



Beton i et cirkulært perspektiv

En kritisk gennemgang af klimapotentialer for
genbrug og genanvendelse af beton



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**

Beton i et cirkulært perspektiv

En kritisk gennemgang af klimapotentiale for genbrug og
genanvendelse af beton



Udarbejdet af

Teknologisk Institut
Gregersensvej 1
2630 Taastrup
Bygninger og Miljø

December 2022

Forfatter: Stefania Butera



1. Sammenfatning og konklusion

Beton er blandt de største affaldsfraktioner i Danmark, og dens mest optimale behandlingsmetode har længe været en diskussion. Omdrejningspunktet har tit været, hvorvidt der reelt er klimagevinster at hente ved at fremme genanvendelse af knust beton som tilslag i ny beton ift. anden materialenyttiggørelse (når knust beton anvendes som ubundne bærelag under veje), som foreslået af bl.a. EU's affaldshierarkiet. Forskellige LCA'er er kommet frem til forskellige konklusioner, og der er behov for en kritisk analyse af beregningsforudsætninger, rammebetingelse og afgørende parametre.

Formålet med dette notat er, via en (ikke-udtømmende) kortlægning af de mest relevante undersøgelser, at belyse og perspektivere den eksisterende viden omkring klimapotentialer fra genbrug, genanvendelse og nyttiggørelse af beton i et LCA-perspektiv.

De eksisterende undersøgelser kan deles op i to hovedkategorier:

- en, hvor fokus er på levering af betonprodukter, enten vha. jomfruelige råstoffer eller sekundære råstoffer (og hvor resultaterne typisk angives pr. m³ beton); denne type studie kan ikke anvendes til at konkludere om en bestemt affaldshåndteringsmetode er bedre end en anden, men har udelukkende et produktperspektiv.
- en, hvor fokus er på affaldshåndtering af betonaffald, fx enten ved anvendelse som tilslag i ny beton eller som ubundne bærelag under veje eller via direkte genbrug (hvor resultaterne typisk angives pr. ton betonaffald).

Selvom den praktiske erfaring med direkte genbrug af betonelementer/betonaffald er begrænset, og datagrundlaget som følge heraf også er begrænset, peger al eksisterende viden i samme retning: der er betydelige klimagevinster at hente ved at fremme direkte genbrug af beton.

For genanvendelse er billedet mere nuanceret. De eksisterende undersøgelser peger i forskellige retninger, og produktionen af beton vha. genanvendt tilslag kan føre til enten større klimabelastninger end konventionel produktion af beton eller også en mindre reduktion af klimabelastninger. Afgørende parametre i denne sammenhæng er betonrecepten (og nærmere bestemt cementforbruget), det substituerede materiale (grusgravmateriale eller granit) og transportafstandene. Ligeledes når perspektivet er behandling af betonaffaldet, kan resultaterne svinge i den ene eller den anden retning (genanvendelse i ny beton har lavere klimaaftryk end nyttiggørelse som ubundne bærelag under veje, eller omvendt), alt afhængigt af det substituerede materiale (grusgravmateriale eller granit) og transportafstandene. Både transportafstandene, det substituerede materiale, samt betonrecepten er i deres natur også nogle meget case-specifikke parametre, hvilket gør det svært at generalisere.

Ud fra den gennemførte analyse er det muligt at konkludere, at genanvendelse af betonaffald som tilslag i ny beton bør overvejes prioriteret over nyttiggørelse i de tilfælde, hvor en eller flere af følgende forhold gør sig gældende:



- Betonaffald i høj kvalitet (fx beton til aggressiv eller ekstra aggressiv miljøpåvirkning), der er korrekt sorteret (dvs. at det ikke er blandet med andet betonaffald til lavere miljøpåvirkninger), og hvor der er identificeret en anvendelse i produktion af høj kvalitet beton, eller som kræver tilslag af højere kvalitet end grusgravmaterialer.
- Lokale genanvendelsesmuligheder, fx anvendelse på samme sted som eller med begrænset afstand fra nedrivningen og/eller vha. et mobilt knuseanlæg).
- Anvendelse i betonrecepter/-produkter, uden at øge cementindholdet.

En nærmere, case-specifik analyse bør derfor udføres for at belyse de konkrete forhold for projektet, da disse kan være afgørende for, om brug af tilslag fremstillet af genanvendt beton i sidste ende medfører en klimamæssig besparelse – eller i stedet udgør en (typisk begrænset) klimamæssig belastning.

2. Baggrund

Beton er blandt de mest anvendte byggematerialer i verden, og udgør i Danmark den største fraktion af byggeaffaldet: ifølge Affaldsstatistik 2019 (Miljøstyrelsen, 2020) udgør beton som ren fraktion knap 35% af den samlede mængde byggeaffald, når jord, asfalt, klapmateriale samt ballast trækkes fra. Derudover opgøres to blandende fraktioner: "Blandinger eller separerede fraktioner af beton, mursten, tegl og keramik" samt "Blandet bygnings- og nedrivningsaffald" (hhv. 15 % og 21 %), hvor beton også forventes at være til stede.

Mulige behandlingsmetoder for betonaffald er direkte genbrug (hvor hele betonelementer/-produkter udtages og genbruges igen, genanvendelse (hvor beton knuses og bruges som tilslag i ny beton) og materialenyttiggørelse (hvor affaldsmaterialer anvendes fx i nedknust form som ubundne bærelag under veje og i pladser). Ifølge Affaldsstatistik 2019 (Miljøstyrelsen, 2020) bliver 52 % af det samlede danske byggeaffald (og dermed også betonaffaldet) i dag sendt til anden materialenyttiggørelse (hvor affaldsmaterialer anvendes fx i nedknust form under veje og i pladser), mens 36 % af det genanvendes (for beton genanvendes det som tilslag i ny beton). Pga. ændringer i definitionen af "genanvendelse" er disse tal dog præget af stor usikkerhed, og i en nylig rapport fra Miljøstyrelsen (Fruergaard Astrup, 2022) estimeres, at kun maks. 0,1 % af høj kvalitet beton genanvendes. Der har længe været en diskussion om, hvorvidt der reelt er klimagevinster at hente ved at fremme genanvendelse af beton ift. anden materialenyttiggørelse, da beton i begge tilfælde fortrænger primære råstoffer som sten, sand eller grus. Forskellige LCA'er er kommet frem til forskellige konklusioner, og det kan være forvirrende at navigere rundt i den eksisterende viden uden en kritisk analyse af beregningsforudsætninger, rammebetingelse og afgørende parametre.

3. Formål

Formålet med dette notat er at præsentere og perspektivere den mest relevante viden omkring klimapåvirkninger fra genanvendelse og nyttiggørelse (og i mindre grad genbrug) af beton i et LCA-perspektiv, samt identificere de parametre, der har størst indflydelse på resultaterne.



4. Eksisterende viden om håndtering af betonaffald i et LCA-perspektiv

Dette afsnit præsenterer en (ikke-udtømmende) kortlægning af den mest relevant viden omkring klimapotentialet fra hhv. genbrug, genanvendelse og nyttiggørelse af beton. Det primære fokus har været danske undersøgelser, da den geografiske afgrænsning også kan have en betydning for resultaterne. Der er dog medtaget nogle få, særligt vigtige eller eksemplariske internationale studier.

Undersøgelserne kan deles op i to hovedkategorier:

- en, hvor fokus er på levering af beton, enten vha. jomfruelige råstoffer eller sekundære råstoffer (og hvor resultaterne typisk angives pr. m³ beton); denne type studie kan ikke anvendes til at konkludere, om en bestemt affaldshåndteringsmetode er bedre end en anden, men har udelukkende et produktperspektiv.
- en, hvor fokus er på affaldshåndtering af betonaffald, fx enten ved anvendelse som tilslag i ny beton eller som ubundne bærelag under veje eller via direkte genbrug (hvor resultaterne typisk angives pr. ton betonaffald).

Det er vigtigt at pointere, at nærværende kortlægning af eksisterende viden har været bred, og der er inkluderet undersøgelser og studier af forskellig kvalitet. Disse bliver kritisk gennemgået i det følgende.

4.1. Genbrug vs. øvrige cirkulære tiltag

Der er i samfundet stigende fokus på direkte genbrug af bl.a. byggematerialer. Dette sker på baggrund af bl.a. EU's affaldshierarki, øget opmærksomhed på ressourcebesparelser, samt på baggrund af de større forventede klimabesparelser, der kan opnås via direkte genbrug end via genanvendelse af byggematerialer (Butera & Fruergaard Astrup, 2022).

Direkte genbrug af betonelementer er dog ikke en bredt implementeret løsning endnu, da det indebærer en række udfordringer ifm. dokumentation af bærevner, kvalitet, skånsom nedtagning, samlingsmetoder, logistik, restlevetid, ansvar m.m. Der er bl.a. disse aspekter, der undersøges i projekter ([PRECAST](#) (MUDP-projekt koordineret af TI) og [Structural Reuse](#) (Grand Solution projekt koordineret af DTU, tidligere kendt som Business Reuse). Direkte genbrug af in-situ støbte betonkonstruktioner undersøges til gengæld kun i mindre grad.

De potentielle klimabesparelser ved genbrug af betonelementer er også blevet undersøgt i en håndfuld af studier, bl.a. (Andersen et al., 2019; Damgaard, 2020; Fruergaard Astrup, 2022; Henriksen et al., 2015).

I (Andersen et al., 2019) er klimapotentialer for anvendelse af sekundære materialer i nybyggeri beregnet for 11 materialer (murværk, stål, træ, gipsplader, vinduer, tagsten, ventilationsrør, aluminiumsplader, dør, tagpap og beton) og holdt op imod anvendelse af tilsvarende konventionelle, jomfruelige byggematerialer. Resultaterne i publikationen stammer fra en modellering af et cirkulært scenarie holdt op imod



et konventionelt scenarie, og er vist i Tabel 1. (Henriksen et al., 2015) estimerer også klimabelastningen fra beton, der enten er produceret vha. genbrug/genanvendelse eller på konventionel vis (resultaterne er også vist i Tabel 1). I (Damgaard, 2020) samt (Fruergaard Astrup, 2022) er der til gengæld taget et affaldsperspektiv, hvor forskellige behandlingsmetoder for bl.a. beton sammenholdes. Resultaterne fra disse undersøgelser er opsummeret i Tabel 2. I begge tabeller repræsenterer negative værdier en klimagevinst (dvs. sparet CO₂), mens positive værdier repræsenterer en klimabelastning (dvs. udledt CO₂).

Resultaterne vedr. genbrug fra (Andersen et al., 2019; Damgaard, 2020; Fruergaard Astrup, 2022; Henriksen et al., 2015) viser, at, uanset om vinklen har været nybyg eller affaldshåndtering, er direkte genbrug af beton altid en god idé for klimaet ud fra et LCA perspektiv. I de undersøgte studier antages typisk, at de genbrugte betonelementer kan bruges på samme vis (fx kan man opnå samme bæreevne, og de kan bruges på samme måde i det statiske system), hvilket ikke nødvendigvis er tilfældet. Ifølge (Andersen et al., 2019) giver genbrugte betonelementer en klimagevinst på 96 % ift. konventionelle, nyproducerede betonelementer (fra en klimabelastning på 308 kg CO₂ ækv./m³_{BETON} til en klimabelastning på 13,4 kg CO₂ ækv./m³_{BETON}). Resultaterne fra (Henriksen et al., 2015) viser ligeledes en klimagevinst på 97 % ift. konventionelle, nyproducerede betonelementer (fra en klimabelastning på 357 kg CO₂ ækv./m³_{BETON} til en klimabelastning på 11,9 kg CO₂ ækv./m³_{BETON}). Ifølge (Damgaard, 2020) giver direkte genbrug af betonaffald en klimagevinst, der er næsten 40 gange større ift. at anvende nedknust beton som ubundne bærelag under veje og i pladser (fra en klimabelastning på 2,2 kg CO₂ ækv./ton_{BETONAFFALD} til en klimabesparelse på -82,7 kg CO₂ ækv./ton_{BETONAFFALD}).

I (Fruergaard Astrup, 2022) holdes forskellige behandlingsmetoder for bl.a. beton op mod hinanden, bl.a. genbrug, genanvendelse i ny beton som erstatning af enten granit eller grusgravsmateriale, samt nyttiggørelse som ubundne bærelag under veje. Resultater for genbrug viser en klimabesparelse på -69,1 kg CO₂ ækv./ton_{BETONAFFALD}, med en klimagevinst, der er over 200 gange større ift. at anvende nedknust beton som ubundne bærelag under veje og i pladser (fra en klimabelastning på 0,3 kg CO₂ ækv./ton_{BETONAFFALD} til en klimabesparelse på -69,1 kg CO₂ ækv./ton_{BETONAFFALD}), og der er mellem 9 og 20 gange større ift. at genanvende nedknust beton i ny beton som erstatning til hhv. grusgravsmateriale eller granit (fra hhv. enten en klimabelastning på 3,6 kg CO₂ ækv./ton_{BETONAFFALD} eller en klimabesparelse på -7,1 kg CO₂ ækv./ton_{BETONAFFALD} til en klimabesparelse på -69,1 kg CO₂ ækv./ton_{BETONAFFALD}).

4.2. Genanvendelse vs. øvrige cirkulære tiltag

Klimapåvirkninger fra genanvendelse af beton som tilslag i ny beton er blevet undersøgt i adskillige studier, bl.a. (Andersen et al., 2019; Butera, 2019; Butera et al., 2015; Fruergaard Astrup, 2022; Henriksen et al., 2015; Jonas Vistesén, 2018; Lauritzen & Laugesen, 2020) på dansk niveau, og (Zhang et al., 2019) på europæisk plan.

I (Andersen et al., 2019) og (Henriksen et al., 2015) er fokus igen på nybyggeri med cirkulære kontra konventionelle byggevarer. Her er klimapotentialer for bl.a. anvendelse af beton med genanvendt tilslag sammenlignet med beton med konventionelt tilslag. Resultaterne fra (Andersen et al., 2019),



opsummeret i Tabel 1, viser, at produktion af beton ved brug af 20 % nedknust beton som groft tilslag kun giver en 0,3 % klimagevinst (fra en klimabelastning på 308,3 kg CO₂ ækv./m³_{BETON} til en klimabelastning på 307,4 kg CO₂ ækv./m³_{BETON}). Resultaterne fra (Henriksen et al., 2015) viser til gengæld, at produktion af beton ved brug af nedknust beton som erstatning til 20 % af groft tilslag og 10 % af fint tilslag rent faktisk giver en 4 % større klimabelastning (fra en klimabelastning på 222 kg CO₂ ækv./m³_{BETON} til en klimabelastning på 231 kg CO₂ ækv./m³_{BETON}). Dette skyldes primært, at den anvendte betonrecept krævede et 5 % højere cement forbrug ved brug af genanvendt tilslag ift. konventionel beton: ved at bruge nedknust beton som tilslag i ny beton, opleves der i nogle tilfælde en dårlig bearbejdelighed. I det tilfælde, der er beskrevet af (Henriksen et al., 2015), har man valgt at løse udfordringen ved at øge vandbehovet og som konsekvens heraf også cementindholdet for at opretholde det ønskede vand-cementtal.

Rapporten fra (Lauritzen & Laugesen, 2020) beskriver erfaringerne fra en case i København (Sydhavn Genbrugscenter), hvor knust beton fra nedrivning af skorstenen i HOFOR Amagerværket er blevet genanvendt som groft tilslag i ny beton til opførelse af Sydhavn Genbrugscenter i Valby. Resultaterne (jf. Tabel 1) viser en 17 % klimagevinst ved at producere beton med 100 % genanvendt groft tilslag ift. konventionel produktion af beton med jomfrueligt tilslag (se Tabel 1: fra en klimabelastning på 303,2 kg CO₂ ækv./m³_{BETON} til en klimabelastning på 251,6 kg CO₂ ækv./m³_{BETON}). Forfatterne understreger dog, at genbrugsbetonen blev designet med henblik på at opnå et så lavt cementforbrug som muligt, mens betonen med naturligt tilslag var en standard fabriksbeton, som ikke var optimeret specielt til dette projekt: "Var betonen med naturligt tilslag blevet optimeret, ville cementindholdet for denne beton sandsynligvis også kunne være reduceret til samme eller næsten samme niveau som for genbrugsbetonen" (citater fra (Lauritzen & Laugesen, 2020)). Derfor kan størstedelen af klimagevinsten (76 %) ikke tilskrives selve anvendelsen af sekundært tilslag. Ved kun at tage højde for den klimabesparelse, der rent faktisk kan tilskrives selve genanvendelsesprocessen, er de reelle klimagevinster kun 5 %. Disse skyldes primært den undgåede produktion og transport af granit fra Skåne i Sverige (hhv. 44 % og 42 %).

Studiet fra (Jonas Vistesén, 2018) beskriver ligeledes en case i København (Pelican Self Storage), hvor det har været muligt at fremstille ny beton med groft tilslag bestående af 100 % nedknust beton fra de eksisterende bygninger direkte på byggepladsen. Resultaterne viser en 11% klimagevinst ved at producere beton med genanvendt groft tilslag ift. konventionel produktion af beton med jomfrueligt tilslag (se Tabel 1: fra en klimabelastning på 334 kg CO₂ ækv./m³_{BETON} til en klimabelastning på 297 kg CO₂ ækv./m³_{BETON}). Dog skyldes ca. 68 % af besparelsen et antaget mindre spild (fra 6 % til 0 %) ved produktion af beton på byggeplads i stedet for på betonfabrik (dvs. en parameter, som ikke er direkte relateret til selve genanvendelsen, da produktion af beton på byggeplads altid er en mulighed, uanset om tilslaget er jomfrueligt eller genanvendt). Den resterende 32 % af klimabesparelsen skyldes primært den reducerede transport ved at genanvende betonen på stedet. Ved kun at tage højde for den klimabesparelse, der rent faktisk kan tilskrives selve genanvendelsesprocessen, er de reelle klimagevinster kun 4 %.



I (Butera, 2019) undersøges forskellige scenarier for produktion af både jomfrueligt og sekundært tilslag. Resultaterne fra rapporten kan bruges til at bygge to scenarier for genanvendelse af betonaffald. Det første scenarie omfatter knusning af betonaffaldet fra en betonfabrik (egen spildbeton) vha. et mobilt knuseanlæg, og inkluderer dermed følgende processer: transport af knuseanlægget til betonfabrikken (30 km), knusning samt produktionen af selve knuseanlægget. Da det er tale om egen spild fra betonfabrikken, kan den knuste beton bruges på samme sted til produktion af ny beton: både det grove og det fine tilslag bruges til substitution af enten jomfruelig granit, som importeres fra Norge (skibstransport i 700 km plus kørsel i 40 km), eller grusgravmaterialer fra Danmark (kørsel i 30 km).¹ Det andet scenarie omfatter de samme processer, men antager, at den knuste beton ikke kan bruges på samme sted, men i stedet skal transporteres i 40 km (fx kan dette scenarie omfatte enhver type betonaffald, som bliver knust på stedet vha. et mobilt knuseanlæg og så transporteres videre til en betonfabrik, hvor det kan bruges til produktion af ny beton.) Igen kan det sekundære tilslag (både det grove og det fine) bruges til substitution af enten jomfruelig granit, som importeres fra Norge (skibstransport i 700 km plus kørsel i 40 km), eller grusgravmaterialer fra Danmark (kørsel i 30 km). Det er således en hovedforudsætning for scenarierne, at det genanvendte tilslag kan bruges på samme vis som jomfrueligt tilslag (herunder samme cementforbrug og samme betonrecept). Resultaterne (som ses i

¹ En forudsætning for at anvende den fine fraktion som tilslag er, at den samlede procent genanvendt tilslag i den nye beton holdes relativt lav, hvorved den negative påvirkning af det fine tilslag på betonens kvalitet begrænses.



Tabel 2) viser, at det første scenarie (med in-situ knusning og anvendelse) giver en klimabesparelse på -39,4 til -1 kg CO₂ ækv./ton_{BETONAFFALD}. Den laveste værdi (dvs. den største klimabesparelse) opnås, når betonen erstatter norsk granit, mens den højeste værdi (dvs. den laveste klimabesparelse) opnås, når betonen bruges som erstatning for dansk grusgravsmateriale. Granit ses særligt anvendt til beton til høje miljøpåvirkninger, da der her stilles højere krav til tilslagsmaterialet, men der er også eksempler på, at det anvendes til lavere miljøpåvirkninger. For at kunne erstatte tilslag til beton i høj miljøpåvirkning er det et krav, at betonaffaldet stammer fra en beton i høj miljøpåvirkning. Resultater for scenarie 2 (hvor betonaffaldet ikke kan bruges in-situ men skal transporteres) viser en klimapåvirkning mellem -34,2 og +4,1 kg CO₂ ækv./ton_{BETONAFFALD}, dvs. resultaterne kan svinge mellem en klimabesparelse (når betonen erstatter norsk granit) til en lille klimabelastning (når betonen erstatter dansk grusgravsmateriale).

I rapporten fra (Fruergaard Astrup, 2022) holdes forskellige behandlingsmetoder for bl.a. beton op mod hinanden, bl.a. genanvendelse i ny beton som erstatning af enten granit eller grusgravsmateriale, samt nyttiggørelse som ubundne bærelag under veje. Scenariet for genanvendelse indebærer, at betonaffaldet knuses i en grov og en fin fraktion: den grove fraktion (60 % af den oprindelige mængde beton) genanvendes som groft tilslag i ny beton som erstatning for enten granit eller grus, mens den fine fraktion antages anvendt som fyldmateriale (grundet dets lave materialekvalitet er det antaget, at det ikke erstatter andre materialer). Resultater for genanvendelse viser en klimapåvirkning mellem -7,1 og +3,6 kg CO₂ ækv./ton_{BETONAFFALD}, dvs. resultaterne kan svinge mellem en klimabesparelse (når betonen erstatter granit) til en lille klimabelastning (når betonen erstatter dansk grusgravsmateriale). Resultaterne for nyttiggørelse som ubundne bærelag under veje viser en meget lille klimabelastning på 0,34 kg CO₂ ækv./ton_{BETONAFFALD}.

I (Butera et al., 2015) undersøges et scenarie for nyttiggørelse af betonaffald sammenlignet med et teoretisk scenarie, hvor betonaffald deponeres². I studiet er der dermed ikke foretaget nogen sammenligning med alternative cirkulære scenarier (fx genanvendelse eller direkte genbrug). Nyttiggørelsesscenariet omfatter transport af betonaffaldet, nedknusning, produktionen af selve knuseanlægget, transport til anvendelsesstedet samt substitution af grusgravsmateriale. Resultaterne viser en klimabelastning på 8,7 kg CO₂ ækv./ton_{BETONAFFALD}, når betonen anvendes som ubundne bærelag under veje, kontra en klimabelastning på 17,9 kg CO₂ ækv./ton_{BETONAFFALD}, når betonen deponeres.

² Det bør pointeres, at deponering af beton i praksis sker meget sjældent. Deponering er blevet undersøgt af (Butera et al., 2015) som referencescenariet, idet det var det eneste reelle alternativ til nyttiggørelse. Genanvendelse af knust beton som tilslag i ny beton var ikke nogen udbredt mulighed på det tidspunkt.



Undersøgelsen fra (Zhang et al., 2019) viser klimapåvirkninger fra anvendelse af mere avancerede knusningsmetoder (i analysen ADR³ og HAS⁴), der muliggør høj-kvalitets genanvendelse af flere fraktioner af det knuste materiale. Studiet sammenligner fire scenarier for oparbejdning af betonaffald til en kvalitet, der muliggør dets genanvendelse som tilslag i ny beton: 1) Referencescenarie, hvor betonaffaldet knuses vha. en vådproces, som producerer groft tilslag, en fin fraktion som kun kan bruges som fyldmateriale til landscaping (ikke som ubundne bærelag under veje), samt en slam-fraktion, som skal deponeres. 2) Stationært ADR-system, som producerer en grov 4-22 mm fraktion til brug som tilslag til beton (68 %), samt en fin 0-4 mm fraktion (32 %), som er forurenet og kun kan bruges til landscaping eller som ubundne bærelag under veje. 3) Mobilt ADR-system, som genererer de samme fraktioner som scenarie 2, dog vha. et mobilt anlæg, så der kan opnås transport-relaterede besparelser. 4) Mobilt ADR-system + HAS, hvor det tidligere beskrevne ADR-system kombineres med HAS teknologi, som kan skille sandet og cementpastaen ad i den fine fraktion. Her bliver den fine fraktion yderligere behandlet for at muliggøre dens anvendelse som "ultrafine partikler" (0-0,125 mm, 6,4 %), som kan erstatte en del af cementen i betonproduktion, samt som fin fraktion (0,125-4 mm, 25,6 %), som kan erstatte sandet i betonproduktion. Det skal bemærkes, at LCA-undersøgelsen er struktureret sådan, at den funktionelle enhed ikke kun er behandling af betonaffaldet, men også forsyning af de produkter, som behandlingsprocessen producerer (groft tilslag, fint tilslag, cement); helt konkret betyder det, at der ikke er nogen proces, der bliver fortrængt i fx scenarie 2, 3 og 4, men til gengæld processer, der skal tilføjes scenarie 1 (forsyning af jomfrueligt groft tilslag, jomfrueligt sand og cement), scenarie 3 og 4 (forsyning af jomfrueligt sand og cement). Derfor viser tallene (opsummeret i Tabel 3) en klimabelastning for alle 4 scenarier, i stedet for en klimabesparelse i nogle tilfælde. Analysen viser, at anvendelse af ADR+HAS teknologier kan føre til en reduktion i klimabelastning fra selve affaldsbehandlingen på 68% ift. den konventionelle våde knusning (jf. Tabel 3).

³ Advanced dry recovery (ADR) teknologi er blevet udviklet gennem EU projekter C2CA samt HISER og kan bruges som alternativ til den typiske våd-knusning metode, og producerer en grov fraktion i output. Den fine fraktion kan dog ikke valoriseres via ADR teknologi, og kan udelukkende anvendes som ubundne bærelag under veje eller til landscaping.

⁴ Heating-Air Classification System (HAS) teknologi er blevet udviklet gennem EU projekt VEEP og bruges i forlængelse af ADR teknologier til at forbedre kvaliteten af den fine fraktion, som så kan bruges som sand og cement partikler.



Tabel 1 Potentielle klimapåvirkninger fra hhv. cirkulær og konventionel beton. Negative værdier repræsenterer en klimagevinst (dvs. sparet CO₂), mens positive værdier repræsenterer en klimabelastning (dvs. udledt CO₂).

Kilde	Genbrugte betonelementer	Beton med genanvendt tilslag	Konventionel beton	
Andersen et al., 2019	13.43	307.4 (20 % groft)	308.3	kg CO ₂ -ækv./m ³ _{BETON}
Henriksen et al., 2015	11.9		357.1	kg CO ₂ -ækv./m ³ _{BETON}
		231.0 (10 % fint, 20 % groft)	222.0	kg CO ₂ -ækv./m ³ _{BETON}
Jonas Vistesens, 2018		296.8 ^a (100 % groft)	333.8	kg CO ₂ -ækv./m ³ _{BETON}
Lauritzen & Laugesen, 2020		251.6 ^b (100 % groft)	303.2	kg CO ₂ -ækv./m ³ _{BETON}

^a De opnåede klimabesparelser (11 %) skyldes en generisk receptoptimering, som ikke var relateret til brug af genanvendt tilslag, og bør derfor ikke medtages i beregningerne. Ved kun at tage højde for den klimabesparelse, der rent faktisk kan tilskrives selve genanvendelsesprocessen, er de reelle klimagevinster kun 4 %.

^b De opnåede klimabesparelser (17 %) skyldes en generisk receptoptimering, som ikke var relateret til brug af genanvendt tilslag, og bør derfor ikke medtages i beregningerne. Ved kun at tage højde for den klimabesparelse, der rent faktisk kan tilskrives selve genanvendelsesprocessen, er de reelle klimagevinster kun 5 %.



Tabel 2 Potentielle klimapåvirkninger for forskellige behandlingsmetoder for betonaffald. Negative værdier repræsenterer en klimagevinst (dvs. sparet CO₂), mens positive værdier repræsenterer en klimabelastning (dvs. udledt CO₂).

	Genbrug	Genanvendelse		Nyttiggørelse	Deponi	
Damgaard, 2020	-82.7			2.24		kg CO ₂ -ækv./t _{BETONAFFALD}
Butera, 2019 ^a		-39.38	-1.04			kg CO ₂ -ækv./t _{BETONAFFALD}
		-34.23	4.11			
Fruergaard Astrup, 2022 ^b	-69.1	-7.1	3.6	0.34		kg CO ₂ -ækv./t _{BETONAFFALD}
Butera et al., 2015				8.7	17.9	kg CO ₂ -ækv./t _{BETONAFFALD}

^a I Fruergaard Astrup, 2022 antages betonaffaldet kun at substituere groft tilslag i ny beton. Den fine fraktion af betonaffaldet antages anvendt som fyldmateriale, som pga. dets lave materialekvalitet ikke erstatter andre materialer

^b I de scenarier, beregnet ud fra Butera et al., 2015, antages betonaffaldet at substituere både fint og groft tilslag i ny beton, dog i lave procent.

Tabel 3 Potentielle klimapåvirkninger for forskellige avancerede genanvendelsesmetoder for betonaffald samt forsyning af de produkter, som behandlingsprocessen producerer (groft tilslag, fint tilslag, cement). Negative værdier repræsenterer en klimagevinst (dvs. sparet CO₂), mens positive værdier repræsenterer en klimabelastning (dvs. udledt CO₂).

Kilde	BAU – WP (Wet Processing)	ADR-S (Advanced Dry Recovery, stationary)	S3 ADR-M (Advanced Dry Recovery, mobile)	S4 A&H (Advanced Dry Recovery + Heating-Air Classification System)	
Zhang et al., 2019	51.50	48.50	42.40	16.30	kg CO ₂ -ækv./t _{BETONAFFALD}



5. Analyse og diskussion

Selvom den praktiske erfaring med direkte genbrug af betonelementer/betonaffald er begrænset, og datagrundlaget som følge heraf også er begrænset, peger al eksisterende viden i samme retning: der er betydelige klimagevinster at hente ved at fremme direkte genbrug af beton.

For genanvendelse er situationen mere kompleks. De eksisterende undersøgelser peger i forskellige retninger, og produktion af beton vha. genanvendt tilslag kan føre til enten større klimabelastninger end konventionel produktion af beton (fx + 4 % i (Henriksen et al., 2015)) eller også begrænsede besparelser af klimabelastninger (-0,3 % i (Andersen et al., 2019), -4 % i (Jonas Vistesén, 2018) og -5 % i (Lauritzen & Laugesen, 2020)⁵). Afgørende parametre i disse undersøgelser er betonrecepten (og nærmere bestemt cementforbruget), det substituerede materiale (grusgravmateriale eller granit) og transportafstandene. Hvad angår behandling af betonaffaldet og sammenligning af genanvendelse i beton kontra nyttiggørelse som ubundne bærelag under veje, her overlapper resultaterne fra de eksisterende undersøgelser delvist (Butera, 2019; Butera et al., 2015; Damgaard, 2020; Fruergaard Astrup, 2022), alt afhængigt af det substituerede materiale (grusgravmateriale eller granit) og transportafstandene.

Både transportafstandene, det substituerede materiale, samt betonrecepten er i deres natur også nogle meget case-specifikke parametre, hvilket gør det svært at generalisere. Deres indflydelse på resultaterne beskrives nærmere i det følgende.

5.1. Afgørende parametre

Betonrecept

En af de største udfordringer ved brug af genanvendt tilslag er, at nedknust beton kan reducere bearbejdigheden af den nye beton. Det kan fx skyldes kornkurven, hvor nedknust beton ofte har et højere indhold af finstof end naturligt tilslag, hvilket bl.a. kan resultere i lavere bearbejdighed. Der vil ikke nødvendigvis altid ske en reduktion af bearbejdigheden. Det afhænger bl.a. af egenskaberne af det tilslag, som substitueres, egenskaberne af det genanvendte tilslag og hvor store substitutionsgrader, der anvendes. Hvis der sker en uacceptabel reduktion af bearbejdigheden, kan det afhjælpes på flere måder, fx en generel receptoptimering af de anvendte mængder/typer af tilslag, anvendelse af et andet plastificeringsmiddel eller tilsætning af en højere dosering, eller alternativt et øget vandindhold i betonen. Sidstnævnte mulighed kan betyde, at det bliver nødvendigt også at øge cementindholdet, hvis vand/cement-forholdet skal fastholdes.

Idet fremstilling af cement har en betydelig større klimapåvirkning end produktion af tilslag, er det afgørende at belyse det eksakte, case-specifikke cementforbrug, når nedknust beton bruges som tilslag. Bemærk at der findes betoner på markedet med genanvendt tilslag, hvor et øget cementindhold ikke

⁵ Her nævnes de reelle klimabesparelser, der rent faktisk kan tilskrives genanvendelsesprocessen, se afsnit 4.2.



har været nødvendigt. Derudover er det ikke alle betontyper, der har de samme krav til bearbejdeligheden som fx fabriksbeton har (fx til belægningssten, betonfliser og kantsten).

Der har tværtimod også været tale om mulige besparelser af cement ved brug af genanvendt tilslag (som fx i (Jonas Vistesén, 2018) og (Lauritzen & Laugesen, 2020)): ved en nærmere analyse har disse vist sig at skyldes en generisk receptoptimering, som slet ikke var relateret til anvendelse af genanvendt tilslag, og som derfor ikke bør medtages i beregningerne. Eventuelle påstande om mulige besparelser af cement ved brug af genanvendt tilslag bør derfor evalueres kritisk, og kun de reelle klimabesparelser, der rent faktisk kan tilskrives selve genanvendelsesprocessen, bør medtages i beregningerne.

Selvom det ikke har direkte indflydelse på selve betonrecepten, findes der også mere avancerede knusningsteknologier for betonaffald (fx (Zhang et al., 2019)), der kan tillade en delvis substitution af cementen (nærmere beskrevet i afsnit 4.2). Dette kan være med til at reducere det samlede klimaaftryk fra behandlingen af betonaffaldet.

Substitueret materiale

Produktion af grusgravsmaterialer som grus, sand og sten er typisk forbundet med et begrænset klimaaftryk. Derudover findes flere grusgrave i Danmark, hvilket betyder, at transportafstanden typisk er begrænset. Forskellige klasser/anvendelser af beton kræver dog forskellige kvaliteter af tilslag, og i nogle tilfælde (typisk de mest aggressive miljøpåvirkninger) er det nødvendigt at anvende mere holdbare tilslag, fx granitskærver til stenfraktionen. Granitstilslag udvindes ved sprængning, knusning og fraktionering i stenbrud, der typisk er placeret i Sverige eller Norge, og skal dermed også importeres derfra. Forsyning af granitskærver har dermed et betydeligt større klimaaftryk end naturligt grusgravsmateriale (en faktor 10 større ifølge fx (Butera, 2019)). Det skal dog også nævnes, at der nogle gange bruges granitskærver til beton i lavere miljøpåvirkninger af praktiske årsager for betonproducenten.

Hvilket materiale man rent faktisk fortrænger kan derfor være afgørende ift. resultaterne, og identificeringen af det substituerede materiale kræver en konkret, case-specifik vurdering.

Transport

Transport er en parameter, som kan variere betydeligt fra byggeprojekt til byggeprojekt. Fx kan produktion af tilslag af genanvendt beton foregå enten på stedet uden transport ved brug af et mobilt knuseanlæg (her skal man dog være opmærksom på, at der kan være særlige krav til mobile blandede anlæg, hvis man også ønsker at blande direkte på pladsen), eller det kan foregå andetsteds, sådan at betonen skal transporteres forskellige afstande afhængigt af det konkrete byggeprojekt. Generelt spiller transport en afgørende klimamæssig rolle for genanvendelse af tunge materialer som beton og tegl, idet de materialer, de kan erstatte, ofte ikke er forbundet med en særlig høj klimabelastning at producere, især når det drejer sig om grusgravsmateriale (jf. fx (Butera, 2019)).



5.2. Konklusion

Ud fra den gennemførte analyse er det muligt at konkludere, at genanvendelse af betonaffald som tilslag i ny beton bør overvejes prioriteret over nyttiggørelse i de tilfælde, hvor en eller flere af følgende forhold gør sig gældende:

- Betonaffald i høj kvalitet (fx til aggressiv eller ekstra aggressiv miljøpåvirkning), der er korrekt sorteret (herunder ikke blandet med andet betonaffald i lavere miljøpåvirkning), og hvor der er identificeret en anvendelse i produktion af høj kvalitet beton, eller som kræver tilslag af højere kvalitet end grusgravmaterialer.
- Lokale genanvendelsesmuligheder, fx anvendelse på samme sted som eller med begrænset afstand fra nedrivningen og/eller vha. et mobilt knuseanlæg.
- Anvendelse i betonrecepter/-produkter, uden at øge cementindholdet.

En nærmere, case-specifik analyse bør derfor udføres for at belyse de konkrete forhold for projektet, da disse kan være afgørende for, om brug af tilslag fremstillet af genanvendt beton i sidste ende medfører en klimamæssig besparelse – eller i stedet udgør en klimamæssig belastning.



6. Litteraturliste

- Andersen, C. E., Rasmussen, F. N., Zimmermann, R. K., Kanafani, K., & Birgisdóttir, H. (2019). Livscyklusvurdering for cirkulære løsninger med fokus på klimapåvirkning. Forundersøgelse. In *Sbi 2019:08*. <https://build.dk/Pages/Livscyklusvurdering-for-cirkulaere-loesninger-med-fokus-paa-klimapaavirkning.aspx>
- Butera, S. (2019). Ressourceeffektive anlægs- konstruktioner. In *Performance contract for resource efficient infrastructures (RK E6)*. <https://www.teknologisk.dk/ydelser/baeredygtigt-byggeri/lca-life-cycle-assessment/30894,7>
- Butera, S., Christensen, T. H., & Astrup, T. F. (2015). Life Cycle Assessment of construction and demolition waste management. *Waste Management*, 44, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.011>
- Butera, S., & Fruergaard Astrup, T. (2022). Effektivurdering i Circular Builders projektet. In *Gate 21*. https://www.gate21.dk/wp-content/uploads/2022/09/Samlet-notat_Circular-Builders.pdf
- Damgaard, A. (2020). *Cirkulær økonomi i byggeriet Analyse af potentialer for øget genbrug og genanvendelse af byggeaffald/Bilagsrapport A*. <https://bpst.dk/da/-/media/BPST-DA/Byggeri/Lister/Publikationer/LCA-Bilagsrapport-A.pdf>
- Fruergaard Astrup, T. (2022). Selektiv nedrivning i byggebranchen - Livscyklusvurdering (LCA) af konsekvenser ved selektiv nedrivning. In *Miljøprojekt nr. 2185, 2022* (Issue 2185). <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2022/02/978-87-7038-353-0.pdf>
- Henriksen, T., Juel-Hansen, L., & Mathiesen, D. (2015). *Udredning af teknologiske muligheder for at genbruge og genanvende beton*.
- Jonas Vistesén. (2018). Genanvendelse af knust beton i nye betonkonstruktioner. In *MUDP Rapport*. <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2018/08/978-87-93710-69-6.pdf>
- Lauritzen, E. K., & Laugesen, P. (2020). Genbrug af beton, Sydhavn Genbrugscenter. Erfaringsopsamling. In *Københavns Kommune, ARC*. <https://www.danskindustri.dk/DownloadDocument?id=272979&docid=276887>
- Miljøstyrelsen. (2020). *Affaldsstatistik 2019* (Issue Miljøprojekt nr. 2152).
- Zhang, C., Hu, M., Dong, L., Gebremariam, A., Miranda-Xicotencatl, B., Di, F., & Tukker, A. (2019). Eco-efficiency assessment of technological innovations in high-grade concrete recycling. *Resources, Conservation & Recycling*, 149(June), 649–663. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.023>



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**