstørrelsesfordelingen samt visuel inspektion af den neddelte betonfraktion og overfladen af partiklerne.

4.2.1 Mikroskopianalyse af tyndslib af neddelt beton

For at analysere indholdet af den findelte, bearbejdede fraktion blev der foretaget mikroskopi-analyse af den pågældende fraktion. Analysen blev foretaget med henblik på at bestemme, hvorvidt det oprindelige tilslag af naturligt sand i den nedknuste beton var blotlagt efter nedknusning, eller om tilslaget fortsat var belagt med cementpasta på hele overfladen. Denne viden er væsentligt for at forstå, i hvor høj grad den neddelte fraktion er sammenlignelig med naturligt sand.

For at opnå information om prøven blev et prøveudtag indstøbt i epoxy, og der blev foretaget et planslib af prøven. Dette sikrer, at man kan se det tilfældigt placerede tværsnit af de indgående partikler og derved undersøge, om partiklernes kerne er forskellig fra deres overflade.

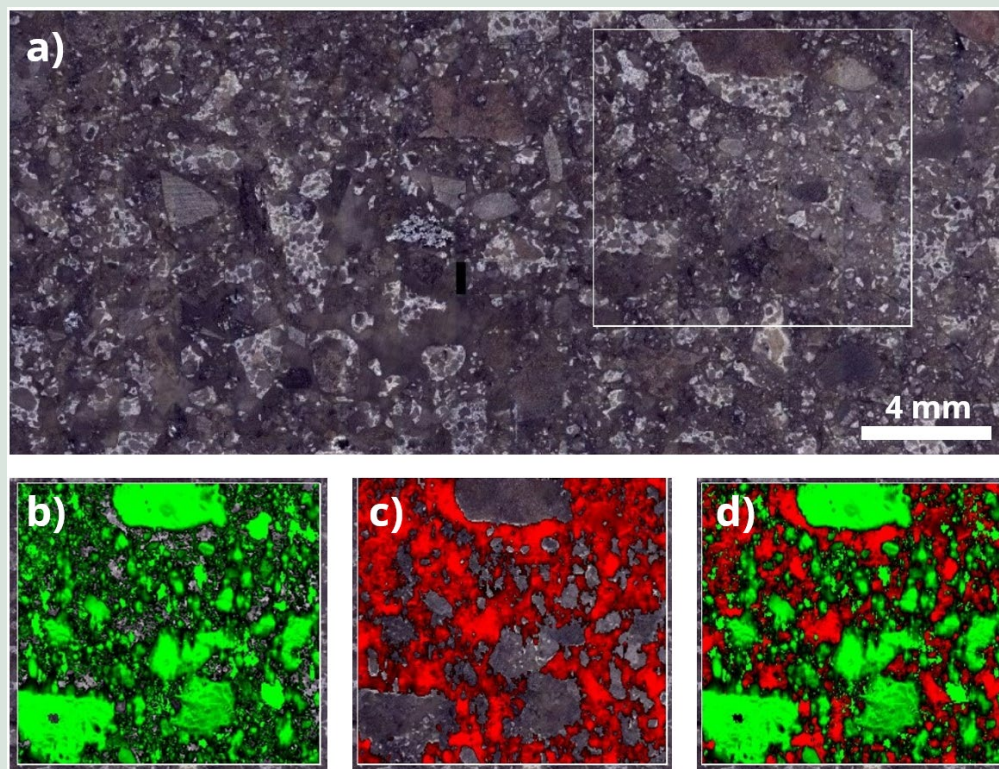
Fra lysmikroskopibilledet ses det tydeligt, hvordan partiklerne består af en blanding af sandkorn og cementpasta. Kornene i den neddelte beton består ofte af adskillige sandkorn naturligt sand, som er bundet sammen til et enkelt korn med cementpasta. Det er derfor forventeligt, at den generelle overflade af sandkornene er belagt med cementpasta, og at kornene i neddelte betonfraktion består af mosaikker sammensat af flere sandkorn.



FIGUR 3. Lysmikroskopibillede af planslib (tværsnit) af kornene i den neddelte betonfraktion.

Lysmikroskopet blev kombineret med Raman-IR (FIGUR 4) for at få yderligere information om den kemiske sammensætning og potentielt estimere indholdet af sand i forhold til cementpasta i prøven. Idet prøveudtaget er meget begrænset, og analysemetoden kun beskæftiger sig med et mindre, lokalt område af prøven er der ikke statistisk evidens for at evaluere på materiale-sammensætning generelt. I Raman-IR ses der nemt forskel på sandkorn (FIGUR 4b grøn) og

cementpasta (FIGUR 4c rødt) ved at pålægge passende kontrast på baggrund af det kemiske signal. Den samme forskel var ligeledes tydelig i lysmikroskopibilledet (FIGUR 4a).



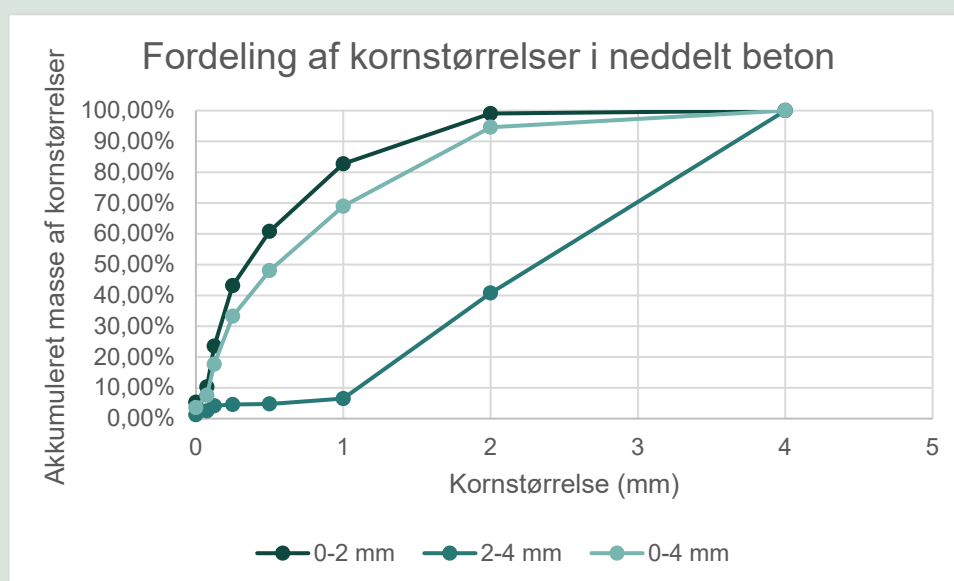
FIGUR 4. Lysmikroskopibillede af planslib af prøver af den neddelte beton indstøbt i epoxy, hvor et område er udvalgt til nærmere IR-analyse og markeret med en hvid kasse. b) Samme område som markeret i (a), hvor man med kemisk analyse med Raman/IR har pålagt farvekodet grøn for sandkorn. c) Samme område som (b), men med cementpasta markeret med rød farve. d) Overlay mellem de to billeder (b) og (c).

4.2.2 Kornstørrelsesfordeling – opdeling via sigtetårn

For at evaluere på størrelsesfordelingen og vurdere mængden af forskellige kornstørrelser på et relativt stort prøveudtag og på en visuelt overskuelig måde blev de neddelte betonprøver opdelt i størrelsesfraktioner via et sigtetårn efter de var blevet opdelt ved brug af sorterværk. I sigtetårnet placeres ca. 300 g afvejet prøvefraktion, og vibrationerne på sigtetårnet sikrer, at partiklerne bevæges, så partikler der er små nok til at passere gennem hvert gitterniveau, passerer videre til det næste. Den resulterende opdeling af delfraktionerne ses i FIGUR 5.



FIGUR 5. Oversigt over kornsammensætningen af de forskellige nedknuste prøver fra RGS Nordic efter sortering via sigtetårn. På malertapen på hvert billede er der angivet det angivne størrelsesinterval fra RGS Nordic (0-2 mm, 0-4 mm samt 2-4 mm) opnået via sorterværk.



FIGUR 6. Graf over kornstørrelsesfordelingen i de 3 prøver med varierende kornstørrelsesudtag fra sorterværket.

Den relative masse af hver fraktion i FIGUR 5 er plottet i FIGUR 6. Her ses det, at alle prøver indeholder en mindre mængde finmateriale (her: $< 75 \mu\text{m}$, grundet maskestørrelsen af sien i sigtetårnet). Det ses i øvrigt, hvordan 2-4 mm-fraktionen stadig indeholder omkring 40 % partikler under 2 mm, og at 0-2 mm-fraktionen stort set ikke indeholder partikler større end 2 mm. Dette tyder på, at sorterværket er mindre effektivt i frasortering af de mindre partikler $< 2 \text{ mm}$.

Grundet den relativt jævne fordeling af kornstørrelser observeret i 0-4 mm-fraktionen blev det i projektet besluttet, at der skulle arbejdes videre med 0-4 mm-fraktionen som fint tilslag.

4.3 Frasortering af finmaterialet fra neddelt beton

På baggrund af teknologievalueringen (Bilag 1.2), faldt valget af enhedsoperationer til frasortering af finmaterialet ($< 74 \mu\text{m}$) på en aspirator med cyklon.

4.3.1 Opbygning af aspirator med cyklon

RGS Nordic opbyggede et setup med en aspirator med cyklon, hvor aspiratorsuget kunne justeres, så en passende mængde finmaterialet blev trukket ud. Opstillingen ses på FIGUR 7 og indeholder følgende elementer:

- A: Tragt til at kontrollere en jævn indføring af sandfraktionen
- B: Transportbånd
- C: Aspirator
- D: Outlet – sandfraktion
- E: Indløbsrør til cyklon
- F: Cyklon
- G: Outlet finmateriale, cyklon
- H: Outlet, cyklon

Materialet indføres i tragten, som sikrer en jævn indføring af sandfraktionen via transportbåndet (B) til aspiratoren (C). I aspiratoren (C) falder de største partikler til bunds. Dele af finmaterialet suges ud som støvholdig luft i toppen af aspiratoren og sendes via indløbsrør (E) til cyklonen (F). I cyklonen roterer luftstrømmens støvpartikler til bunds, og luftstrømstrykket kan afgives gennem cyklonens udløbsrør (H). Det frasorterede finmateriale kan således opsamles i bunden af cyklonen (G). Herved kan den oparbejdede sandfraktion med reduceret mængde af finmaterialet opsamles ved aspiratorens udløb (D).



FIGUR 7. Opstilling hos RGS Nordic af aspirator med cyklon til at frasortere finmaterialet fra den neddelte beton.

Ved den pågældende opstilling er det muligt at regulere mængden af tilbageblivende finmateriale i sandfraktionen ved at regulere sugstyrken i aspiratoren. Det resulterende finmateriale, som indsamles ved (G), består stort set udelukkende af cementpasta og kan anvendes til jordstabilisering.

4.3.2 Effekten af aspiratorbearbejdning på kornstørrelsesfordeling

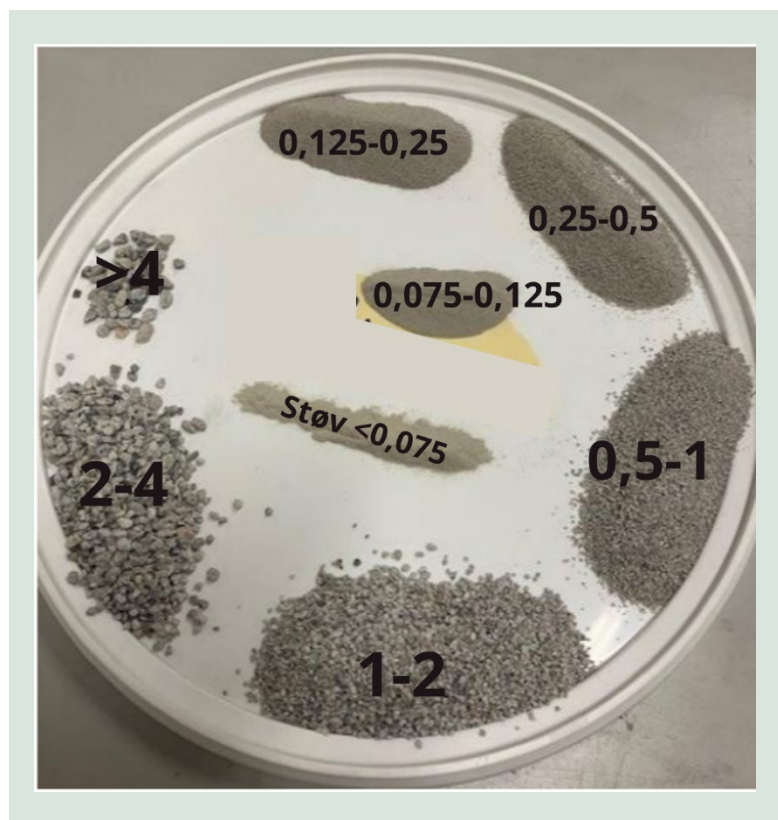
Før og efter bearbejdning af sandfraktionen, 0-4 mm, blev der foretaget en kornstørrelsestest på et prøveudtag, som beskrevet i afsnit 4.2.2. Data er opsummeret i TABEL 2 hvoraf det fremgår at mængden af finmaterialet reduceres ved bearbejdning med aspiratoren. De enkelte opdelte delfraktioner for sandfraktionen bearbejdet med aspiratoren ses i FIGUR 8. Den generelle variation mellem de to prøver for det givne prøveudtag bevirker, at der ikke kan konkludere

res på den præcise mængde af finmateriale fjernet fra den enkelte prøve. Dog kan der observeres en akkumulering af finmateriale i cyklonen, og derved kan det konkluderes, at dele af finmaterialet frasorteres i processen. Data fra TABEL 2 er plottet i graferne i FIGUR 9.

Det kan således observeres, at dele af finmaterialet frasorteres ved aspiratoren. Mængden af finmateriale, som frasorteres, kan justeres ved at justere suget på aspiratoren. Det er en del af projektets mål at finde det optimale indhold af finmaterialet i det genvendte tilslag. Dette nåede dog ikke at blive belyst tilstrækkeligt, før projektet blev afsluttet.

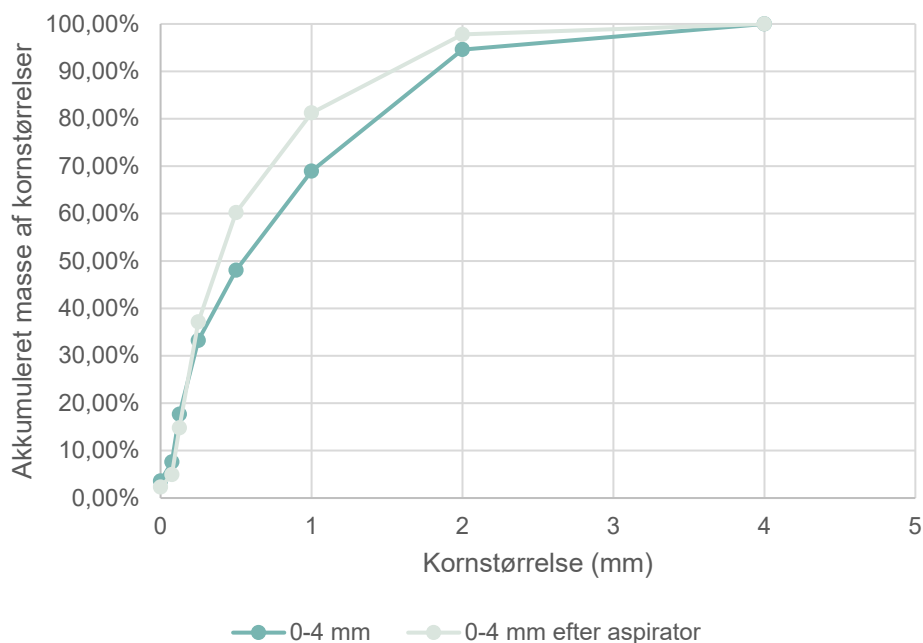
TABEL 2. Kornstørrelsesfordeling bestemt ved sigtetårn for sandfraktion før og efter bearbejdning med aspirator. Massen afspejler massen af partikler, som blev opfanget i hvert sigteniveau for prøven, og afspejler således massefordelingen som funktion af kornstørrelse.

Sigtstørrelse [mm]	Masse [%] Før aspirator	Masse [%] Efter aspirator
>4	5,40	2,21
2-4	25,65	16,56
1-2	20,91	21,01
0,5-1	14,81	23,08
0,25-0,5	15,57	22,34
0,125-0,25	10,07	9,88
0,075-0,125	4,01	2,61
Rest (finmateriale)	3,58	2,31

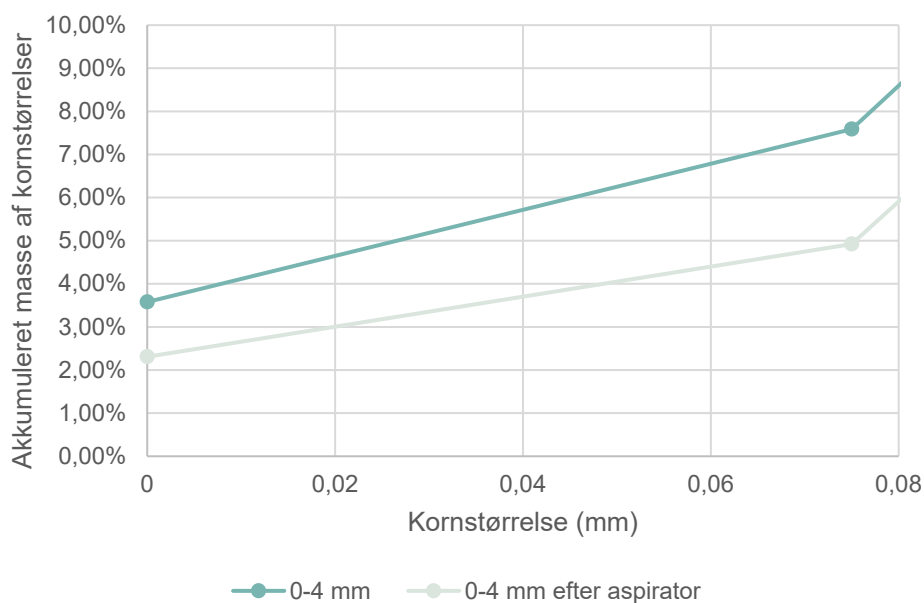


FIGUR 8. Billede af fraktionerne siet ud med sigtetårn efter oparbejdning i aspirator arrangeret efter størrelse på låget fra en plastspand. Tallene på figuren henviser til gitterstørrelsen på de forskellige niveauer i sigtetårnet jf. TABEL 2.

a) Fordeling af kornstørrelser i neddelt beton



b) Fordeling af kornstørrelser i neddelt beton (zoom in)



FIGUR 9. Fordeling af kornstørrelser i neddelt beton for prøverne med størrelsesintervallet 0-4 mm og 0-4 mm oparbejdet med aspirator med cyklon. Figur b viser et zoom-in på området for de mindste partikler for at understrege den delvise fjernelse af finmaterialet fra de øvrige partikler ved brug af aspirator.

5. Teststøbning med neddelt beton som erstatning for sand

For at undersøge effekten af at erstatte naturligt sand med neddelt, oparbejdet beton blev der udført prøvestøbninger med 100 % erstatning af naturligt sand med den oparbejdede, genanvendte sandfraktion. Projektet havde til formål at undersøge den øvre grænse for, hvor meget genanvendt tilslag der kunne anvendes og samtidig bibeholde mørtlens mekaniske egenskaber. Derudover ville eventuelle ændringer i den færdige mørtlens egenskaber forårsaget af finjustering af sandfraktionens bearbejdning lettere kunne identificeres når den fulde mængde naturligt sand erstattes med genanvendt tilslag.

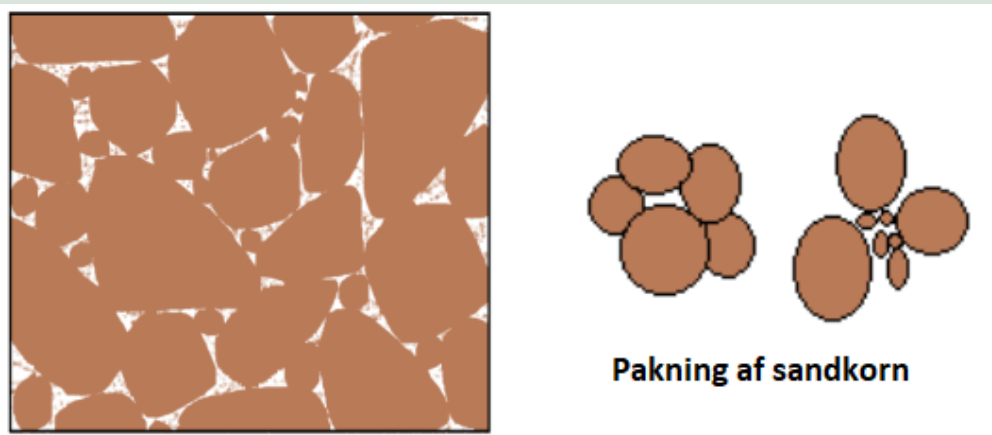
Ved erstatning af naturligt sand som tilslag er der mange parametre, som er væsentlige for den endelige mørtels egenskaber. Herunder

- Absorption af den genanvendte sandfraktion
- Cementpastaindhold af den genanvendte sandfraktion
- Kornstørrelsesfordeling af den genanvendte sandfraktion
- Luftindhold i nystøbt mørtel.

Neddelt beton indeholder cementpasta som kan suge relativt meget vand sammenlignet med naturligt sand. Derfor vil neddelt beton, i en mørtel, suge mere vand end den tilsvarende mængde naturligt sand. Dette kan der delvist kompenseres for i betonrecepten, hvor der kan tilføjes større mængder vand. Dog øger dette vand/cement-forholdet i det nye produkt. Derfor kan neddelt beton som erstatning for naturligt sand risikere at føre til en mere porøs og svag mørtel eller beton.

Kornstørrelsesfordelingen af tilslaget i beton skal helst være en blanding af små og store partikler. Dette er vigtigt for at sikre en kompakt og tæt betonblanding (FIGUR 10) med god flydeevne, god stabilitet og høj styrke. Den tætte pakning af tilslaget minimerer således den mængde af cement, der kræves for at opnå den ønskede styrke. Derved reduceres omkostningerne og risikoen for revnedannelse mindskes på grund af varmeudvikling fra hydrationsprocessen. En kompakt og tæt betonblanding med en god kornstørrelsesfordeling vil bedre kunne modstå eksponering i aggressive miljøer og slid. Derudover sikrer en god fordeling af partikler en bedre flydeevne af betonen, hvilket gør den lettere at håndtere og bearbejde.

Tests af teststøbninger og tilslag i projektet er udført som indledende screeninger, hvor hver test kun er udført én gang. Derfor skal diskussionens konklusioner betragtes som indledende indikationer, som skal efterprøves. Ligeledes bør reproducerbarheden i al data undersøges nærmere for at sikre, at konklusionerne stemmer overens med de indledende tests umiddelbare indikation.



FIGUR 10. Illustration af pakning af tilslagsmaterialer med forskellig størrelse (Munch-Petersen, G).

5.1 Baggrund for udførelse af tests på prøvestøbninger

Den mørtel, som blev prøvestøbt med genanvendt sandfraktion, var baseret på en Saint-Gobain Weber-standardbeton, eksponeringsklasse P, hvor det naturlige sand 1:1 (på massebasis) blev erstattet af den genanvendte sandfraktion. Det var forventeligt, at parametre som vand, cementmængde og mængden af neddelt beton, som erstatter naturligt sand, skulle reguleres løbende i projektet for at øge betonstyrken, men i udviklingsarbejdet blev det vurderet som det bedste optimeringsudgangspunkt at fastholde alle øvrige parametre for mørtel og beton.

Den nye mørtel med genanvendt sandfraktion blev støbt i prismeforme med dimensionerne: 4 cm x 4 cm x 16 cm og afformet efter 1 døgn. Den hærdede mørtel med genanvendt sandfraktion blev undersøgt ved mekaniske tests for trykstyrke, bøjningsstyrke og flydemål.

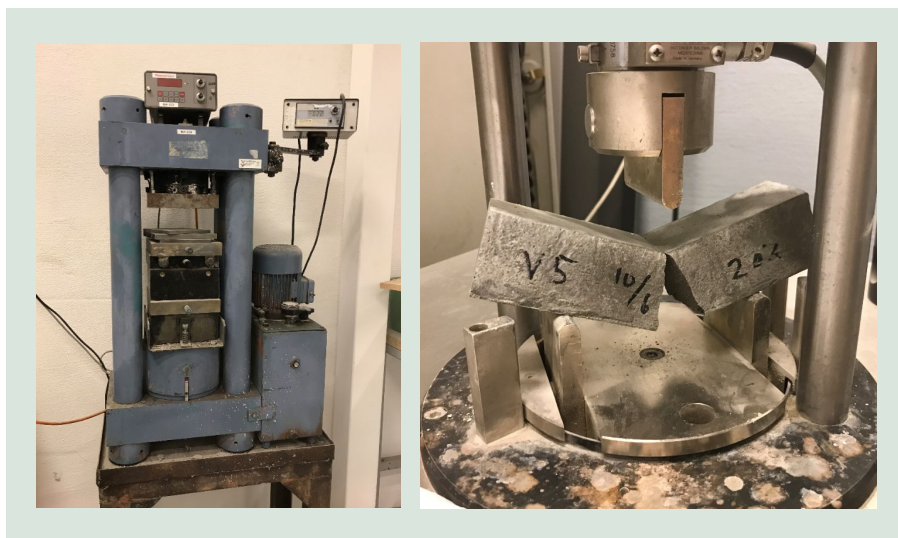
5.1.1 Mekaniske tests: Trykstyrke og bøjningsstyrke

Trykstyrke og bøjningsstyrke er essentielle egenskaber i konstruktionsmaterialer, såsom mørtel og beton. Trykstyrken er af flere væsentlige årsager en afgørende egenskab for beton. Trykstyrken angiver betonens evne til at bære last og modstå den belastning, den udsættes for i en konstruktion. Dette er essentielt for bygningers og infrastrukturers stabilitet og sikkerhed. Derudover indikerer trykstyrken betonens holdbarhed og levetid, da en højere styrke ofte er ensbetydende med modstandsdygtighed over for miljøpåvirkninger. Endelig muliggør en god trykstyrke effektive og økonomiske konstruktioner, fordi der skal bruges mindre materiale for at opnå samme bæreevne.

Trykstyrken kan eksempelvis testes i henhold til standarden EN 12390-3. I testen støbes en cylinder af den pågældende beton, som testes efter 28 dages hærdning. 28 dage efter støbning af betonen betragtes betonens mekaniske egenskaber som tæt på den endelige styrke for den hærdede beton. Efter hærdning i 28 dage placeres prøveemnet i en trykprøvemaskine, og der påføres gradvist en belastning med en konstant hastighed. Betonens trykstyrke defineres ud fra den styrke, som prøven kan modstå, før brud registreres (se FIGUR 11). Trykstyrken beregnes som

$$f_c = \frac{F}{A}$$

Hvor f_c er trykstyrken, F er den maksimale belastning før brud, og A er prøveemnets tværsnitsareal.



FIGUR 11. Venstre: billede af maskinen som anvendes til trykstyrkemåling. Højre: billede af brud ved en bøjningsstyrketest.

Bøjningsstyrken i beton er også en essentiel egenskab, der har stor betydning for konstruktions ydeevne. Denne egenskab bestemmer betonens evne til at modstå bøjende kræfter uden at bryde sammen, hvilket er særligt vigtigt i elementer som bjælker, dæk og veje. En høj bøjningsstyrke giver også mulighed for at reducere materialeforbruget. Desuden bidrager en god bøjningsstyrke til at minimere risikoen for revnedannelse, hvormed konstruktionens levetid forlænges, især i områder udsat for dynamiske belastninger eller temperaturvariationer.

Bøjningsstyrken kan fx udføres i henhold til standarden EN12390-5. Her anvendes typisk teststøbninger i form af bjælker, som ligeledes støbes og hærdes i 28 dage. Bjælken placeres på to understøtninger, og belastningen påføres på et punkt (3-punktsbøjning – se FIGUR 11 til højre). Herved kan den maksimale belastning af bjælken måles som værende, hvor brud registreres. For 3-punktsbøjning udregnes bøjningsstyrken som vist herunder:

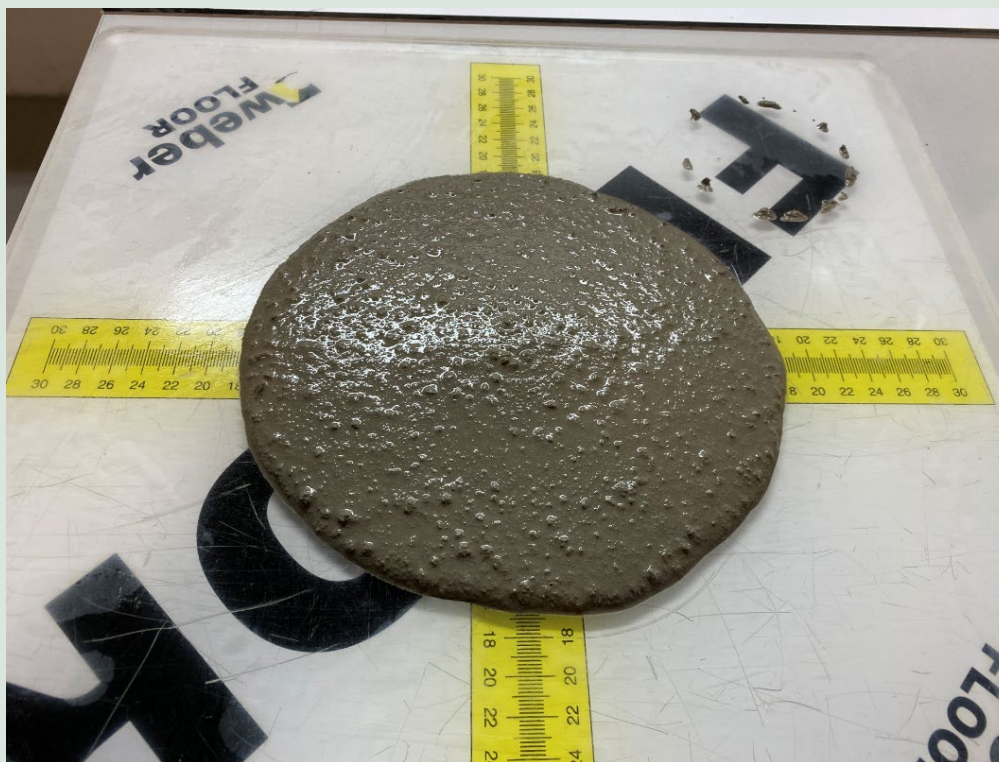
$$f_{cf} = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Hvor f_{cf} er bøjningsstyrken, F er den maksimale belastning, L er afstanden mellem understøtningerne, b er bjælkens bredde, og h er bjælkens højde.

Både for tryk- og bøjningsstyrke testes ofte flere prøveemner for at få et gennemsnit. Resultater kan påvirkes af prøveemnets størrelse, form og hærdbetingelser.

5.1.2 Flydemål

Flydemålet beskriver mørtels evne til at flyde og sprede sig i frisk tilstand, og er således en indikator for et produkts konsistens. Et højt flydemål indikerer en mere flydende mørtel, mens et lavt flydemål tyder på en stivere konsistens. Dette påvirker støbeprocessen, kvalitetskontrollen og nogle gange slutproduktets egenskaber. Flydemålet er tæt knyttet til mørtels vandindhold og har indflydelse på komprimeringen. Forskellige mørtelprodukter kræver forskellige flydemål, hvilket gør det muligt at tilpasse mørtel til specifikke anvendelser. Et optimalt flydemål kan reducere omkostninger, minimere anvendelse af kraft til at støbe i en form og påvirke andre vigtige egenskaber såsom luftindhold og pumpbarhed. Samlet set er flydemålet en kritisk faktor, der sikrer optimal bearbejdelse, kvalitet og ydeevne af en mørtel.



FIGUR 12. Test af flydemål hos Saint-Gobain Weber A/S.

Test af flydemål foretages generelt ved, at den våde mørtel hældes ud på en plan plade, ved brug af en såkaldt flydekegle, hvorefter det måles, hvor langt ud mørtlen løber. Flydekeglen, som har en åbning forned, står ved opfyldning på den underliggende målplade, hvorved betonen holdes i keglen. Keglen løftes lodret op, hvorved betonen kan flyde frit ud af åbningen i flydekeglen og ned på målpladen, hvor det breder sig ud (se FIGUR 12). Når mørtelspredningen er stoppet, måles det flydemålet ved at måle diameteren på den udbredte mørtel i to på hinanden vinkelrette retninger. Det gennemsnitlige flydemål noteres som mørtlens flydemål.

Flydemålet angives normalt i millimeter og er et mål for mørtlens konsistens og bearbejdelse. Jo højere flydemål, desto mere flydende og bearbejdelig er mørtlen. Flydemålet bruges til at kontrollere, om den producerede mørtel opfylder de specificerede krav til konsistens, og resultatet kan bruges til at justere blandingen, hvis det er nødvendigt. Flydemålstest rapporteret i denne rapport er udført jf. en intern standard hos Saint-Gobain Weber A/S.

5.2 Data fra mørtelteststøbninger med neddelt beton som fint tilslag

Der arbejdes med i alt 5 forskellige prøver: 4 neddelte, oparbejdede betonprøver samt en referenceprøve bestående af naturligt sand, som prøverne benchmarkes op imod. Oversigt over prøverne og forskelle herimellem er opsummeret i TABEL 3. Der blev udført teststøbninger, flydemål og mekaniske tests, som opsummeres i dette kapitel.

TABEL 3. Oversigt over neddelte betonprøver + sandreference.

Prøve nr.	Batch	Nedknusningstype	Sigtning [mm]	Finmateriale - frasortering	Tørring
1	1	Slagleknuser	0-4	Ingen	Nej
2	1	Slagleknuser	0-4	Aspirator m. cyklon	Nej

Prøve nr.	Batch	Nedknusningstype	Sigtning [mm]	Finmateriale - frasortering	Tørring
3	2	Slagleknuser	0-4	Aspirator m. cyklon	Nej
4	2	Slagleknuser	0-4	Aspirator m. cyklon	Ja
5: Reference	-----	Sandreference-----			Ja

Samlet set er der arbejdet med 4 forskellige neddelte betonprøver fra forskellige batches af nedknusning og/eller med forskellig efterfølgende oparbejdning. De neddelte, oparbejdede betonprøver er alle neddelt med slagleknuser og sorteret til en kornstørrelse på 0-4 mm med et sorterværk. Prøverne 1+2 stammer fra første nedknusning (batch 1), og prøverne 3+4 stammer fra 2. nedknusning (batch 2). Prøverne 2, 3 og 4 har alle fået fjernet dele af finmaterialet via bearbejdning med cyklon + aspirator som beskrevet i afsnit 4.1. Prøve nr. 4 er som den eneste prøve blevet tørret i tørreskab, før den er blevet anvendt som fint tilslag i mørtel.

Der er foretaget prøvestøbninger med de neddelte betonprøver 1-3, hvor de neddelte betonprøver har indgået som 1:1-erstatning for 100 % af sandet i prøvestøbningen. Derudover er der i samme tabel indsat en sandreference. Nedenfor er data for trykstyrke, bøjningsstyrke og flydemål i TABEL 3. Der blev ikke foretaget en prøvestøbning eller målt flydemål med prøve 4.

TABEL 4. Data for prøvestøbninger af mørtel med 100 % erstatning af naturligt sand med genanvendt sandfraktion fra neddelte betonprøver 1-3, samt en referencestøbning med naturligt sand som fint tilslag. Der blev ikke foretaget en prøvestøbning med prøve nr. 4 fra TABEL 3.

Prøvestøbning med fint tilslag fra prøve nr.	Trykstyrke [MPa]	Bøjningsstyrke	Flydemål (mm)
1	59,6	6,2	130
2	76,5	9,1	170
3	66,0	8,4	138
5: Reference	63,8	7,4	180
Minimumskrav for mørteltypen	60	6,0	180 (Target value)

5.2.1 Diskussion af data

Der er for hver teststøbning kun foretaget en enkelt test, og derfor skal der i data tages højde for en vis usikkerhed.

På baggrund af data i TABEL 4 gøres følgende observationer:

1. Trykstyrken er over minimumskrav for prøverne 2+3
2. Fjernelse af dele finmateriale fra sandfraktionen styrker mørtlen og øger flydemålet (sammenlign prøve 1 & 2)
3. Betragtelige egenskabsforskelle mellem prøve 2 og 3.

Nedenfor foretages en uddybende diskussion af de 3 observationer.

1. Trykstyrke over minimumskrav

Trykstyrke for prøvestøbningerne med de neddelte betonprøver 2+3 er begge over minimumskrav for mørteltypen og højere end trykstyrken for referenceprøven. Prøve nr. 1 er lidt under minimumskravet, men dette er ikke signifikant for en enkelt observation. Minimumskrav for trykstyrken for denne mørteltype er 60 MPa. Den øgede trykstyrke og bøjningsstyrke for mørtel med genanvendt tilslag tilskrives formen på kornene i den neddelte beton, som er mere kantet end de afrundede sandkorn. Generelt gælder det, at kantede kornformer i tilslaget giver bedre mekanisk låsning mellem partiklerne, hvorved styrken i cementproduktet øges (Özturan,

1997). Ulempen er til gengæld, at den samme mekaniske låsning kan reducere cementproduktets bearbejdelighed.

2. Fjernelse af finmaterialet styrker mørtlen og øger flydemålet

Fjernelse af finmaterialet med aspirator + cycklon fra prøve 1 til prøve 2 øger både trykstyrke, bøjningsstyrke og flydemål. Dette er forventet, da finmaterialet primært består af cementpasta, som ikke har samme styrke som naturlige sandpartikler. Ved at fjerne finmaterialet, som primært er cementpasta fra knust beton, reduceres det relative indhold af cementpasta, hvorved v/c-forholdet stiger og mørtlens styrke øges.

Flydemålet for mørtel baseret på genanvendt tilslag fra prøve 2 er højere end for mørtel baseret på tilslag fra prøve 1, hvilket var forventet, idet prøve 2 har fået fjernet dele af finmaterialet, modsat prøve 1.

For at kompensere for reduceret flydemål i det endelige produkt vil det være muligt at tilsætte mere plastificeringsmiddel/flydemiddel, som øger flydemålet uden at øge på cementmængden. Dette ville kunne bibeholde styrken, men også øge prisen og kompleksiteten af produktet. Derfor bør økonomiske aspekter heri undersøges nærmere, før en sådan løsning implementeres.

3. Betragtelige egenskabsforskelle mellem prøve 2 og 3

Prøverne 2 og 3 stammer fra 2 forskellige batches af neddelte beton, men har efterfølgende undergået samme oparbejdning i aspiratoren med cycklonen. Til trods herfor har prøverne vidt forskellige værdier af trykstyrke, bøjningsstyrke og flydemål. Idet den neddelte beton stammer fra fejlstøbninger af samme betontype fra samme producent, forventedes der ingen betragtelig batch-til-batch-variation af selve betonen. Derfor tilskrives den primære forskel i mekaniske egenskaber i den teststøbte mørtel en forskel i tilslagsets fugtindhold forårsaget af forskellen i opbevaringsvilkår for den neddelte beton. Nedknusning, lagring og oparbejdning fra batch 1 var foregået i sommeren 2023, hvorimod batch 2 var indsamlet og bearbejdet i efteråret 2023. Forskellen i det resulterende fugtindhold i tilslaget kvantificeres i afsnit 5.3. Forud for støbning skal der tages højde for fugtindholdet i den knuste beton.

5.3 Bestemmelse af fugtindhold og vandabsorption af neddelte betonprøver

Når det gælder vandindholdet i beton, er det vigtigt at betragte den faktiske vandmængde i betonen, altså den vandmængde som er tilgængelig for hydratiseringsprocessen. Den faktiske vandmængde i den endelige beton afhænger i høj grad af to forskellige, men relaterede parametre ved tilslaget, nemlig fugtindhold og absorption, der begge spiller en vigtig rolle for betonens endelige styrke og kvalitet.

Fugtindholdet refererer til den mængde vand, der er til stede i tilslaget på det tidspunkt, hvor det blandes med cement og vand for at fremstille beton. Det måles typisk som en procentdel af tilslagsets tørvægt. Fugtindholdet kan variere afhængigt af opbevaringsforhold og vejrforhold. Fugtindholdet påvirker den totale mængde vand, der er tilgængelig for hydratiseringsprocessen og påvirker vand/cement-forholdet (v/c-forhold), som er afgørende for betonens styrke. For højt fugtindhold kan øge v/c-forholdet, hvilket reducerer styrken, hvorimod et lavt fugtindhold, der ikke er taget højde for, kan resultere i utilstrækkelig hydratisering af cementen og sænke betonens bearbejdelighed.

Vandabsorption refererer derimod til tilslagsmaterialernes evne til at optage vand i deres porestruktur. Absorption angives som den maksimale mængde vand, et tilslag kan optage, udtrykt som en procentdel af dets tørvægt og afhænger af tilslagsets porøsitet og struktur. En høj absorptionskapacitet kan indikere, at prøven har mange og/eller store porer, der kan holde vandet i tilslaget. Omvendt vil en lav absorptionskapacitet tyde på, at prøven har relativt få eller små porer. Absorption i tilslaget kan påvirke den effektive mængde vand, der er tilgængelig for

cementhydratisering. Er tilslaget tørt, vil det absorbere vand, der dermed ikke er tilgængeligt for hydratiseringen for en tidsperiode. Letvægtstilslag, som ofte har en høj absorption, kan yderligere føre til intern hærdning, hvor vand frigives langsomt fra tilslaget under hærdningsprocessen og kan påvirke betonens arbejdssevne og konsistens.

Kort fortalt indikerer absorptionen kapaciteten for vandindhold i tilslaget, og fugtindholdet indikerer det faktiske indhold af vand i og på tilslaget. Kombinationen af de to indikerer, hvor vandmættet tilslaget er, og hvor meget det derfor vil suge eller afgive i betonblandingen. Fx kan tilslag med høj absorption og lavt fugtindhold absorbere for meget vand, hvilket reducerer bearbejdigheden. Omvendt kan tilslag med lavt fugtindhold og lav absorption resultere i en mere stabil betonblanding. Nøjagtig måling af både fugtindhold og absorption er vigtig for at justere vandmængden i betonblandingen korrekt. Korrekt justering sikrer optimal styrke, bearbejdighed og ydeevne af den færdige beton.

5.3.1 Bestemmelse af fugtindhold

For at bestemme den nedknuste betons fugtindhold blev der udtaget en prøve, som blev tørret ved 105 °C i 24 timer. Det resulterende massetab kan herved tilskrives fugtindholdet, som udregnes og opgøres i masseprocent af prøvens samlede startvægt, og som er opsummeret i TABEL 5.

TABEL 5. Målt fugtindhold i prøverne.

Prøve nr.	Fugtindhold [%]
1	10
2	6
3	8

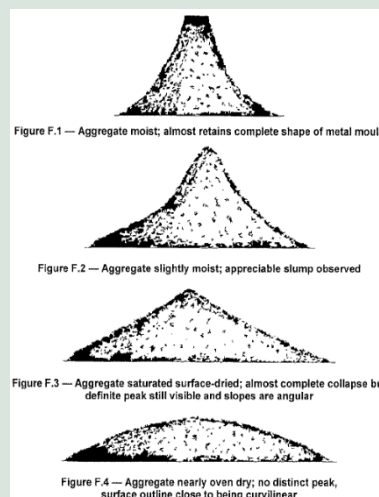
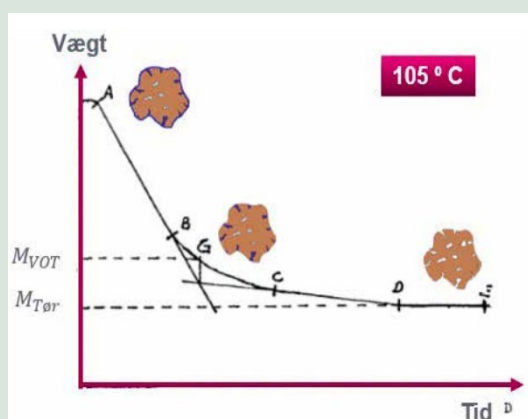
På baggrund af målingerne ses der et højere fugtindhold i prøve 3 i forhold til prøve 2, i overensstemmelse med de ringere performanceparametre som observeret i TABEL 3. Prøve 1 har dog langt det højeste indhold af fugt for alle 3 prøver, hvilket tyder på, at store dele af fugten er i cementpastaen, som fjernes delvist i processen med delvis fjernelse af finmaterialet. Da netop cementpasta er mere porøs og kan suge større mængder vand, er det også forventeligt, at store dele af prøvens samlede fugtindhold netop var i finmaterialet.

5.3.2 Bestemmelse af absorption og korndensitet

Bestemmelse af absorptionen af et tilslag kræver kendskab til materialets vandmættede, overfladetørre tilstand (VOT). Generelt kan man betragte et tilslagskorn som værende i enten våd tilstand, i VOT, tør tilstand eller et sted imellem de 2, se FIGUR 13 (højre). VOT beskriver det stadie, hvor der ikke er adsorberet noget vand på overfladen af partiklerne i tilslaget, men hvor partiklens porrer har absorberet så meget vand, som de kan. Derfor fortæller VOT-tilstanden noget om materialets massefylde, vandabsorption og porøsitet. Vandabsorptionen af et materiale betragtes som forskellen i massefylde mellem VOT-tilstanden og den helt tørre tilstand. Mens det er nemt at bestemme tilslagets tørre tilstand, er det relativt udfordrende at bestemme, hvornår tilslaget befinder sig i sin VOT-tilstand.

Det er velkendt, at absorptionsværdierne af neddelt betontilslag er højere end naturlige tilslagsmaterialer. Dette skyldes, at den neddelt beton er porøs og derved har en stor indre overflade med mange små huller og revner og således kan optage og suge mere vand eller fugt fra omgivelserne. Mængden af vand, som den neddelte beton kan optage, afhænger af antallet af porer, deres størrelse og deres tilgængelighed. Derved giver absorptionen et indblik i prøvens porøsitet og porestørrelsesfordeling.

Bestemmelsen af neddelt betontilslags absorptionsværdi er særligt udfordrende på grund af partiklernes form og indholdet af cementpasta. Derfor blev der anvendt to metoder til at bestemme absorptionen. Den første metode blev foreslået i 1984, benytter materialets desorptionsisoterm til at bestemme absorptionsværdien (Frølich, 2019). Den anden metode er standarden DS/EN 1097-6: 2013, som bruges til at bestemme absorption af naturlige tilslag samt tilslagets korndensitet. Den største forskel mellem metoderne er måden, hvorpå man bestemmer materialets VOT. Ved metoden desorptionsisoterm (FIGUR 13, venstre) findes VOT-vægten ved hjælp af materialets udtøringskurve, og VOT bestemmes til en værdi på udtøringskurven, der ligger umiddelbart efter det tidspunkt, hvor udtørringen går fra at være styret af fordampning, til at være styret af diffusion gennem materialet. EN 1097-6-metoden finder VOT-vægten, når prøven danner en defineret top via kegletesten (FIGUR 13, højre).



FIGUR 13. Illustration af de 2 metoder til bestemmelse af absorption i tilslaget: **Venstre:** På grafen for desorptionsisotermen ses, hvordan et tilslagskorn går fra våd tilstand (øverst), over overfladetør tilstand (VOT, midten) og til tør tilstand (nederst). **Højre:** Kegletesten under DS/EN 1097-6: 2013 (venstre). Figurer lånt fra (Frølich, 2019) samt DS/EN 1097-6: 2013.

5.3.2.1 Metode 1: Desorptionsisoterm

En desorptionsisoterm beskriver, via materialets vægt, et materiales vandindhold over tid, mens materialet udsættes for en konstant temperatur og fordampning. Ved metoden vejes en vandmættet prøve kontinuerligt under 105 °C opvarmning, mens prøven gradvist afgiver fugt. Se FIGUR 14 for et eksempel på forsøgsopstillingen.

Ud fra teorien vil tørringen af et tilslagskorn følge en kurve sammenlignelig med kurven i FIGUR 13 (venstre). Der vil være et lineært stykke i forbindelse med vægttabet af et vådt tilslagskorn, som opvarmes. Vandindholdet som er absorberet i porerne, er svære at fordampe, og der vil derfor ske et skifte i hældningen på vægtkurven under varmepåvirkningen som funktion af tiden. Herefter vil der opstå et nyt område med lavere hældning, hvor partiklen afgiver det vand, der er absorberet inde i porerne, via diffusion gennem materialet. Til sidst opnås en konstant vægt, hvor partiklen har afgivet alt sit absorberede vand og er tør. VOT findes som skæringspunktet mellem ekstrapoleringen af de to lineære segmenter. Ud fra massen ved VOT og massen af den tørre prøve samt volumen kan absorptionen bestemmes.



FIGUR 14. Billede af forsøgsopstillingen for måling af desorptionsisoterm. En kendt mængde vådt tilslag (nederst i rød beholder) opvarmes gradvist via et varmeelement (øverst). Tilslagets omrøres kontinuerligt, og tilslagets masse måles ligeledes kontinuerligt.

5.3.2.2 Metode 2: EN 1097-6:2013

I denne metode bestemmes VOT-tilstanden gennem en såkaldt kegletest, hvor den våde tilslagsprøve samles i en bunke, formet som en kegle. Bunken tørres gradvist, og bunken formes til en kegle flere gange under tørreprocessen. Så længe der er overfladefugt på de partikler, som udgør tilslaget, vil keglen holde formen pga. overfladespænding fra vandet. Efterhånden som tilslaget tørres, og overfladefugten forsvinder, vil keglen begynde at kollapse. Når keglen lige netop begynder at kollapse, men stadig holder en vis form, har materialet nået VOT-tilstanden. Se FIGUR 13 (højre).

I denne metode vejes prøverne i forskellige tilstande, herunder tør, vandmættet og nedsænket i vand. Massen bestemmes ved at veje prøveportionen i mættet og overfladetørret tilstand og igen i ovntørret tilstand. Prøven tilsættes i et pyknometer og fyldes derfor med vand til et kendt volumen for at mætte prøven. Vægten måles. Et pyknometer er et meget præcist kalibreret glas, som er en slags flaske med låg, som kan bruges til at bestemme volumenet og den specifikke vægt af væsker og faste stoffer. På denne måde kan man samtidig bestemme korndensiteten. Efter mætningen tørres prøven langsomt, indtil den opnår sin mættede, overfladetørre tilstand (VOT) og ovntørres derefter.

Prøvens vægt måles i alle trin. Volumen bestemmes ud fra massen af det fortrængte vand ved vejninger. Den ovntørrede densitet beregnes ud fra forholdet mellem masse og vands densitet.

$$p_{rd} = p_v \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

p_{rd} er prøvens ovntørre densitet

p_v er densiteten af vand ved prøvetemperaturen

M_1 er massen af det mættede og overfladetørrede tilslag i luften, i gram

M_2 er massen af det pyknometer, der indeholder prøven af mættet tilslag og vand, i gram

M_3 er massen af pyknometeret kun fyldt med vand, i gram

M_4 er massen af den ovntørrede prøve.

Ligeledes kan vandabsorption beregnes ud fra standardiserede formler:

$$Absorption(\%) = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100$$

5.3.2.3 Resultatet af de to metoder

Data fra begge anvendte metoder til bestemmelse af absorption for tilslaget er opsummeret i TABEL 6.

TABEL 6. Absorptionsbestemmelse af tilslag bestemt ved 2 forskellige metoder samt korndensitetsbestemmelse ved DS/EN 1097-6. Referencen er fremstillet med naturligt sand.

Prøve/metode	Absorption [%]	Ovntørre densitet [g/cm ³]	
	Desorptionsisoterm	DS/EN 1097-6	
Reference	0,6	0,3	2,670
1	6,9	6,9-7,4	2,615
3	4,1	6,7-8,3	2,605

At absorptionen er mindre efter oparbejdning med aspirator og cyklon (prøve 3) er forventeligt og positivt, da det viser, at det er lykkedes at fjerne dele af cementpastaen, som er det primære bidrag til en høj absorption i neddelt beton.

Absorptionsværdien blev ligeledes bestemt for en sandreference til at vurdere effektiviteten af testmetoderne for neddelt beton.

I begge tilfælde (prøve 1 og prøve 3) overstiger fugtindholdet absorptionen, hvilket ses ved at sammenligne det målte fugtindhold i prøven (TABEL 5) med den fundne absorption (TABEL 6). Generelt gælder det at tilslag med en mætningsgrad over 100 % indeholder overfladefugt.

Korndensiteten er relateret til tilslagets porøsitet og dermed dets evne til at absorbere vand. Tilslagets densitet i VOT bruges til at beregne blandingsforhold (vand/cement-forholdet) i beton, da blandingsforholdet påvirker betonens endelige densitet og styrke. For tilslagsmaterialer anvendes densiteten som en kvalitetsparameter, idet variationer i densitet kan indikere ændringer i tilslagets egenskaber eller oprindelse. Målte korndensiteter af prøve 1 og prøve 3 er meget ens. Densiteten blev dog målt ved hjælp af metode 2, som stadig er usikker mht. nøjagtigheden af resultater. Usikkerheden bør således også tages i betragtning i denne konklusion.

5.3.3 Måling af cementpastaindhold

Formålet med at bruge aspirator og cyklon var at forbedre fjernelsen af cementpasta fra den sandfraktionen, hvorfor måling af cementpastaindholdet i prøverne efter at have været udsat for cyklon er relevant. Cementpastaindholdet blev bestemt for prøverne 1-3 ved brug af 2 forskellige metoder.

Metode 1: Prøven opløses med salpetersyre ved 2M koncentration og omrøres i 60 minutter i en magnetomrører. Væske filtreres, og resten af prøven vejes. Opløst fraktion er cementpastaen.

Metode 2: Prøven opløses med salpetersyre ved 2M koncentration for 1 døgn uden omrøring. Væske filtreres, og resten af prøven vejes. Opløst fraktion er cementpastaen.



FIGUR 15. Billeder af nedknust betonprøve før (venstre) under (midt) og efter syre (højre) i testen for bestemmelse af cementindhold i prøven.

Cementpastaindhold blev bestemt med følgende ligning:

$$C_p = \frac{v_{filt} - v_g - v_f}{v_i}$$

v_{filt} = vægt af glas + prøve + filter efter filtrering og ovntørring

v_g = vægt af glas

v_f = vægt af tørt filterpapir*

v_i = startvægt af prøve

* Filterpapiret taber også vægt ved ovntørring, hvorfor procentdelen af tabt vægt skal bestemmes inden forsøg.

TABEL 7. Bestemmelse af cementpastaindhold ved syreopløsning.

Prøve	Cementpasta fraktion metode 1 [volume %]	Cementpasta fraktion metode 2 [volume %]	Gennemsnit [volume %]
1	30	29	29
2	29	28	28
3	27	28	27

Bestemmelsen af cementpastaindhold ved de to metoder er opsummeret i TABEL 7. Værdier vist i tabellen er et gennemsnit af 2 prøver med en standardafvigelse af ca. 1 %. Generelt ses det, at cementpastaindholdet tilsyneladende er en smule reduceret ved brug af aspiratoren (cementindholdet reduceret fra prøve 1 til prøverne 2 og 3). Herved tyder bestemmelser af både indholdet af cementpasta og absorption på, at det ved aspiratorbearbejdelsen er lykkedes at fjerne en mindre del af cementpastaen i form af finmaterialet. Givet den relativt lille volumenmængde finmateriale (se afsnit 4.3.2) er det en forventelig størrelsesorden, hvorved reduktionen i indhold i cementpasta findes mellem de enkelte prøver.

5.4 Opsummering og konklusion på baggrund af data

Der blev udført teststøbninger, hvor 100 % af det naturlige sand i en mørtelblanding blev erstattet med en genanvendt sandfraktion fra oparbejdet betonaffald. Disse prøver blev testet for trykstyrke, bøjningsstyrke og flydemål i henhold til gældende standarder. Resultaterne viste, at prøver med fjernet finmateriale (prøve 2 og 3) opnåede trykstyrker over minimumskravet for betontypen. Fjernelse af finmaterialet resulterede generelt i både øget styrke og øget flydemål. Der blev dog observeret en nedsat performance fra prøve 2 til prøve 3 mht. både trykstyrke, bøjningsstyrke og flydemål som tilskrives forskelle i prøvens fugtindhold som blev fundet til at være højere for prøve 3 end for prøve 2.

Absorptionstests blev udført både med metoden desorptionsisotherm og med EN 1097-6-standard. Testene viste, at absorptionen var mindre efter oparbejdning med aspirator og cyklon, hvilket er forventeligt, idet der med finmaterialet primært fjernes cementpasta fra betonfraktionen. Fugt- og absorptionstests indikerede i begge tilfælde, at tilslagene indeholdt overfladefugt. Der blev ikke målt absorption på prøve 2.

For at vurdere effektiviteten af cyklonen i fjernelsen af cementpasta blev cementpastaindholdet i prøverne målt ved hjælp af to forskellige metoder baseret på opløsning i salpetersyre. Resultaterne bekræftede yderligere, at en mindre del af cementpastaen blev fjernet i form af finmaterialet under oparbejdningsprocessen.

Samlet set har disse tests givet værdifuld indsigt i de udfordringer og muligheder, der er forbundet med at anvende neddelt beton som erstatning for naturligt sand i nye, cementbaserede blandinger. Resultaterne peger på, at fjernelse af finmaterialet kan forbedre cementbaserede produkters egenskaber, men at kontrol af fugtindhold og absorption er kritiske faktorer, der kræver yderligere opmærksomhed i fremtidige undersøgelser og praktiske anvendelser.

6. Vurdering af omkostninger og forretningspotentiale

Projektet blev afsluttet, da projektets partnere vurderede, at forretningspotentiale for genanvendt beton som erstatning for naturligt sand var utilstrækkeligt. Det blev således vurderet, at projektets produkt ikke ville være økonomisk rentabelt under de nuværende forhold. Dette skyldes blandt andet den høje værdi af og andre anvendelsesmuligheder for nedrivningsbeton, den relativt høje omkostning for at bearbejde betonen til en reproducerbar sandfraktion, som skulle erstatte naturligt sand i cementbaserede produkter, samt den i sammenligning relativt lave pris for sand.

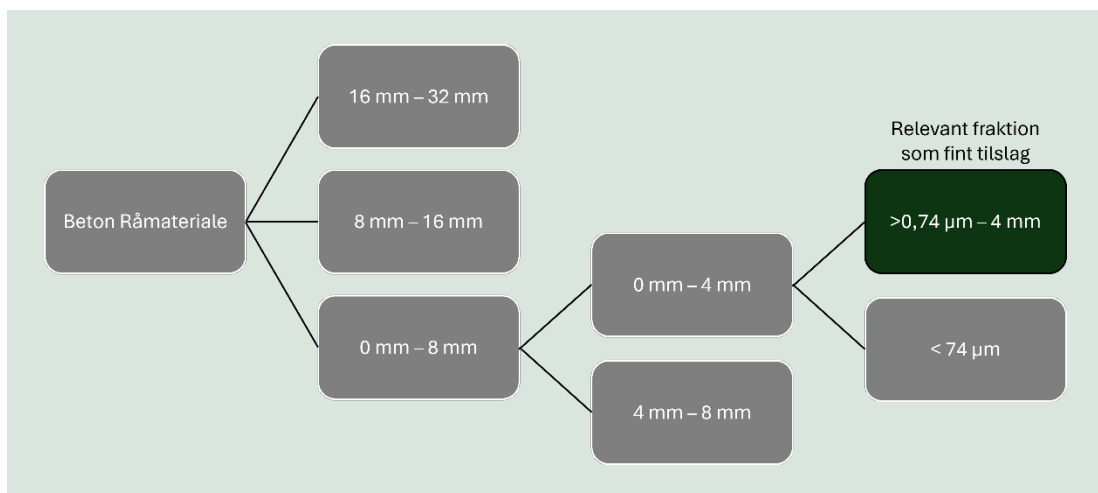
For at vurdere det forretningsmæssige potentiale i at erstatte dele af naturligt sand med en neddelte, oparbejdet beton sandfraktion, blev der i projektet opstillet en række parametre, som blev vurderet i forbindelse med afklaring af forretningspotentialet.

Værdien af betonaffald i forhold til sand

Sporbart betonaffald er en ressource af relativt høj værdi. Betonaffaldet vil efter en bearbejdning kunne anvendes som erstatning for sand i beton, men anvendes allerede nu blandt andet som en delvis erstatning for stabilgrus og for det grove tilslag i beton. Der findes med andre ord andre anvendelsesmuligheder for betonaffald, som kræver mindre omkostningsfuld bearbejdning, ligesom der ikke er mangel på afsætningsmuligheder for betonaffald.

Volumen af relevant sandfraktion fra relevant type beton

For at Saint-Gobain Weber skal kunne anvende genanvendt fint tilslag i virksomhedens produkter, er det vigtigt, at den relevante mængde sandfraktion er tilgængelig til at imødekomme både produktets efterspørgsel og til at sikre at produktet kan få et højt indhold af genanvendt materiale. Hvis det resulterende Saint-Gobain Weber produktet ikke har tilstrækkelig højt indhold af genanvendt materiale vil produktet ikke opnå den ønskede miljøeffekt, og vil derfor være et mindre attraktivt valg for den bæredygtige bygherre. Derfor er det vigtigt at undersøge, om det relevante volumen af den relevante sandfraktion er tilgængelig. Tilgængeligheden reguleres af mængden af beton af passende klasse, kvalitet og sporbarhed, som indleveres til RGS Nordic. Det estimeres, at omkring 27 % af den neddelte beton resulterer i den relevante sandfraktion ($>74 \mu\text{m}$; $\leq 4 \text{ mm}$), hvilket er en relativt lille andel af den samlede betonmængde efter nedknusning med slagleknuseren og sortering i sorterværk (se FIGUR 16).



FIGUR 16. Oversigt over fraktioner, som opnås ved slagl nedknusning (første trin fra beton råmateriale) og efterfølgende sortering på sorterværket (andet trin for 0-8 mm fraktionen). Den grønne, markerede kasse er den fraktion, som er relevant som erstatning for sand i ny beton, som er den del hvor dele af <74 µm-fraktionen er fjernet ved aspirator med cyklon (tredje trin).

I projektet er der undersøgt beton af fejlstøbninger af kendt oprindelse. RGS Nordic får indleveret både armeret beton, flydebeton og fejlstøbt beton. Den fejlstøbte beton fra den specifikke producent udgør kun 5 % af den samlede indleveringsvolumen hos RGS Nordic. For at arbejde med beton af tilstrækkelig sporbarhed skal det være muligt også at inkludere nedrivningsbeton med armering. Dette er ikke testet i projektet.

For at imødekomme volumenbehovet fra Saint-Gobain Weber skal teknologien kunne favne langt de fleste, sporbare betontyper, hvilket sikres gennem valget af P-beton som den beton-type der skal have erstattet naturligt sand med den genanvendte sandfraktion. Potentielt skal der indføres yderligere nedknusninger for at øge volumen af den relevante sandfraktion, hvilket vil betyde en meromkostning i processering af sandfraktionen. Derfor er det omkostningsfyldt at opnå tilstrækkeligt volumen til at tilgodese Saint-Gobain Webers behov.

Opbevaring af nedrivningsbeton

Derudover skal betonen være relativt tør for at kunne undergå sortering i aspirator med cyklon. Det er derfor forventeligt, at betonen, som skal neddeles og oparbejdes til at erstatte sand, skal opbevares under tag og have en vis tørhed, før den nedkuses og sendes gennem aspiratoren og cyklonen. Det vil for RGS Nordic i praksis betyde, at der enten skal opføres en ny hal på et nyt stykke jord eller, mere realistisk, skal fjernes en eksisterende aktivitet hos RGS Nordic, som derved giver anledning til en ledig lagerhal. Dette vil imidlertid give en manglende indtægt for den nuværende aktivitet, hvorved forretningspotentialet skal kunne kompensere for denne reducerede indtægt ved RGS Nordic.

Tørring af oparbejdet sandfraktion

Fugtindholdet af neddelte beton har afgørende betydning for de nye cementbaserede produkters fysiske egenskaber. Det vil derfor højst sandsynligt kræve en tørringsproces, efter den neddelte beton har været igennem aspiratoren med cyklon, før den genanvendte beton sandfraktion kan indgå i nye, cementbaserede produkter, da vandindholdet i den neddelte beton skal kunne kontrolleres fuldstændigt. Tørringen vil formentligt skulle foregå i en hertil tilegnet silo, for at undgå kontaminering og øget procesomkostninger ved løbende skift af sandfraktion. Tørring foregår således også for naturligt sand, så procestrinnet er ikke fremmed, men det vurderes ydermere, at tørringen af neddelte beton vil være dyrere end af sand, idet den neddelte beton er mere porøs og derfor forventes at indeholde mere absorberet vand end sand, som det også er bekræftet i projektet.

6.1 Forretningsmodel for neddelte betonaffald som erstatning for naturligt sand

Forretningsmodellen blev opstillet på baggrund af den nuværende pris for sand og beton samt med en øget værdi for sand ved en fastholdt værdi for beton. Modellen blev benchmarket imod den nuværende situation med anden afsætning af betonaffald, indtægt ved de nuværende aktiviteter hos RGS Nordic i den hal, som potentielt skulle huse den nye teknologi, samt anvendelsen af naturligt sand i betonkonstruktioner.

Oversigten over input i forretningsmodellen findes i TABEL 8. I dag er der udgifter til nedknusning af beton og indtægter fra salg af den samlede, ikke-differentierede fraktion (0-32 mm) til en given pris. I det nye setup er der flere omkostninger til processering, så der udover knusning er udgifter til sorterværket, som udsorterer fraktionen 0-4 mm og herefter til processering af fraktionen til delvis fjernelse af finmaterialet <74 µm. Hertil kommer transport af den relevante neddelte betonfraktion til RGS Nordics lokation i Gadstrup, som efter planen skulle huse opbevaring samt cyklon- og aspiratorsetup. Dette ville give en differentieret salgspris for betonen, alt efter om det er 4-32 mm-, 0-4 mm- eller <74 µm-fraktioner (fraktionerne udgør hhv. 70 %, 27 % og 3 % af det totale volumen som angivet i TABEL 8). Selvom merprisen ville være højere for 0-4 mm-fraktionen, ville det ikke være en rentabel forretning, medmindre Saint-Gobain Weber betalte en betragtelig overpris for den neddelte beton i forhold til prisen på naturligt sand.

TABEL 8. Oversigt over aktiviteter forbundet med indtægter og udgifter for RGS Nordic i det nuværende og nyt setup. De præcise værdier er ikke medtaget i rapporten, men fremgår af forretningsmodellen udviklet i projektet. Den antagne, samlede volumen af indleveret beton er 40.000 tons årligt.

I dag		Nyt setup	
Udgifter			
Knusning af beton		Knusning af beton	
		Frasortering 0-4 mm	
		Cyklon+ aspirator, 0-4 mm	
		Transport af beton	
Indtægter			
Salg af 0-32 mm-fraktion	100 %	Salg af 4-32 mm	70 %
Udleje af hal		Salg 0-4 mm (Saint-Gobain Weber)	27 %
		Salg <0,074 mm	3 %

Modellen viste, at for at modellen skulle være økonomisk rentabel, og der skulle skabes større indtjening på betonfraktionen end på den genanvendelse, som finder sted i dag, skulle prisen på det neddelte betonaffald være ca. 140 % af den nuværende pris for sand.

Det er forventeligt, at en udvikling i prisen på naturligt sand ville forårsage en delvis stigning i prisen for neddelte betonaffald, idet disse to produkter er delvist relaterede. Selv hvis sandet skulle stige til denne pris, er det derfor forventeligt, at værdien af neddelte betonaffald ville stige tilnærmelsesvist tilsvarende. Derudover er der i dette grænsescenarie ikke medtaget CAPEX for processen. Hertil kommer eventuelle øgede processeringsomkostninger hos Saint-Gobain Weber, fx i form af en ny tørringssilo, og evt. øgede tørringsomkostninger for den neddelte beton grundet den øgede absorption af materialet i forhold til naturligt sand. For at drive processen ud fra et økonomisk incitament skulle der formentlig opnås en situation, hvor det ville blive betragteligt billigere at anvende genanvendt beton frem for naturligt sand, eller alternativt at lovgivning om genanvendt fint tilslag drev en adfærdsskift hos bygherrerne.

Ud fra et miljømæssigt perspektiv om at mindske anvendelsen af naturligt sand, som indvindes fra naturen, er argumentet fortsat uændret, og det vil være en miljømæssig fordel at anvende genanvendt tilslag som delvis erstatning for naturligt sand. Dog skal det tilføjes, at den anvendte betonfraktion i nogle tilfælde formentlig vil kunne tages fra den fraktion, som erstatter grus i tilslaget, og at de relative effekter heraf ikke indgår i den samlede vurdering.

Slutteligt kan det opsummeres, at det økonomiske incitament for at erstatte dele af naturligt sand i tilslaget i beton forventes at være rentabelt i en situation, hvor prisen stiger til 140 % i forhold til prisen på nedrivningsbeton. Eventuelle stigninger i priser på energi, CAPEX-omkostninger, udgifter til arbejdskraft osv. er ikke medtaget heri. Alternativt vil en lovgivningsændring, som fordrer en vis mængde genanvendt tilslag, og evt. et fastsat, genanvendt fintilslag kunne drive overgangen til at bruge genanvendt tilslag. De indledende tests og erfaringer fra projektet tyder umiddelbart på, at teknologien, med passende procesudvikling, sandsynligvis ville muliggøre genanvendt beton som delvis erstatning for sand i tilslaget.

6.2 Situationer, hvor genanvendt tilslag vil være en økonomisk rentabel løsning

Transport af beton udgør en betydelig del af omkostningerne i det nye setup. Denne transport er nødvendig for at opnå den ønskede tonnage på RGS Nordic's lokation i Gadstrup. En alternativ løsning kunne være at implementere aspirator og cyklon på hvert enkelt anlæg, hvilket ville eliminere behovet for at transportere store mængder beton mellem RGS-anlæggene. Dette scenarie ville reducere break-even-beløbet til blot 60 % af den nuværende sandpris, hvilket potentielt kunne skabe en rentabel forretning for alle involverede parter. For eksempel kunne den neddelte beton sælges for 80 % af sandprisen og skabe merværdi for begge aktører.

Denne løsning medfører dog andre logistiske udfordringer og kræver en øget CAPEX i form af flere haller og cyklon/aspirator-opstillinger på flere RGS-anlæg. Desuden ville det være nødvendigt at indsamle 0-4 mm-fraktionen fra RGS's tre anlæg på Sjælland i stedet for kun fra Gadstrup. Pladsmangel på de enkelte udgør derfor også en udfordring mht. opførelse af nye haller. Grundet disse øgede CAPEX-investeringer valgte projektets partnere ikke at forfølge denne model baseret på den udarbejdede forretningsplan.

Det er værd at bemærke, at en prisstigning af sand til mere end 140 % af den nuværende pris ville gøre modellen økonomisk rentabel, selv hvis al beton skulle transporteres til RGS Nordics lokation i Gadstrup.

Fremtidig lovgivning kan potentielt presse producenter til at inkorporere mere genanvendt materiale, muligvis på bekostning af de endelige produktpriser for forbrugeren. Det forventes, at byggebranchen, ligesom andre industrier såsom bilindustrien, i fremtiden vil blive mødt med nye lovkrav om indhold af genanvendte materialer (EUROPA-KOMMISSIONEN, 13.7.2023).

6.3 Afsluttende bemærkninger

Projektets partnere vurderer det teknisk muligt at anvende neddelte betonaffald som delvis erstatning for naturligt sand i nye betonprodukter. Det har vist sig muligt at sænke cementindholdet i den neddelte beton ved at frasortere dele af finmaterialet (<0,74 µm) ved brug af aspirator og cyklon. Variation i årstid og opbevaring af betonaffaldet skaber større ændringer i vandindholdet i den neddelte beton, der ved anvendelse som tilslag gav store variationer i den endelige betons fysiske egenskaber. Variation i fugtindhold blev umiddelbart betragtet som den største tekniske udfordring for at lykkes med projektet. At imødekomme denne udfordring ville stille krav til opbevaring og/eller tørring af betonaffaldet før nedknusning eller forud for frasortering af finmaterialet.

Nogle af projektets partnere valgte at afslutte projektet før tid, idet det blev vurderet at forretningspotentialet var for lavt. På baggrund heraf blev projektet afsluttet efter ca. 14 måneders projektarbejde. Der er forskellige måder, hvorpå man vil kunne skabe en bæredygtig forretningsmodel, som ville kræve en vis CAPEX-investering, men løsningerne blev ikke betragtet som tilstrækkeligt attraktive for de relevante projektpartnere. Alternativ vil en prisstigning for naturligt sand eller et lovgivningsindgreb betyde, at forretningspotentialet ville stige for erstatning af naturligt sand med neddelt betonaffald.

7. Referencer

DS/EN 206:2013+A2:2021: Beton Specifikation, egenskaber, produktion og overensstemmelse

DS 206:2024: Beton Specifikation, egenskaber, produktion og overensstemmelse – Regler for anvendelse af EN 206 i Danmark

DS/EN 12620 + A1:2008: Tilslag til beton

DS/EN 1097-6:213: Metoder til prøvning af tilslags mekaniske og fysiske egenskaber – Del 6: Bestemmelse af korndensitet og vandabsorption

Un Environment, Scrivener, K. L., Vanderley, J. M., Gartner, E. M.. (12.2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2-26.

Frølich, L. (11.2019). [Absorption i Tilslag til beton](#).

Hewlet, P. C., Liska, M.. (2019). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Fifth Edition.

Munch-Petersen, C. (27.11.2013) *Betonhåndbogen Kapitel 3.2 Tilslag*.
https://betonhaandbogen.dk/media/jxilmmand/kap_32_tilslag_27112013.pdf

The UK Green Building Council. (2024, November 15). Retrieved from Environmental impact on aggregate mining and dredging: <https://ukgbc.org/our-work/topics/embodied-ecological-impacts/aggregates/>

EUROPA-KOMMISSIONEN. (13.7.2023). *Forslag til EUROPA-PARLAMENTETS OG RÅDETS FORORDNING om krav om cirkularitet i design af køretøjer og om håndtering af udrangerede køretøjer, om ændring af forordning (EU) 2018/858 og (EU) 2019/1020 og om ophævelse af direktiv 2000/53/EF og 2005/64/EF*. Bruxelles: EUROPA-KOMMISSIONEN.

FORORDNING, E.-P. O. (13.7.2023). *om krav om cirkularitet i design af køretøjer og om håndtering af udrangerede køretøjer, om ændring af forordning (EU) 2018/858 og (EU) 2019/1020 og om ophævelse af direktiv 2000/53/EF og 2005/64/EF*. Bruxelles: EUROPA-KOMMISSIONEN.

Nielsen, C. V. (n.d.). *Beton Håndbogen*. Dansk Betonforening, 17-02-2016.

Özturan, T. &. (1997). Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths. . *Cement and Concrete Research*, 27(2), 165-170.

(2019). *Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources*. UN Environment Programme.

Bilag 1. Risikovurderinger

Bilag 1.1 Risikomatrice – Nedknusning

Risikoevalueringsskema						
		Risiko score (1-25) for hver teknologi-risiko kombi				
Alvorthed		A 3	A 3	A 3	A 3	A 3
Risiko	Forklaring af risiko	Høj CAPEX/OPEX	Kan ikke knuse homogent omkring 1 mm	Kræver ekstra enhedsoperation	Operationen forurener det nedknuste beton (fx vand)	Lav produktionskapacitet
		Info/Kommentarer				
Teknologi	Baggrund for valg					
Kæbeknuser (jaw crusher)			S 5 15	S 5 15	S 1 6	S 1 6
Kegleknuser (cone crusher)			S 3 9	S 5 15	S 1 6	S 2 6
Slagleknusere (impact crusher) / Rotationsknusere (horisontal)			S 1 6	S 2 6	S 1 6	S 1 6
VSI impact crusher (Vertikal)			S 1 6	S 5 15	S 1 6	S 3 9

FIGUR 17. Risikomatrice – Nedknusning.

Bilag 1.2 Risikomatrix – Teknologi til frasortering af finmaterialet

Risikoevalueringsskema							
		Risiko score (1-25) for hver teknologi-risiko kombination (Prc					
Alvorlighed		A 3	A 3	A 3	A 3	A 3	A 3
Teknologi	Risiko	CAPEX/OPEX	Kan ikke fjerne støvfraction (<64 µm)	Lav produktionskapacitet	Homogenitet omkring 1 mm	Kræver tørring	Kræver indendørsoperation
	Forklaring af risiko						
Baggrund for valg							
Sigtetårn	Hvad er forskellen på et sigtetårn og den type sigte der bruges nu?	15	5	5	5	15	Kræver 99.9% tørret material. De mindste fugt og så klæber alt til solden. Dyr proces at køre.
Aspirator med cyklon		6	6	5	5	6	Bruges som ofte som sekundær knuser. Reductions ratio 5:1. God til at nedele mindre stykker.
Fluidised bed		12	15	12	12	15	
Syrevaske	Urealistisk at bruge for betonet bliver gennemvædet	15	6	15	15	15	Reductions ratio 10:1. Giver meget fint materiale.
Vandfald med blæser	Arbejdsmiljømessigt er det et problem med en masse betonstøv der blæses rundt	6	9	5	15	9	Reductions ratio 8:1
Udvaskning af finere fraktion med vand		15	6	5	15	15	
Båndfilter		6	15	5	6	6	Virker på stor skala når man skal rense korn.

FIGUR 18. Risikomatrix – Teknologi til frasortering af finmaterialet.

Fremtidens cementprodukter baseret på genanvendte byggematerialer

Dette projekt havde til formål at undersøge mulighederne for at genanvende den findelte fraktion (≤ 4 mm, efterfølgende refereret til som sandfraktion) af nedknust betonaffald som erstatning for naturligt sand i produktionen af høj kvalitetscementprodukter hos Saint-Gobain Weber. Motivationen bag projektet var at reducere forbruget af naturligt sand, da overudnyttelse af denne ressource kan medføre alvorlige konsekvenser for økosystemer, biodiversitet og klima. Ved at genanvende byggeaffald, som fx beton fra nedrevne bygninger, kan man potentielt mindske behovet for sandsugning og fremme en mere cirkulær økonomi inden for byggebranchen.

Overordnet set viser projektet, at genanvendelse af betonaffald som erstatning for sand i cementprodukter er en lovende mulighed for at reducere forbruget af naturligt sand og fremme cirkulariteten inden for byggebranchen. Dog er der stadig tekniske og økonomiske udfordringer, der skal overvindes, før konceptet kan implementeres i større skala. Yderligere forskning og udvikling er nødvendig for at optimere processerne, ensrette materialeegenskaberne og forbedre den økonomiske bæredygtighed.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk