

21.1 Bæredygtig Beton

Af Claus V. Nielsen, Lars Nyholm Thrane, og Dorte Mathiesen



Figur 1. Denne bro er det første bygværk, der blev fremstillet med anvendelse af "Grøn Beton". Broen – Vejdirektoratets Bro 34 på Riis-Ølholm strækningen i Tørring - er opført i 2002 og siden udvidet i 2009 – også med grønne betoner. [1]

Beton og cement er verdens mest anvendte byggematerialer og bidrager derfor med et ikke uvæsentligt aftryk på en række miljøparametre. En årsag hertil er, at fremstilling af cement globalt set bidrager med 5-8 % af den totale CO₂-udledning.

Jævnligt ser man følgende simple opsummering vedrørende byggeriets miljøbelastning¹:

- 40 % af Danmarks energi forbruges i bygninger
- 35 % af al affald kommer fra byggebranchen
- 20 % af Danmarks CO₂-udslip stammer fra drift af bygninger
- 10 % af Danmarks CO₂-udslip stammer fra materialeproduktion i byggeriet og til bygge- og anlægsprocessen

Historik

Der har igennem de seneste årtier været stor opmærksomhed på reduktioner i byggeriets energiforbrug til drift, opvarmning og ventilation i brugsfasen. I de senere år har man desuden set en større og større fokusering på miljørigtigt materialevalg, CO₂-aftryk, cirkulær økonomi og anvendelse af livscyklusanalyse i forbindelse med valg af bæredygtige løsninger. Alt sammen emner, der er blevet meget mere aktuelle i løbet

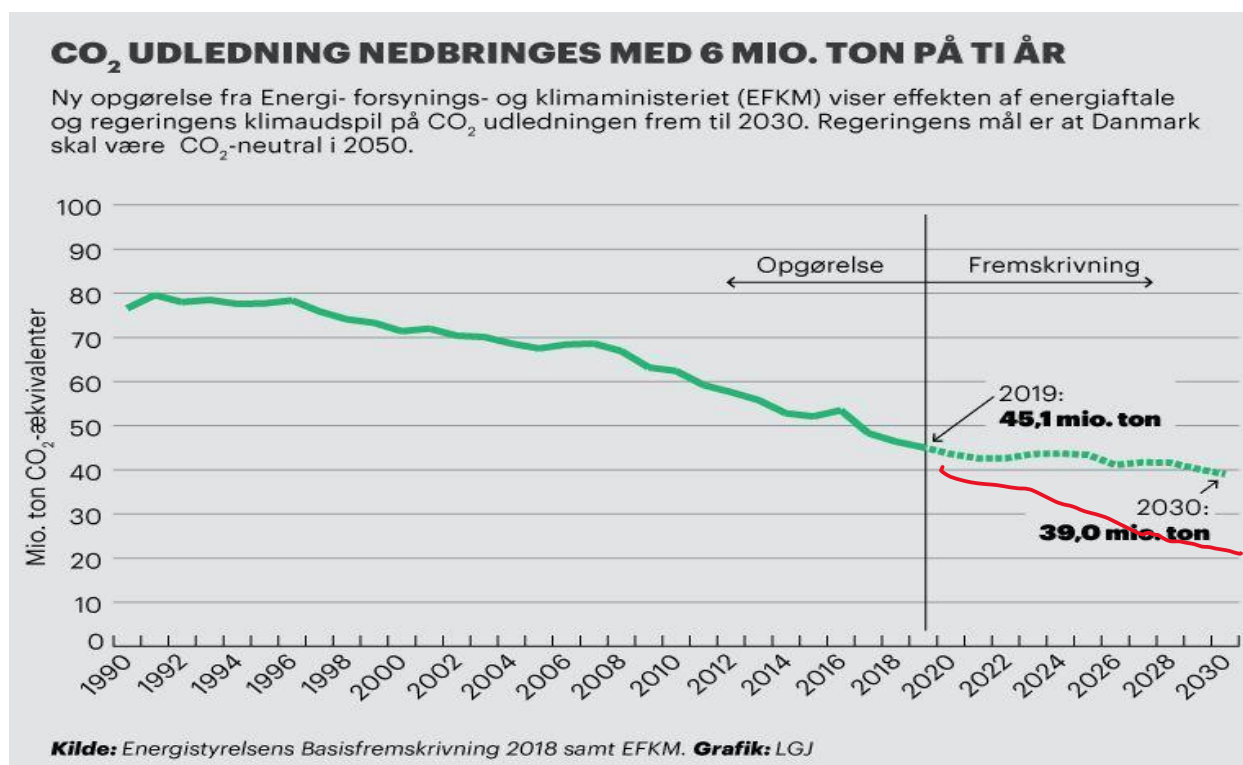
¹ Regeringens klimapartnerskaber, Bygge- og anlægssektoren, marts 2020.

af 2019 og 2020, da det danske folketing vedtog en klimalov indeholdende et mål om 70 % reduktion i CO₂-udledningen frem mod 2030 set i forhold til niveauet i 1990.

Dette kapitel vil give en generel indføring i bæredygtighedsbegrebet og betons rolle i forhold til bæredygtighed, herunder miljøpåvirkninger fra cement, beton og betonkonstruktioner. Desuden vil der blive opsummeret nogle af de væsentligste danske beton-milepæle i forhold til dette emne.

Målsætning for betonindustrien

Branchesammenslutningen Dansk Beton lancerede i 2019 netværket Bæredygtig Beton initiativet² og udgav sin "Roadmap imod 2030" for betonbranchen [2]. I samme periode fremsatte den danske regering forslag til en ny klimalov indeholdende en målsætning om en 70 % reduktion af drivhusgasudledningen i Danmark frem mod 2030. Branchesammenslutningens Roadmap var baseret på en interviewundersøgelse i 2017, hvor producenter, rådgivere og bygherrer blev spurgt om holdninger og ideer til bæredygtighed, CO₂-reduktioner og grønne løsninger indenfor betonbranchen (se www.baeredygtigbeton.dk). I sin Roadmap har Bæredygtig Beton initiativet opstillet en ambitiøs målsætning om en halvering af CO₂-udslippet indtil 2030 [2].



Figur 2. Tendenslinjer for CO₂-udslippet fra beton siden referenceåret 1990. Kilde: Præsentation af Dansk Beton ved Kick-Off arrangement for Bæredygtig Beton initiativet 2019-09-19. Reduktionen på 50 % er relativ set i forhold til 2019 niveauet, hvilket stort set svarer til en 70 % reduktion i forhold til 1990, som det også fremgår af Figur 2. Mellem 1990 og 2019 er CO₂-

² Dansk Betons Bæredygtighedsinitiativ, www.baeredygtigbeton.dk

udslippet i Danmark faldet med knap 40 %, hvilket også antages at være gældende for betonindustrien. Den røde fremskrivningskurve i Figur 2 viser udslippet, hvis målet skal nås og den grønne stiplede viser udslippet baseret på de tiltag, som blev iværksat i 2019.

Ud over at beskrive målsætningen indeholder Roadmappen en definition af baseline (baseret på 2019 produktionstal) og en beskrivelse af 35 konkrete initiativer, der skal medvirke til at opfylde målsætningen. Alt dette er nærmere beskrevet i afsnit 21.1.1.3.

21.1.1 Introduktion

I starten af nulserne blev der oprettet et nordisk netværk under Nordisk Ministerråd, som bl.a. blev enige om følgende definition på begrebet "grøn beton". Bemærk, at der er tale om beton i konstruktioner og ikke blot beton som materiale.

"An environmentally sustainable concrete structure is a structure that is constructed so that the total environmental impact during the entire lifetime, including use of the structure, is reduced to a minimum. This means that the structure shall be designed and produced in a manner that is tailor-made for the use, i.e. to the specified lifetime, loads, environmental impact, maintenance strategy, heating needs, etc.. This shall be achieved by utilizing the inherent environmentally beneficial properties of concrete, e.g. the strength, durability, and the thermal capacity. Furthermore, the concrete constituents shall be extracted and produced in an environmentally friendly matter. "

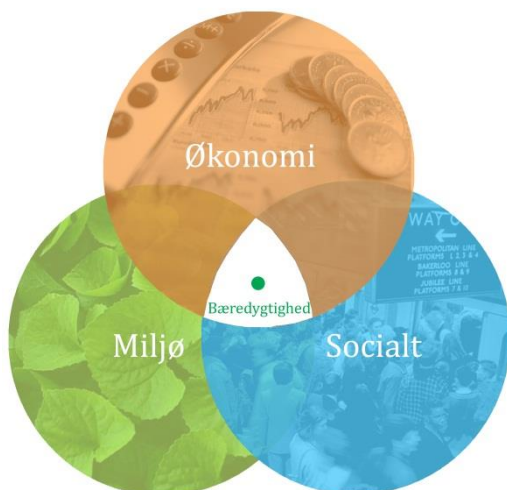
Betonbranchen i Danmark har igennem flere årtier været optaget af at nedbringe miljøpåvirkningerne i forbindelse med fremstilling og anvendelse af cement og beton - i tråd med ovenstående definition. I forbindelse med et stort dansk udviklingsprojekt, der foregik i perioden 1998-2002, opstod begrebet "Grøn Beton" [1,4,5,6], og Danmark blev kendt internationalt som foregangsland inden for udvikling af beton med reducerede miljøpåvirkninger.

Allerede i 1980'erne var bæredygtighedsbegrebet blevet defineret bl.a. i Brundtland rapporten fra 1987 som et globalt begreb, der inddrog alle de sociale, økonomiske og miljømæssige aspekter. Bæredygtighed beskriver således en vej for fremtidig udvikling "... som opfylder de nuværende generationers behov uden at bringe fremtidige generationers muligheder for at opfylde deres behov i fare".

Figur 3 illustrerer, hvordan bæredygtighedsbegrebet kan opfattes, når man tager hensyn til både de sociale, de økonomiske og de miljømæssige aspekter. Et af de tydeligste eksempler på dette er DGNB³ bæredygtighedscertificeringsordningen, der administreres og styres af DK-GBC (den danske afdeling af Green Building Council). DGNB

³ DGNB = Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen. Tysk system for bæredygtigt byggeri som er det fremherskende i Danmark. Se www.dk-gbc.dk

udsteder certifikater til byggerier, som har gennemgået en speciel dokumentation i forhold til en række bæredygtighedskriterier. DGNB har så at sige sat bæredygtighedsbegrebet på formel.



Figur 3. I bæredygtighedsbegrebet arbejdes der ud fra en balancering mellem effekter på miljøet, økonomien og de sociale aspekter.

De vigtigste bedømmelseskriterier indenfor DGNB omfatter:

- Livscyklusanalyser på miljøpåvirkninger og CO₂-udledninger, omfattende energiforbrug og CO₂ indlejret i byggematerialerne i produktionsfasen, energiforbrug til drift af byggeriet samt miljøpåvirkninger fra udskiftninger af komponenter i brugsfasen samt nedrivning og genanvendelse efter endt levetid.
- Opgørelse af omkostninger til byggeriets opførelse samt til drift og vedligehold igennem hele brugsfasen.
- Sociale aspekter vedr. omgivelser, adgangsforhold, belysning, tryghed mv.
- Tekniske kriterier vedr. fleksibilitet i indretning og arealudnyttelse samt design mht. akustik, indeklime, brandsikkerhed, etc.
- Cirkulær økonomi i form af design, der øger muligheder for genanvendelse og genbrug efter endt levetid.

I alt er der ca. 35 kriterier, som alle bidrager med point til at opnå et DGNB-certifikat. Systemet er skruet sammen således, at man skal opnå høje point indenfor alle områder for at få et certifikat. Indtil nu er det primært prestigebyggerier, domicilbyggerier, institutioner og offentlige byggerier, som har opnået DGNB, men ordningen breddes langsomt ud til mere almindeligt byggeri i takt med, at bygherrerne får øjnene op for fordelene.

Samtidig er der i 2020 indført en frivillig bæredygtighedsklasseordning i Danmark, som indeholder nogle af de samme elementer som DGNB. Indtil 2023 er ordningen frivillig, mens der opnås erfaringer og indhentes data. Derefter bliver ordningen obligatorisk i bygningsreglementet for byggeri over 1000 m², hvor der indføres CO₂-krav på alle større byggerier, jf. afsnit 21.1.4.2.

Denne øgede opmærksomhed og fokus på bæredygtighed i byggeriet, samt den generelle interesse i samfundet for global opvarmning, klimasikring mv., har medført, at

stort set alle rådgivere og arkitekter arbejder med bæredygtighed i en eller anden form og har en holdning til, hvordan det skal forstås. Dette smitter naturligvis af på byggeriets leverandører og i særdeleshed på betonbranchen, der har nogle helt specielle udfordringer, når man taler om bæredygtighed og miljøpåvirkninger. Det er almindeligt kendt, at beton har en lang række fordele, når det bruges til byggeri:

- Beton er et robust materiale med lang levetid og god beskyttelse overfor naturkatastrofer, jordskælv, oversvømmelser, brand mv.
- Beton er et billigt materiale, der er lokalt tilgængeligt i alle dele af verden.
- Beton er modstandsdygtigt overfor fugtpåvirkning og nærer ikke skimmelvækst.
- Beton giver godt termisk indeklima og god lydisolering.
- Beton kan genanvendes efter mange års brug.

Men eftersom beton fremstilles med cement som bindemiddel - og selvom cementen kun udgør omkring 15 % af betonen - er cementen kilde til næsten 90 % af CO₂-udslippet forbundet med fremstilling af beton. Hovedbestanddelen af beton er sand og sten, der indvindes fra grusgrave, fra havbunden, eller fra stenbrud, men som kun bidrager i mindre grad til betonens CO₂-aftryk.

En anden vigtig bestanddel af betonkonstruktioner er armering i form af enten (slappe) armeringsstænger, eller spændt armering. Armeringen er udført i stål og har et relativt højt CO₂-aftryk, men da armeringen kun udgør 5 til 10 % af en betonkonstruktion, bliver også armeringens CO₂-aftryk begrænset.

Når man ønsker at reducere CO₂-aftrykket for en given betonkonstruktion, er der typisk tre metoder, der virker:

- Anvendelse af en cement med reduceret CO₂-aftryk.
- Optimering (dvs. reduktion) af cementforbruget i beton.
- Reduktion af mængden af beton i konstruktionen.

De to første metoder ligger hos betonproducenten, mens den sidste ligger hos den projekterende. I visse situationer er producent og designer sammenfaldende, hvilket fx ofte er tilfældet for præfabrikerede betonelementer. Dette kan ofte resultere i en højere grad af optimering.

Brug ikke højere styrkeklasse og holdbarhedsklasse, end der er behov for...

Samme funktion men lavere miljøpåvirkning...

Oveni disse generelle regler skal der være fokus på at undgå overspecifikation og indbygning af ekstra sikkerhedstillæg medmindre, at det er absolut nødvendigt. Samtidigt er det dog vigtigt, at bæredygtigheden ikke sættes over styr ved at vælge materialer, som ikke kan opfylde de gængse krav til byggeriets robusthed og holdbarhed. Udgangspunktet er derfor, at holdbarheden ikke må reduceres ved at anvende de grønne betonløsninger.

Det forventes, at der bliver større fokus på materialeforbrug og indlejret CO₂ i fremtiden, ligesom de tunge byggematerialer - beton, stål og tegl - kan forvente øget konkurrence fra andre byggematerialer såsom træ - også til bærende konstruktioner.

21.1.1.1 Vigtige begreber indenfor bæredygtighed

I det følgende er der forklaret nogle begreber og forkortelser, der ofte optræder, når man taler om bæredygtighed og forsøger at kvantificere miljøpåvirkningen fra et produkt eller et materiale. Mange af disse begreber er generelle og ikke specielt relateret til beton, men her beskrevet med udgangspunkt i betonkonstruktioner.

Igennem hele dette kapitel benyttes betegnelsen CO₂ generelt om alle de drivhusgasser, der medfører global opvarmning. Der er tale om en familie af gasser med forskelligt potentiale og normalt opgøres indlejret CO₂ i kg CO₂-ækvivalenter.

Funktionel enhed/deklareret enhed

Når man gennemfører en livscyklusanalyse på et system eller et produkt, er det vigtigt, at produktet er veldefineret. Derfor anvender man begrebet en deklareret enhed eller i nogen tilfælde en funktionel enhed, som er beskrevet i det enkelte produkts EPD. Typisk er der tale om en kvantificering i vægt eller volumen af det produkt, man foretager sin analyse på. For betonprodukter anvendes ofte følgende deklarerede enheder:

- For fabriksbeton anvendes enheden 1 m³ beton.
- For betonprodukter såsom belægningssten, tagsten mv. benyttes oftest enheden 1 m² færdig belægning eller tagflade.
- For betonelementer såsom vægge og dæk benyttes oftest enheden 1 m², eller vægt i kg inkl. armering.
- For armeringsstål anvendes oftest 1 tons som deklareret enhed.
- For bulkvarer såsom cement, tilslag mv. anvendes oftest enheden 1 tons.

I alle tilfælde skal vægten af den deklarerede enhed også altid angives således, at man kan konvertere tallene efter behov.

Foruden definitionen af den deklarerede enhed skal en EPD indeholde oplysninger om forventet levetid for produktet. For betonprodukter svarer dette typisk til 100 år. I de tilfælde, hvor livscyklusanalysen kun omfatter produktionsfaserne (vugge til port), skal der ikke medtages forventet levetid. For visse produkter kendes levetiden ikke, enten fordi man ikke kender den endelige funktion af produktet, eller fordi produktet indbygges i andre byggematerialer - fx en armeringsstang eller cement.

EPD er forkortelse for Environmental Product Declaration (miljøvaredeklaration).

Se detaljeret beskrivelse af EPD sidst i dette afsnit.

Livscyklusanalyse (LCA)

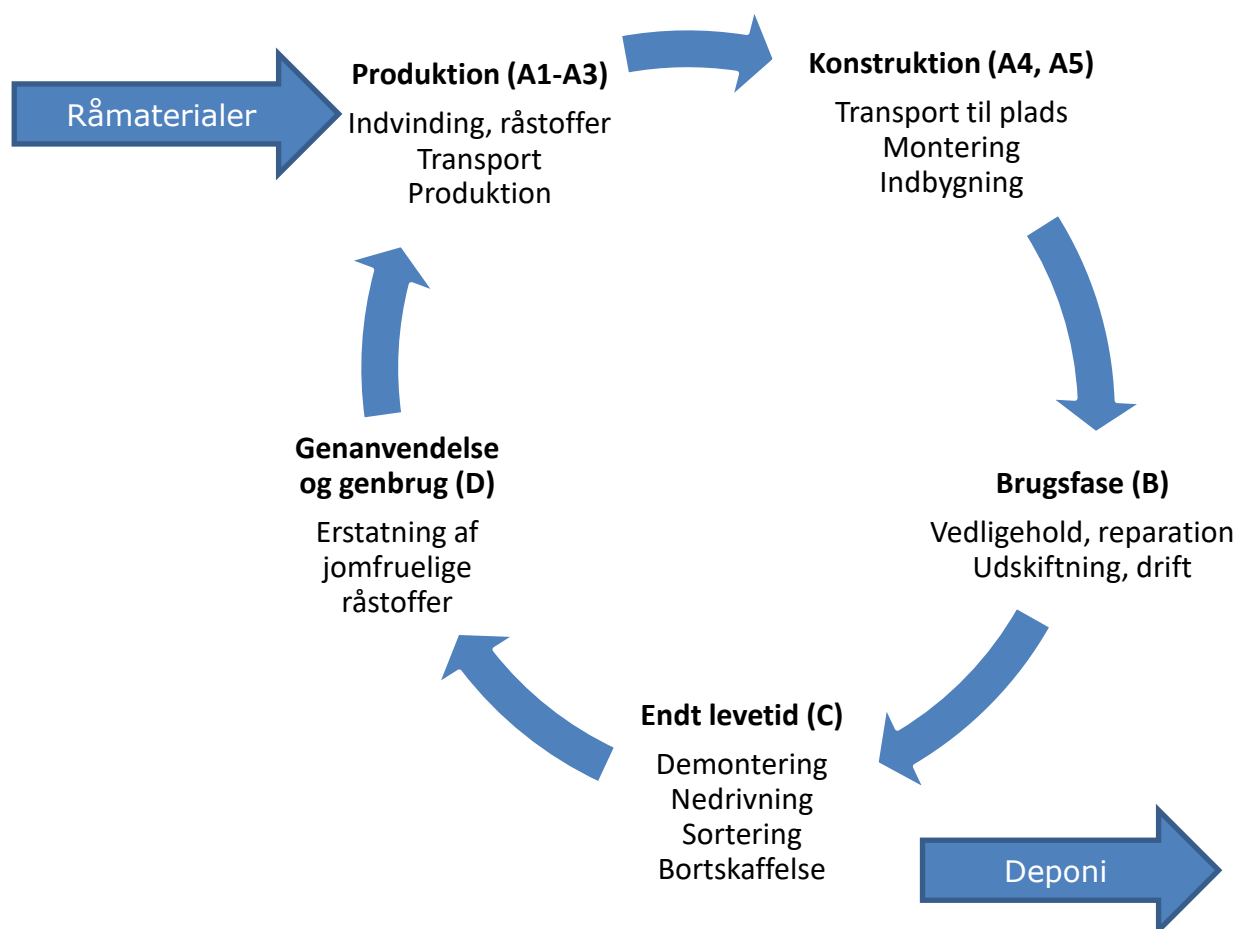
LCA er en beregningsmetode, der indeholder alle materialestrømme og energiinput, emissioner og miljøpåvirkninger for et givet produkt (deklareret enhed) i løbet af hele dets livscyklus fordelt på et antal foruddefinerede moduler, som er beskrevet nedenfor.

Typisk vil en LCA dække et sammensat produkt – fx en kvadratmeter byggeri – med mange forskellige input fra forskellige byggevarer og materialer. Se afsnit 21.1.4 for eksempler på LCA.

De forskellige elementer i LCA er beskrevet i standarden DS/EN 15804 for produkter til byggeri.

LCA-forløbet indeholder følgende faser (Figur 4):

- *Fase A1-A3:* Produktionsfasen inden byggevaren er indbygget, hvor alle de indgående delmaterialer og ressourcer opgøres, og hvor alle produktionsprocesser og transporter mellem materialeproducenter medtages. Disse faser betegnes ofte vugge til port.
- *Fase A4 og A5:* Transport af byggevarer til byggeplads samt byggepladsaktiviteter i forbindelse med indbygning af materialerne i byggeriet. Denne fase dækker fx over transport af betonelementer fra fabrik til byggeplads samt alle processer til indbygning af elementet i det færdige byggeri.
- *Fase B1-B5:* Brugsstadiet indeholdende alle miljøpåvirkninger fra anvendelse, vedligehold, udskiftning af komponenter mv. Normalt er der ikke noget bidrag fra beton i disse faser, da betonen ikke kræver vedligehold og reparation i den periode, som LCA omfatter. Det potentielle CO₂-optag fra betonoverflader, der karbonatiserer i brugsperioden, vil typisk være placeret under fase B1.
- *Fase B6 og B7:* Bidrag fra drift af byggeriet fra opvarmning og ventilation samt evt. vandforbrug. Betonprodukter har normalt ikke nogen bidrag til disse faser bortset fra den indirekte påvirkning, de kan have, qua den termiske inertie.
- *Fase C1-C4:* Endt levetid indeholdende processer for nedtagning, nedrivning, sortering, transport, affaldshåndtering, genanvendelse, bortskaffelse mv. For beton anvendes typisk nogle standardscenarier med nedrivning og nedknusning under disse faser.
- *Fase D:* Genbrug/genanvendelsespotentialer beskrives i denne fase. For beton og armeringsstål medfører dette oftest et negativt bidrag hidrørende fra at nedrivningsmaterialerne fra fase C erstatter en vis mængde jomfruelige råstoffer, og dermed opstår der en reduceret miljøpåvirkning.



Figur 4. Livscyklusfaser (eller moduler), som normalt anvendes i LCA. Bemærk at fase D ligger udenfor systemgrænsen for det produkt, som livscyklusanalysen omhandler.

Det er kun vugge-til-port faserne A1-A3, der er obligatoriske at medtage i henhold til DS/EN 15804. En livscyklusanalyse kan gennemføres på en velafgrænset deklareret enhed (fx en kubikmeter fabriksbeton af en given kvalitet) og dermed danne udgangspunkt for en EPD, eller den kan foretages på bygningsniveau og indeholde input fra en lang række EPD'er for de forskellige byggevarer (beton, isolering, stål, mursten, vinduer, etc.).

For betonprodukter ligger hovedparten af miljøpåvirkningen normalt i produktionsfasen, og typisk er det cementens bidrag, der er styrende. De øvrige faser indeholder ofte marginale bidrag for beton, men i takt med at den cirkulære økonomi vinder frem, og der etableres flere scenarier for genanvendelse og genbrug, kan dette forhold dog ændres.

CO₂-optag

Når beton udsættes for atmosfærisk luft, der typisk indeholder CO₂ i en koncentration på ca. 400 ppm, sker der en kemisk proces kaldet karbonatisering (se afsnit 19.2 i Betonhåndbogen for detaljer vedr. de kemiske processer og de holdbarhedsmæssige

konsekvenser ved karbonatisering). Karbonatiseringen starter i overfladen og fronten bevæger sig langsomt ind i betonen fra den eksponerede overflade.

CO₂-optaget afhænger af betonens eksponerede overfladeareal samt af fugtforholdene. Maling og tapet samt gulvbelægninger hæmmer karbonatiseringen ligesom processen næsten standser op ved høj luftfugtighed i betonens porer.

Under processen omdannes og bindes CO₂ kemisk i betonen, hvilket ofte betegnes CO₂-optag. Bidraget fra betonens CO₂-optag er beskrevet i DS/EN 16757, der også indeholder referencer til en række videnskabelige undersøgelser [8,9,10] og en anvisning i, hvordan bidraget kan medtages i livscyklusanalyser.

Betonens CO₂-optag svarer til processen i et træ, hvor CO₂ optages og bindes i vækstperioden og efterfølgende udledes igen, når materialet nedbrydes eller afbrændes.

Det vurderes, at CO₂-optaget kan udgøre op imod 5 til 20 % af betonens CO₂-aftryk under produktionen [11]. Følgende generelle formeludtryk kan anvendes til at vurdere størrelsen udtrykt i kg CO₂ pr. m² eksponeret overflade:

$$\text{CO}_2\text{-optag} = 1000 \cdot k \sqrt{t} \cdot U_{cc} D_c \cdot C$$

hvor k = karbonatiseringshastigheden [mm/ $\sqrt{\text{år}}$], t = tidsperioden i år, hvor karbonatiseringsprocessen foregår, $U_{cc} D_c$ = mængden af CO₂, der kan optages fra 1 kg cement [kg CO₂/kg], C = cementindholdet [kg/m³].

De danske branche-EPD'er, som er nærmere beskrevet nedenfor, indeholder et estimat for CO₂-optaget i brugsfasen B1 over en 100-års periode. Bidraget er negativt bidrag og medvirker til at reducere betonens samlede CO₂-aftryk igennem hele livscyklus. Normalt medtages dette bidrag ikke i livscyklusanalyser, men dette forventes dog at ændre sig fremover. Nyere undersøgelser [30] beskriver cement i den globale CO₂-cyklus som en svamp, der på den ene side står for en stor del af CO₂-udslippet i produktionsfasen, men som samtidig har en markant reducerende effekt igennem dets lange levetid, hvor karbonatiseringen langsomt foregår. CO₂-optaget nævnes også i Aalborg Portlands Roadmap [13], som et af midlerne til at opnå reduktionsmålene.

I afsnit 21.1.4 er der givet et eksempel, hvor CO₂-optaget er medregnet ud fra branche-EPD data, og hvor bidragets andel af det samlede CO₂-aftryk fremgår.

Cirkulær økonomi

Miljøstyrelsen definerer begrebet cirkulær økonomi, som en måde at sikre en bedre forvaltning af jordens ressourcer. Det handler om at holde materialer og produkter i det økonomiske kredsløb med højest mulig værdi så længe som muligt. Dette er i modsætning til den gammeldags brug og smid væk kultur, hvor materialer og ressourcer kun udnyttes i en periode, hvorefter de bortskaffes som affald. Enten kan man genanvende ressourcerne igen i nye produkter, eller man kan genbruge dem direkte igen (evt. efter

en vis opgradering). Den sidstnævnte mulighed giver selvsagt den største gevinst, men stiller også flere krav, som kan gøre den økonomisk uinteressant.

Indenfor cirkulær økonomi skelnes der ofte mellem følgende begreber:

- **Nyttiggørelse:** genanvendelse på et lavere værdiniveau end det oprindelige. Fx genanvendelse af nedknust beton som fyld i veje mv. (ubundne bærelag).
- **Genanvendelse:** genanvendelse efter en processering, hvilket ofte medfører et vist spild. Fx genanvendelse af nedknust beton som tilslag i ny beton.
- **Genbrug:** genbrug i næsten samme funktion som oprindeligt. Fx genbrug af gamle mursten, belægningssten, tagplader mv. For betonbyggeri er genbrug af hele betonkomponenter i den bærende konstruktion mest set, hvor tidligere industribygninger omdannes til nye funktioner (oftest boliger og kontor). Dette gælder for Nordkraft i Aalborg, cementsiloerne på Nordhavn i København og mange andre steder.

For metaller har den cirkulære økonomi været gældende i mange år, hvor skrot smeltes om til nye metalprodukter.

Miljøvaredeklarationer (EPD⁴)

For byggevarer i beton er reglerne for udarbejdelse af miljøvaredeklarationer eller EPD'er, som de kaldes i daglig tale, givet i DS/EN 16757. En EPD er en form for LCA for en veldefineret deklareret enhed, hvor livscyklusfaserne beskrevet tidligere kan benyttes. For mange byggeprodukter er EPD data udelukkende tilgængelige for faserne A1-A3 (vugge til port), da det er disse faser, som producenten normalt er herre over. Dette er ofte tilfældet for cement, armering mv., der skal indbygges sammen med andre materialer for at danne et færdigt produkt. I nogle tilfælde angives gennemsnitsdata for fase A4, transport fra producent til byggeplads svarende til den pågældende producents gennemsnitlige transportafstande til kunderne. Figur 5 indeholder de vigtigste elementer i en EPD, hvoraf det ses, at der er tale om et regnskab over de ressourcer, der indgår i produktionen på den ene side og på den anden side, de emissioner og affaldstyper, der dannes undervejs. For visse byggevarer, der produceres vha. højt varme- og energiforbrug, kan der foregå en eksport af termisk energi til det omgivende samfund sådan som det fx er tilfældet for cementfabrikken Aalborg Portland, der eksporterer overskudsvarme ind i Aalborgs fjernvarmeforsyning. En EPD opsummerer alle ressourcer, affaldsmængder og miljøpåvirkninger efter en fast skabelon, som er beskrevet nærmere i det følgende.

⁴ EPD = Environmental Product Declaration

Det kan umiddelbart være svært at sammenligne EPD'er uden samtidig at sikre sig, at de deklarerede enheder er direkte sammenlignelige, hvilket kan være svært at se ud fra EPD oplysningerne. Der er dog sket en udvikling over de seneste år således, at kendskabet til bæredygtighed, EPD'er og LCA er vokset blandt producenter og rådgivere.

Branchesammenslutningen Dansk Beton udgav i 2020 i alt 14 branche-EPD'er [3] gældende for forskellige betonprodukter, der er almindeligt forekommende i danske byggerier.

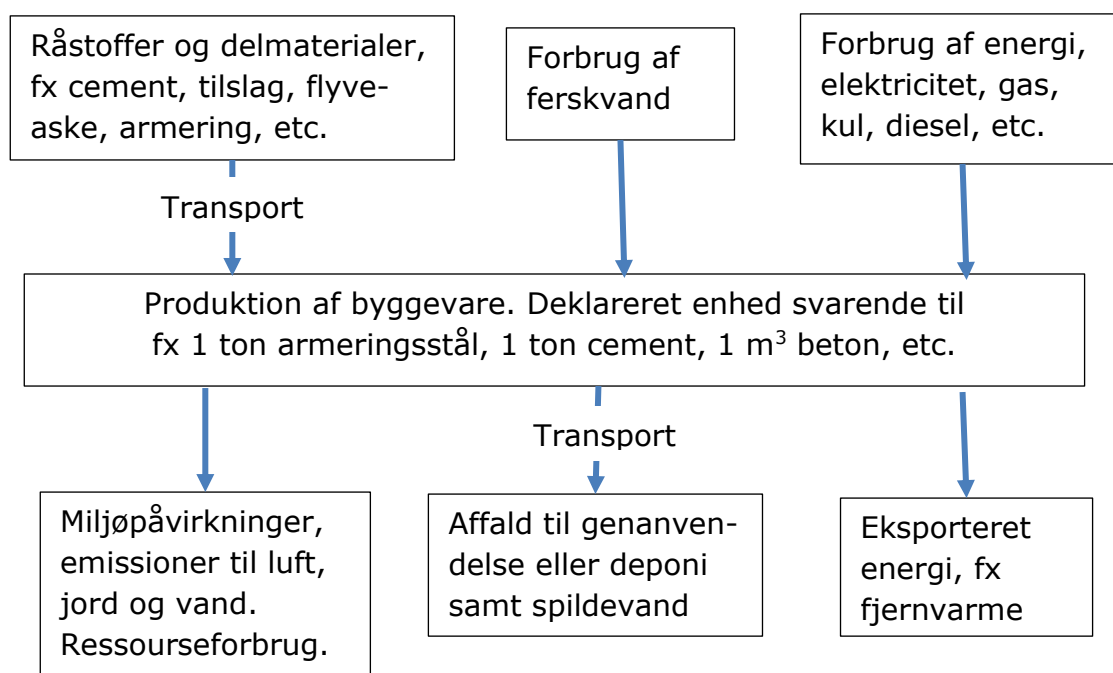
Dette har medført en større kritisk sans, når forskellige materialer sammenlignes på EPD niveau. Der findes både meget specifikke EPD'er, som dækker et helt bestemt produkt (fx en specifik cementtype produceret på en specifik fabrik) og gennemsnits branche-EPD'er, som dækker en gruppe af produkter (med identiske egenskaber) produceret indenfor den samme region eller land.

De danske branche-EPD'er fra Dansk Beton omfatter 14 produkttyper og indeholder i alt 39 forskellige varianter af disse produkttyper [3]. Det drejer sig om EPD'er for fabriksbeton i forskellige styrkeklasser, betonelementvægge og forspændte dæk samt betonrør, belægningssten og byggeblokke. Disse branche-EPD'er er tredjepartsverificerede og dækker en stor andel af den danske betonproduktion.

For at kunne udforme en branche-EPD er det nødvendigt, at datagrundlaget dækker hovedparten af produktionen af de pågældende produkter. De danske branche-EPD'er dækker således 80-90 % af produktionen af de forskellige produkter, og omkring 20 forskellige producenter har medvirket med data til udarbejdelsen af dem.

Når man har beregnet, hvor stort et energiforbrug der indgår i produktionen af et givet produkt, samt hvilke og hvor mange delmaterialer der indgår, kan man beregne miljøpåvirkningerne tilknyttet netop dette produkt. Dette foregår vha. anerkendte databaser, som indeholder miljøpåvirkninger for en lang række processer. De miljøpåvirkninger, som skal medtages i en EPD, er beskrevet generelt i DS/EN 15804 med uddybende detaljer beskrevet i DS/EN 16757 for betonprodukter. I det følgende beskrives de 7 miljøpåvirkninger, der normalt findes i en EPD, og som benyttes i livscyklusanalyser:

- **GWP:** Klimaændring (global opvarmning) [kg CO₂-ækvivalenter]
Denne miljøpåvirkning er den mest anvendte i forskellige sammenhænge og betegnes ofte CO₂-fodafttrykket, indlejret CO₂ mv. GWP opgør mængden af CO₂ (og andre drivhusgasser) og samler resultatet i et enkelt tal.
- **ODP:** Nedbrydning af ozonlaget i stratosfæren [kg CFC 11-ækvivalenter]
CFC-gasser, lattergas samt flere andre forbindelser medfører en nedbrydning af ozonlaget, hvilket betyder, at der absorberes mindre af den skadelige solstråling.



Figur 5. Principper for EPD vugge til port (fase A1 – A3).

- **AP:** Forsuring af jord og vand [kg SO₂-ækvivalenter]
Udledning af svovldioxid til atmosfæren øger syreindholdet i fx vand med forsurening af jord- og vandkilder til følge.
- **EP:** Eutrofiering (overgødskning) [kg (PO₄)³⁻-ækvivalenter]
Eutrofieringen kommer af en "overgødskning" med nitrater og fosfater fra landbrug, industri og husholdning og forårsager algevækst i søer, hvilket medfører iltsvind og fiskedød til følge.
- **POCP:** Dannelse af fotokemiske oxidanter [kg ethen-ækvivalenter]
Fotokemisk ozondannelse er en følge af brug af opløsningsmidler samt udledninger fra biler og kraftværker. Ozon forårsager gener og sygdomme i luftveje hos mennesker, men forvolder også skader på skov og landbrug.
- **ADPe:** Udttynding af abiotiske mineralske ressourcer (ikke-fossile) [kg Sb-ækv.]
Denne indikator har med forbruget af de ikke-fornyelige ressourcer såsom metaller, mineraler, sten, grus, jord etc. at gøre. Stibium er det latinske navn for grundstoffet Antimon med betegnelsen Sb. Det er forekomsten af Antimon som vurderingen af denne miljøparameter bliver holdt op i mod.
- **ADPf:** Udttynding af abiotiske fossile ressourcer [MJ]
De fossile brændstoffer og fossile brændsler er en energireserve, der har ligget i jorden gennem millioner af år. Denne indikator beskriver udtømmningen af disse ressourcer i form af deres brændværdi.

Figur 6 viser et eksempel på miljøpåvirkninger taget fra Dansk Betons branche-EPD for fabriksbeton i styrkeklasse C30/37, der ofte anvendes til konstruktioner udsat for uden-dørs fugtigt miljø. Tabellen viser de 7 indikatorer nævnt ovenfor fordelt på de forskellige LCA-faser. For de danske branche-EPD'er er der medtaget livscyklusfaser ud over vugge til port, som det fremgår af tabellen, se Figur 4 for en beskrivelse af faserne.

Det negative CO₂-bidrag fra fase B1 svarer til CO₂-optaget fra karbonatisering over en 100-årig periode, jf. ovenstående beskrivelse af CO₂-optag. For fase B2-B7 (brugs- og driftsfasen) er der angivet "MNR", der betyder "modul ikke relevant". Dette skyldes, at der normalt ikke er noget behov for udskiftninger og reparationer under normal brug.

Tilsvarende er der for fase A5 (byggepladsaktiviteter) angivet "MND", hvilket betyder "modul ikke deklareret". Dette skyldes, at energiforbrug på byggepladsen afhænger stærkt af byggeriets størrelse, årstiden og udførelsesmetoder generelt. Disse processer er normalt ikke kendt af betonproducenten på forhånd, og derfor deklarerer dette ikke.

Parameter	Enhed	Miljøpåvirkninger, C30/37									
		A1-A3	A4	A5	B1	B2-B7	C1	C2	C3	C4	D
Global opvarmning (GWP)	[kg CO ₂ ækv.]	2,88E+02*	4,34E+00	MND	-1,54E+01** -2,27E+00**	MNR	1,21E+01	6,55E+00	6,72E+00	4,97E+00	-4,60E+00
Nedbrydning af ozonlaget (ODP)	[kg CFC11 ækv.]	3,35E-06	7,16E-16	MND	0,00E+00	MNR	1,54E-15	1,08E-15	5,41E-16	6,45E-15	-5,56E-14
Forsuring af jord og vand (AP)	[kg SO ₂ ækv.]	4,43E-01	1,01E-02	MND	0,00E+00	MNR	4,31E-02	1,52E-02	2,34E-02	1,51E-02	-2,52E-02
Eutrofiering (EP)	[kg (PO ₄) ³⁻ ækv.]	1,41E-01	2,43E-03	MND	0,00E+00	MNR	1,03E-02	3,67E-03	5,67E-03	2,90E-03	-4,70E-03
Troposfærisk ozondannelse (POCP)	[kg Ethen ækv.]	1,64E-02	-3,37E-03	MND	0,00E+00	MNR	4,19E-03	-5,09E-03	2,19E-03	-2,63E-03	-2,29E-03
Udtynding af abiotiske ikke-fossile ressourcer (ADPe)	[kg Sb ækv.]	6,90E-05	3,08E-07	MND	0,00E+00	MNR	6,64E-07	4,65E-07	2,33E-07	3,81E-07	-8,26E-07
Udtynding af abiotiske fossile ressourcer (ADPf)	[MJ]	1,42E+03	5,88E+01	MND	0,00E+00	MNR	1,27E+02	8,86E+01	4,44E+01	6,77E+01	-5,87E+01

Figur 6. Miljøpåvirkninger. Eksempel taget fra branche-EPD for beton C30/37 [3]. Deklareret enhed på 1 m³ leveret beton.

Tabel 1: Forkortelser anvendt til beskrivelse af energiresourcer i EPD. Se Figur 6 for eksempel.

Energiform	Primær energi		Sekundært brændsel
	energiforbrug	Råmaterialeforbrug	
Vedvarende	PERE	PERM	RSF
Ikke-vedvarende	PENRE	PENRM	NRSF

Parameter	Enhed	Ressourceforbrug, C30/37									
		A1-A3	A4	A5	B1	B2-B7	C1	C2	C3	C4	D
Forbrug af vedvarende primær energi (PERE)	[MJ]	1,90E+02	3,42E+00	MND	0,00E+00	MNR	7,37E+00	5,16E+00	2,59E+00	4,96E+00	-1,68E+01
Forbrug af vedvarende primære energiresourcer anvendt som råmaterialer (PERM)	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	MND	0,00E+00	MNR	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Samlet forbrug af vedvarende primære energiresourcer (PERT)	[MJ]	1,90E+02	3,42E+00	MND	0,00E+00	MNR	7,37E+00	5,16E+00	2,59E+00	4,96E+00	-1,68E+01
Forbrug af ikke-vedvarende primær energi (PENRE)	[MJ]	1,43E+03	5,90E+01	MND	0,00E+00	MNR	1,27E+02	8,89E+01	4,46E+01	6,84E+01	-7,19E+01
Forbrug af ikke-vedvarende primære energiresourcer anvendt som råmaterialer (PENRM)	[MJ]	1,65E+01	0,00E+00	MND	0,00E+00	MNR	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Samlet forbrug af ikke-vedvarende primære energiresourcer (PENRT)	[MJ]	1,45E+03	5,90E+01	MND	0,00E+00	MNR	1,27E+02	8,89E+01	4,46E+01	6,84E+01	-7,19E+01
Forbrug af sekundært materiale (SM)	[kg]	6,71E+01	0,00E+00	MND	0,00E+00	MNR	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Forbrug af vedvarende sekundært brændsel (RSF)	[MJ]	1,53E+02	0,00E+00	MND	0,00E+00	MNR	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Forbrug af ikke-vedvarende sekundært brændsel (NRSF)	[MJ]	2,80E+02	0,00E+00	MND	0,00E+00	MNR	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Nettoforbrug af ferskvand (FW)	[m³]	8,89E+01	5,78E-03	MND	0,00E+00	MNR	1,25E-02	8,72E-03	4,37E-03	8,93E-03	-2,19E-02

Figur 7. Ressourceforbrug. Eksempel taget fra branche-EPD for beton C30/37 [3]. Deklareret enhed på 1 m³ leveret beton.

På tilsvarende måde indeholder EPD'en tal for ressourceforbruget i form af energi (fordelt på vedvarende og ikke-vedvarende energiformer) samt for energiresourcer anvendt som råmaterialer. Der er også opgjort nettoforbrug af ferskvand til produktionen, se Figur 7 for eksempel på opgørelse af ressourcer. Tabel 1 beskriver energiforkortelserne, som anvendes i Figur 7, fordelt på de forskellige varianter af energiresourcer.

Figur 8 indeholder tilsvarende eksempel på opgørelse af affaldsstrømme opdelt på affaldstyper og fordelt over de forskellige faser igennem livscyklus.

De nævnte EPD-data indeholder alle processer og delmaterialer, som indgår i produktionen inkl. indvinding af råstoffer, oparbejdning og transport af delmaterialer mv. For beton betyder dette for eksempel, at alle miljøpåvirkninger og CO₂-udslip forbundet med produktionen af cement og tilslag er indeholdt.

Parameter	Enhed	Affaldskategorier og output flows, C30/37									
		A1-A3	A4	A5	B1	B2-B7	C1	C2	C3	C4	D
Bortskaffet farligt affald (HWD)	[kg]	4,92E-03	3,29E-06	MND	0,00E+00	MNR	7,09E-06	4,97E-06	2,49E-06	3,26E-06	-1,50E-06
Bortskaffet ikke-farligt affald (NHWD)	[kg]	3,98E+01	4,79E-03	MND	0,00E+00	MNR	1,03E-02	7,23E-03	3,62E-03	6,71E+01	-9,03E+01
Bortskaffet radioaktivt affald (RWD)	[kg]	3,28E-03	0,00E+00	MND	0,00E+00	MNR	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Komponenter til genanvendelse (CRU)	[kg]	0,00E+00	0,00E+00	MND	0,00E+00	MNR	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Materialer til genbrug (MFR)	[kg]	3,13E-01	0,00E+00	MND	0,00E+00	MNR	0,00E+00	0,00E+00	2,17E+03	0,00E+00	0,00E+00
Materialer til energiidnyttelse (MER)	[kg]	1,44E-01	0,00E+00	MND	0,00E+00	MNR	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Eksporteret elektrisk energi (EEE)	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	MND	0,00E+00	MNR	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Eksporteret termisk energi (EET)	[MJ]	0,00E+00	0,00E+00	MND	0,00E+00	MNR	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Figur 8. Affaldsopgørelse. Eksempel taget fra branche-EPD for beton C30/37 [3]. Deklareret enhed på 1 m³ leveret beton.

21.1.1.2 Milepæle for beton og bæredygtighed i Danmark

Som nævnt tidligere har den danske betonbranche igennem mange år arbejdet på at reducere betons miljøpåvirkning på mange fronter. Nogen af de væsentligste projektsamarbejder er opsummeret nedenfor:

- 1990'erne: Deltagelse i danske F&U projekter i Miljøstyrelsens regi omkring miljørigtig projektering. Der var fokus på energiforbrug, ressourcer og drivhusgasser, og der blev bl.a. opstillet eksempler på forskellige betonkonstruktioners miljøpåvirkninger. Dette var en slags forløber til de LCA-værktøjer, der findes i dag.
- 1997-2000: TESCOP EU-projekt (www.gronbeton.dk)
Europæisk samarbejde omkring udvikling af renere teknologier til betonfremstilling. Der var dansk deltagelse fra Teknologisk Institut og danske betonelementproducenter. Et af de vigtige resultater fra dette projekt var genanvendelse af procesvand i produktion af ny beton.
- 1998-2002: Grøn Beton (www.gronbeton.dk) [1,4]
Dansk F&U projekt som arbejdede på flere fronter hen imod betonrecepter med reduceret miljøaftryk. Dette foregik primært vha. bindersammensætninger med højt flyveaskeindhold samt ved (gen)anvendelse af restprodukter fra andre industrielle processer. Herunder genanvendelse af aske fra spildevandsslam. Resultaterne blev dokumenteret på baggrund af laboratorieforsøg på såvel materiale- som på konstruktionsniveau samt igennem opførelsen af Demobroen ved Tørring (Figur 1). Der blev også gennemført livscyklusundersøgelser for at sammenligne forskellige løsninger for Demobroen [5].
- 2002-2006: Produktområdeprojekt vedr. betonprodukter, Miljøstyrelsen (links til MST-rapporter kan findes på www.gronbeton.dk). Dette projekt omfattede

meget forskellige emner, som betonindustrien selv havde været med til at formulere og som blev løst i direkte samarbejde mellem industrien og TI [6,7]:

- Forurening fra kulbrinter i betonslam fra betonproduktion, stammende fra især mineralske formolier og slipmidler. Et resultat fra denne undersøgelse var en anbefaling om at skifte fra mineralsk til vegetabilsk formolie.
 - Udtørring af beton på byggepladsen giver ofte problemer specielt i den kolde årstid og for gulvkonstruktioner, der skal beklædes med fugtfølsomme materialer. Et af de løsningsforslag, der blev foreslået i projektet, var anvendelse af selvudtørrende beton, og der blev sidenhen udgivet en informationsbrochure om dette emne af Fabriksbetonforeningen under Dansk Beton.
 - Genanvendelse af nedknust beton i produktion af ny beton. Der blev gennemført laboratorieforsøg sammen med betonproducenter til dokumentation af kvaliteten af genbrugsbeton og det blev tilladt i den daværende betonnorm DS 411, at genanvende nedknust beton.
 - Betons påvirkning af miljøet i form af afgasning af skadelige stoffer til indeluften under brugsfasen og risiko for eventuelle skadelige tungmetallers udvaskning efter endt levetid med nedknusning til genanvendelse i vejfyld. Der blev foretaget laboratorieforsøg, som dokumenterede at disse risici var ikke-eksisterende.
 - Viden om betons effekt på det termiske indeklima. Der blev foretaget beregninger på betons såkaldte termiske inert, som har en gunstig indflydelse på energiberegninger på bygninger, da det er med til at udjævne temperaturudsving og reducere behovet for køling især i de varme perioder.
 - Betons evne til at optage NO_x igennem en fotokatalytisk effekt, når der tilsættes titandioxid til betonen. Der blev gennemført laboratorieforsøg, men resultaterne var ikke entydige.
- 2003-2006: ECO-SERVE EU-projekt (www.gronbeton.dk)
Dette projekt havde en lang række forskellige europæiske forsknings- og industrideltagere, som arbejdede videre i sporet fra Grøn Beton projektet med reduktioner af miljøpåvirkninger fra beton igennem øget anvendelse af cement med forskellige tilsætninger (flyveaske, slagge, kalkfiller mv.). Der var også en arbejdsplan omkring tilslagsmaterialer og beton til vejbelægninger, som havde dansk deltagelse. Desuden blev der arbejdet med forskellige miljøindikatorer, som sidenhen er blevet indarbejdet i standarderne for LCA.
 - 2003-2005: CO₂-optagelse gennem betons livscyklus, Nordisk F&U projekt
Beton, der er i kontakt med atmosfæren, karbonatiserer og opsuger CO₂. Normalt er denne proces skadelig for betonen, da den efter nogen tid medfører, at betonens korrosionsbeskyttende effekt forsvinder (se forrige afsnit om CO₂-optag). Men set ud fra et LCA-perspektiv er der tale om en naturlig proces, der er med til at minimere CO₂-aftrykket fra beton, og som især bliver markant, når nedknusning af beton efter endt levetid medtages i overvejelserne. Projektet

opstiller teorien bag disse overvejelser og beskriver arbejdet igennem forskellige baggrundsrapporter [8,9,10].

Resultaterne fra dette projekt er efterfølgende blevet skrevet ind i grundlaget for beton EPD'er i DS/EN 16757 således, at man kan medtage CO₂-optagelse i brugsfasen på en ensartet og transparent måde.

- 2005-2007: Bioaske i beton, EU-støttet projekt
Sammen med et spildevandsfirma og en betonproducent deltog Teknologisk Institut i dette projekt, som dokumenterede muligheder for at anvende bioaske fra forbrænding af spildevandsslam til produktion af ny beton. Der blev undersøgt miljøeffekter i form af risiko for udvaskning af farlige stoffer samt effekten på betonens egenskaber mv. Projektet medførte, at bioaske tillades anvendt som fillertilsætning i beton til visse anvendelser i henhold til den danske betonstandard.
- 2008-2011: Futurecem, dansk innovationskonsortium
Udvikling af cementteknologi baseret på calcineret ler og synergieffekter med kalkfiller. Projektet resulterede i en patentansøgning på teknologien.
- 2010-2013: Stålfiberkonsortiet, dansk innovationskonsortium
Projektet arbejdede med at fremstille bæredygtige konstruktioner ved anvendelse af stålfibre som alternativ til konventionel armering. Der var deltagelse fra rådgivere, bygherrer, entreprenører og materialeleverandører. Hovedresultatet blev vejledninger i design og udførelse af betonkonstruktioner i fiberarmet beton.
- 2011-2014: SCM-projektet, dansk innovationskonsortium
Udvikling af produktionsudstyr til fremstilling af grønne cementer med kalkfiller og calcineret ler.
- 2018-2019: Nulspildsprojektet, dansk brancheprojekt med Dansk Beton
I samarbejde med danske betonproducenter er der udført laboratorieforsøg hos Teknologisk Institut og på de enkelte fabrikker, med det formål at dokumentere kvaliteten af beton med genanvendt tilslag. Der har været fokus på genanvendt procestilslag, som fremkommer fra eget spild (returbeton, fejlproduktion, afskæringer af elementer, etc.), og som kan genanvendes direkte i produktionen af ny beton efter nedknusning. Resultaterne fra disse projekter er opsummeret i en teknisk resultatrapport og en håndbog for producenter. Disse publikationer ligger på Dansk Betons hjemmeside.
- 2014-2019: Grøn omstilling af cement- og betonproduktion, dansk innovationskonsortium (www.gronbeton.dk) der gik under navnet Grøn Beton II
Dette projekt fortsatte den udvikling, som var startet 15 år tidligere i Grøn Beton. Den grønne omstilling i energisektoren havde dog medført knaphed på fx

flyveaske, som betød at cement- og betonindustrien skulle tænke i nye baner. Projektet demonstrerede muligheder med de nye LCC⁵ cementtyper, der anvender kalksten og kalcineret ler blandet med cementklinker. En stor del af projektet omhandlede dokumentation af de nye materials holdbarhedsegenskaber – bl.a. igennem felteksponeringspladser og indbygning i demo-projekter.

- 2020-2024: Calliste, dansk innovationskonsortium
Dette projekt er en naturlig forlængelse af det forrige innovationskonsortium, der skal videreudvikle de nye LCC cementtyper til det danske marked i samarbejde med betonproducenterne. Herunder yderligere undersøgelser af holdbarheden og effekten af forskellige delmaterialer.

Ud over disse F&U projekter, som oftest er foregået i samarbejde mellem Teknologisk Institut, universiteter, betonindustrien og bygherrer, har der været en del målrettede undersøgelser, hvor Teknologisk Institut har hjulpet kraftværker og materialeproducenter med at dokumentere deres materialer til brug i beton. Dette har fx været tilfældet for følgende grønne delmaterialer, som kan bruges til betonproduktion:

- Samfyringsaske fra kombineret afbrænding af kul og halm på kraftværkerne.
- Biokulflyveaske som er et askeprodukt fra kraftværkerne i Danmark, fordi disse er overgået til biomassebrændsel. Biokulflyveaske opstår efter samtidig forbrænding af fint formalet biomasse og enten kul eller kulflyveaske. Biokulflyveaske er tilladt på lige fod med konventionel flyveaske, så længe visse materialekrav, beskrevet i den danske betonstandard, er opfyldt.
- Fint-formalet kalkfiller tilsat direkte i blanderen hos betonproducenten i mængder op til en femtedel af pulver kan medregnes i v/c-forholdet, såfremt materialekrav, beskrevet i den danske betonstandard, er opfyldt.
- FutureCem cement med kalcineret ler og kalkfiller⁶ tillades anvendt fra 2020.

Ovennævnte undersøgelser har primært omfattet laboratorieundersøgelser på forskellige betonegenskaber, herunder styrke og stivhed samt produktionsegenskaberne og de holdbarhedsmæssige egenskaber. Betonstandard indeholder begrænsninger i anvendelsesområder for de forskellige tilsætninger afhængig af eksponeringsforhold og miljøpåvirkning. Disse begrænsninger er bl.a. indført på baggrund af ovennævnte undersøgelser.

21.1.1.3 Baseline

Som nævnt tidligere blev Bæredygtig Beton initiativet lanceret i 2019, hvor alle interessenter kunne deltage med mulighed for at påvirke retningen for bæredygtighed in-

⁵ LCC = Limestone-Calced-Clay. Denne cementtype er bl.a. udviklet og markedsført af Aalborg Portland under navnet FutureCem

⁶ I henhold til cementstandard EN 197-1 betegnes disse cementtyper Portlandkompositcement CEM II/A-M(Q,L), CEM II/B-M(Q,L), CEM II/A-M(Q,LL) og CEM II/B-M(Q,LL)

denfor betonindustrien og byggeriet. Initiativet var tænkt som en løftestang for branchens CO₂-reduktionsmål samt en måde at give ejerskab til bæredygtighedsprocessen i alle led af værdikæden.

Den danske Roadmap [2] indeholder 35 initiativer, som kan medvirke til at opnå den ønskede halvering i CO₂-udledninger frem mod 2030. Initiativerne er opdelt på følgende temaer:

- Design, planlægning og samarbejde
Optimering på konstruktionsniveau, udnyttelse af nyeste beregningsmetoder, skræddersyet design fremfor "one-size-fits-all".
- Krav til betonkonstruktioner
Arbejde hen imod større fleksibilitet i forhold til standarder og normkrav. Fx specifikation af styrkeklasse ud fra 56 døgn i stedet for 28 døgn. Indførelse af CO₂-klasser i stil med det, der er indført i Norge [14]. Der arbejdes med funktionsbaserede krav til armeringsdæklag og indførelse af stålfiberarmering i den kommende revision af Eurocode 2, hvilket er med til at gøre det nemmere at opnå bæredygtige betonløsninger.
- Produktion og udførelse
Initiativerne under dette tema arbejder med reduceret CO₂-udslip i produktionsleddet via introduktion af nye cementtyper med lavere aftryk, optimering af betonrecepter mht. nye tilsætninger og reduceret pastaindhold samt optimering af processer på byggepladsen. Dette emne er beskrevet nærmere i afsnit 21.1.2.
- Cirkulær økonomi
Initiativerne fokuserer på nulpild hos producenten og på byggeplads, genbrug af hele komponenter snarere end nedbrydning og nedknusning samt genanvendelse af nedknust beton som tilslag i ny beton. Dette emne er beskrevet i afsnit 21.1.3.
- Procesoptimering
Dette tema handler om grøn omstilling af processerne hos betonproducenterne. Fx overgang fra dieseldrevne maskiner til elektriske, bedre uddannelsesniveau hos driftsfolk og chauffører mv.

For hvert tema er der stipuleret potentielle besparelser i forhold til den baseline, der er beskrevet nedenfor.

For sammenligningens skyld skal det nævnes, at der udkom der en tilsvarende Roadmap fra den svenske betonindustri [12] i 2018, hvori der var præsenteret en meget ambitiøs målsætning. Sverige havde fremsat generelle nationale mål allerede i 2017 om at være CO₂-neutral i 2045 på samfundsniveau. Derfor havde betonindustrien i Sverige opstillet sin målsætning, som sagde, at i 2023 skal beton (til byggeri) have et CO₂-

udslip på 50 % af niveauet i 1990. I 2030 skal der være klimaneutrale betoner på markedet, og i 2045 skal alt beton i Sverige være CO₂ neutralt.

Et vigtigt omdrejningspunkt i den svenske plan er, at cementindustrien indfører CCS⁷ i stor industriskala, da dette vil medvirke til opfyldelse af hovedparten af målet. Et andet vigtigt værktøj, til at opnå de svenske mål, er at medtage betonens livscyklus, herunder en indregning af karbonatiseringsprocessens CO₂-optag igennem betonens brugsfase. Den danske cementproducent Aalborg Portland har i sin Roadmap [13] også peget på CSS og CO₂-fangst som et væsentligt element i kampen for en CO₂-neutral cementindustri.

2019 Baseline for byggeri og anlæg

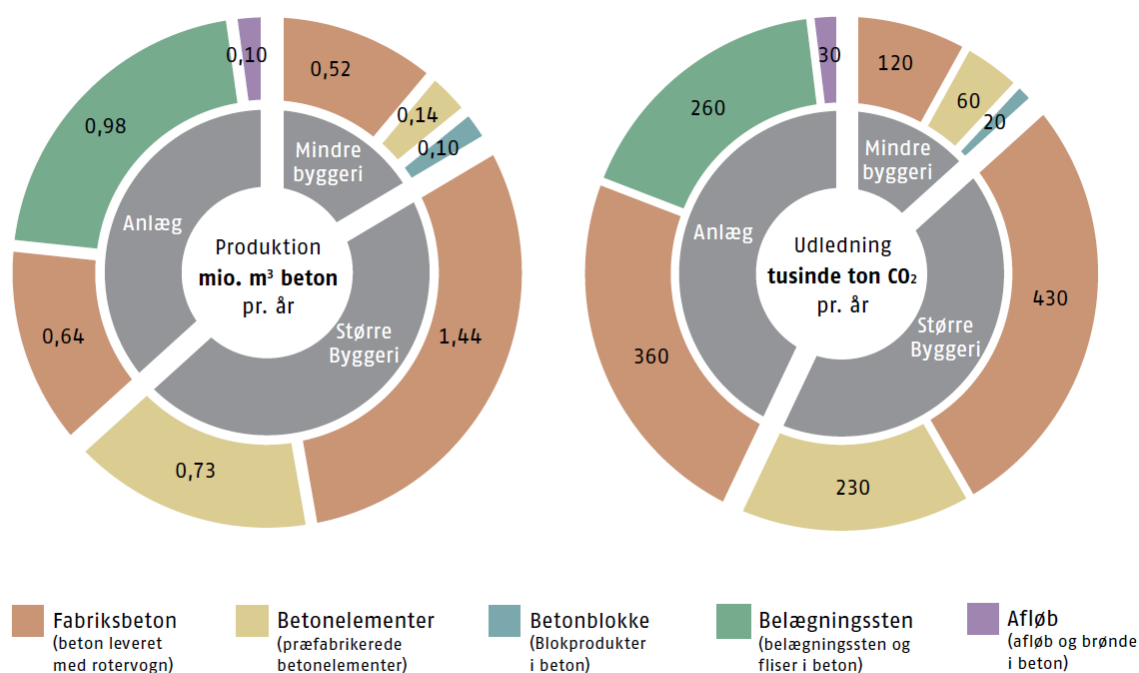
For at være i stand til at kvantificere reduktionsmålene, er der opstillet en baseline for den danske betonproduktion, som indgår i Bæredygtig Beton initiativet (Figur 9). Der blev produceret ca. 4,65 mio. m³ beton i 2019, fordelt på fabriksbeton, betonelementer og betonvarer (blokke, belægninger og rør/afløb). Dette svarer til ca. 10 mio. tons, hvoraf fabriksbeton og betonelementer udgør langt hovedparten svarende til ca. 8 mio. tons. Opgørelsen i Figur 9 indeholder ikke porebetonblokke (gasbeton). For betonelementer er der medregnet armering i baseline tallene. Armeringen udgør ca. 100 kg/m³ som et gennemsnit for betonelementer til byggeriet.

Til højre i Figur 9 fremgår det, at CO₂-udslippet fra produktion af beton (fase A1-A3) er estimeret til at svare til ca. 1,5 mio. tons CO₂-eq i alt. Hvis man kigger specifikt på CO₂-tallene for fabriksbeton og betonelementer (inkl. armering), opnår man hhv. 0,15 og 0,14 kg CO₂-eq pr. kg beton. For belægningsprodukter er det tilsvarende emissionstal opgjort til 0,11 kg CO₂-eq/kg. Tabel 2 indeholder tallene fordelt på de forskellige betontyper.

I den svenske Roadmap [12] er der tilsvarende opgjort CO₂-udledninger fra den svenske fabriksbetonbranche, der producerede ca. 6,2 mio. m³ beton i 2017 til byggeri og anlæg. Udledningen herfra blev estimeret til 1,75 mio. tons CO₂-eq på baggrund af svenske branche-EPD'er, hvilket kan omregnes til gennemsnitligt 282 kg CO₂-eq pr. m³, eller et emissionstal på ca. 0,12 kg CO₂-eq pr. kg beton.

Ovenstående opgørelse af CO₂-udledninger er baseret på de gennemsnitstal, som er en del af grundlaget for de danske branche-EPD'er [3]. Som det fremgår, er beton til anlægskonstruktioner (fx broer og tunneler) generelt præget af et relativt højt CO₂-aftryk. I det følgende gennemgås de specielle tiltag, der er igangsat på anlægsområdet (broer og tunneler), hvor beton er et af de vigtigste byggematerialer.

⁷ CCS = Carbon Capture and Storage. Indfangning af CO₂ fra kilden og lagring af dette inden det når ud i atmosfæren.



Figur 9. Baseline for CO₂-udslippet fra betonproduktionen i Danmark i 2019 [2].

Tabel 2: Opsummering af de danske baseline data [2].

Baseret på 2019 produktionstal	Produktion i mio. m ³ (mio. tons)	CO ₂ -udslip i mio. tons CO ₂ -eq	Emissionstal i kg CO ₂ -eq/kg
Fabriksbeton, byggeri	1,96 (4,6)	0,55	0,12
Fabriksbeton, anlæg	0,64 (1,5)	0,36	0,24
Betonelementer, i alt inkl. armering	0,87 (2,1)	0,29	0,14
Belægninger	0,98 (2,3)	0,26	0,11
Blokke og afløb	0,20 (-)	0,05	-
I alt	4,65	1,51	-

Vejdirektoratets 1990-baseline

Vejdirektoratet og Banedanmark er ansvarlige for langt størsteparten af den beton, som anvendes til anlægskonstruktioner i Danmark. Det er forventningen, at anlægskonstruktionerne skal forholde sig til de nationale reduktionsmål på 70 % fra 1990-niveau til 2030 på lige fod med resten af samfundet. Derfor har man i regi af Vejregelgruppe Bygværker udformet en 1990-baseline, som man kan måles op imod, når miljøaftrykket fra anlægsprojekter diskuteres og sammenlignes.

Der skrives ind i projekteringsgrundlaget for broer, at CO₂-belastningen skal beregnes og sammenlignes med CO₂-krav i udbudsmaterialet. Der er udviklet et særskilt LCA værktøj til anlægsprojekter, som skal bruges til dokumentation af et bygværks eller en

vejstræknings miljøaftryk⁸, inkl. jordarbejder, asfalt mv. I det følgende fokuseres der udelukkende på konstruktionsmaterialerne beton, slap og spændt armering til anlægsbygværker.

I Vejdirektoratets baseline opereres der med forskellige typer af deklareret enhed for en bro- eller en tunnelkonstruktion:

- Konstruktionsniveau: 1 m² trafikareal (brodæksareal mellem de to kantbjælke-indersider) eller alternativt for en banebro, 1 m jernbanespor
- Konstruktionsmateriale-niveau: 1 m³ armeret beton
- Delmateriale-niveau: 1 m³ beton samt 1 ton slap/spændt armering

Det forventes, at projekteringsgrundlaget for broer kommer til at indeholde et krav om, at et bygværks CO₂-aftryk skal beregnes og overholde en defineret target-værdi. For almindelige, mindre broer kan benyttes en deklareret enhed på 1 m² brodæk til at beskrive og sammenligne CO₂-aftryk. For specielle bygværker (tunneler og større broer) anvendes 1 m³ armeret beton som baseline. De tre metoder til reduktion af CO₂, der blev nævnt i afsnit 21.1.1, vil alle påvirke CO₂-aftrykket pr. m² brodæk, mens optimering på materialeniveau kun vil påvirke CO₂-aftrykket pr. m³ armeret beton. Tabel 3 indeholder 1990 baseline data, som fremtidige bygværker skal måles op imod. Tallene er gennemsnitstal baseret på et antal broer opført i perioden 1989-1991 hen over motorvej. CO₂-udledning fra 1 m³ brobeton er baseret på et antal forskellige betonrecepter, og der er observeret en variationskoefficient på 8 %.

Nutidige brobetoner har gennemsnitligt CO₂-aftryk på ca. 430 kg CO₂/m³ i henhold til gældende branche-EPD'er for beton C35/45 og C40/50 og Lavalkali Sulfatbestandig cement. Hvis det antages, at der er en armeringsintensitet på 150 kg/m³, svarer dette til et CO₂-udslip for armeret beton på ca.

$$430 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3 + (150 \text{ kg}/\text{m}^3) \cdot (0,8 \text{ kgCO}_2/\text{kg}) = 550 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$$

Hvilket modsvarer en generel reduktion i CO₂-udledningen på ca. 30 % fra 1990 til 2019.

⁸ InfraLCA, www.vejdirektoratet.dk/infralca

Tabel 3: Baseline data for 1990 for Vejdirektoratet og Banedanmarks bygværker. Udarbejdet af Emcon A/S i samarbejde med Teknologisk Institut.

Materiale	Enhed	GWP Emissionstal	Bemærkning
Cement	kg CO ₂ /tons	1.500	Aalborg Portland Lavalkali Sulfatbestandig cement
Tilslag	kg CO ₂ /tons	4,5	Knust granit fra Norge og Sverige
Slap armering	kg CO ₂ /tons	1.500	Stålfremstilling i højovn
Spændt armering	kg CO ₂ /tons	2.000	Stålfremstilling i højovn og efterfølgende hærkning
Beton*, uarmeret (gennemsnit)	kg CO ₂ /m ³	563	Baseret på forskellige betonrecepter for brobetoner
Armeret beton til bro	kg CO ₂ /m ²	800	Forudsat en armeringsintensitet på ca. 150 kg/m ³

Note: * Beregnet for livscyklusfaserne A1-A4 (vugge til byggeplads).

21.1.2 Beton og armerings miljøpåvirkning

I det følgende beskrives miljøpåvirkninger af forskellige betonprodukter baseret på de danske branche-EPD'er [3]. Der tages udgangspunkt i CO₂-aftrykket i materialernes produktionsfase (fase A1-A3) samt transport til indbygningsstedet (fase A4). Afsnittet giver et overblik af den variation, som kan forventes i betons CO₂-aftryk, når man sammenligner miljøpåvirkningen fra forskellige betontyper og -løsninger, samt hvilke bidrag, der er de væsentligste at medtage. I afsnit 21.1.2.4 er der angivet eksempler på CO₂-aftryk for beton, svarende til nedrivning og genanvendelse efter endt levetid.

Tabel 4: Emissionstal for Aalborg Portlands cementprodukter – vugge til port.

Cementtype	EPD nr. og EPD-operatør	CO ₂ -aftryk, A1-A3 kg CO ₂ e/ton
Rapidcement CEM I 52,5 N	NEPD-1426-468-EN EPD Norge	860
Basiscement CEM II/A-LL 52,5 R	NEPD-1419-466-EN EPD Norge	745
FutureCem CEM II/B-M (Q,LL) 52,5 N	S-P-01954 EPD International AB	599
Lavalkali Sulfatbestandig cement CEM I 42,5 N-SR5	NEPD-1418-467-EN EPD Norge	925
Aalborg White CEM I 52,5 R-SR5	S-P-01276 EPD International AB	1100

Tabel 4 indeholder emissionstal for Aalborg Portlands cementtyper pr. januar 2021, der er anvendt i det følgende.

21.1.2.1 Fabriksbeton

Fabriksbeton til brug i byggeriet produceres efter den euroæiske betonstandard med tilhørende danske regler for implementering. Branche EPD'er for fabriksbeton [3] angiver gennemsnittet for danske betoner fordelt på de fire miljøpåvirkninger (P, M, A og E) i henhold til denne standard. For hver miljøpåvirkning er der givet data for to til tre forskellige betontyper svarende til danske produktionsmængder og betonsammensætninger pr. 2018. Alle fabriksbetoner indeholdt i branche-EPD'erne er vist i Figur 10 med de blå symboler som funktion af styrkeklassen i intervallet fra C20/25 til C45/55.

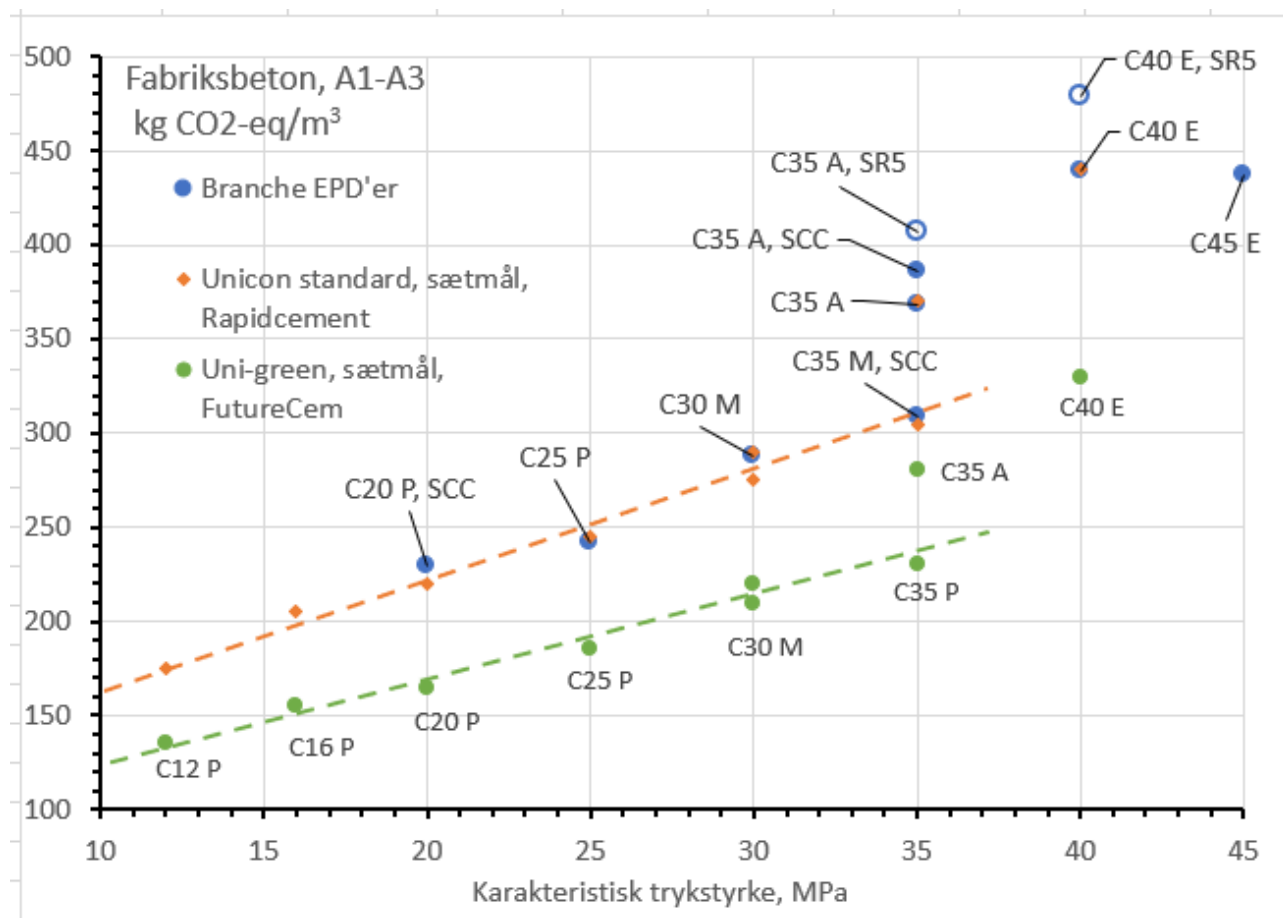
Miljøpåvirkning P har krav til mindste styrkeklasse C12/15.
Miljøpåvirkning M indeholder krav til min. C30/37 og max. $v/c = 0,55$.
Miljøpåvirkning A indeholder krav til min. C35/45 og max. $v/c = 0,45$.
Miljøpåvirkning E indeholder krav til min. C40/50 og max. $v/c = 0,40$.

For betontyperne til og med styrkeklasse C35/45 er der en nogenlunde retlinet sammenhæng, som er angivet med den orange stiplede streg, der repræsenterer en stigning i CO_2 -aftryk på ca. 30 kg CO_2 for hver 5 MPa stigning i trykstyrken.

Når der produceres beton til de to mest krævende miljøpåvirkninger A og E, sker der et spring i CO_2 -aftrykket, hvilket hovedsageligt skyldes, at kravet til v/c forholdet bestemmer cementindholdet snarere end styrkekravet. Eftersom det er cementen, som bidrager altovervejende til betonens CO_2 -aftryk (op imod 90 %) betyder dette, at den retlinede sammenhæng for de lave styrkeklasser i Figur 10 ikke længere er gældende.

En anden grund til det markante skift i CO_2 -aftryk i de to højeste miljøpåvirkningsklasser A og E er, at tilslaget oftest består af knust granit fra Norge og Sverige, fremfor lokale materialer fra grusgrav, hvilket også er med til at øge CO_2 -aftrykket i netop A og E. Brobetoner i styrkeklasse C35/45 og C40/50 (åbne symboler i Figur 10) anvender typisk Lavalkali Sulfatbestandig cement, hvilket udleder ca. 10 % mere CO_2 end Rapidcement (Tabel 4).

Efter lanceringen af Aalborg Portlands grønne Futurecem i starten af 2021 har de forskellige betonproducenter udviklet grønne varianter af deres standardbetoner. Figur 10 indeholder data fra Unicons prislister [15] for en række standardprodukter (sætmålsbeton). De orange symboler svarer til de konventionelle betoner – primært baseret på Rapidcement og flyveaske – der modsvarer de tilsvarende typer fra branche-EPD'erne. Unicon har desuden medtaget to lave styrkeklasser C12/15 og C16/20 til miljøpåvirkning P, der ikke er repræsenteret i branche-EPD'erne, men som følger den stiplede linje. Som det fremgår af Figur 10 ligger de laveste CO_2 -aftryk på ca. 150 kg CO_2/m^3 for lavstyrkebetonerne.



Figur 10. CO₂-aftryk for betontyper indeholdt i de danske branche-EPD'er [3] baseret på Rapidcement og flyveaske. De to åbne symboler repræsenterer betonsammensætninger baseret på Aalborg Portlands Lavalkali Sulfatbestandig cement, der typisk benyttes til brobetoner.

De grønne symboler og tilhørende stiplede linje repræsenterer en serie grønne standardbetoner, hvor Rapidcement er erstattet af Futurecem, hvilket ses at medføre en CO₂-reduktion på 25 %.

Data i Figur 10 omfatter hovedsageligt sætmålsbetoner, men i henhold til Unicons tal [15] vil SCC typisk resultere i CO₂-aftryk, som generelt ligger 20-30 kg CO₂ højere, primært pga. højere pastaindhold og dermed højere cementindhold.

Tabel 5 viser fire eksempler på, hvordan de forskellige bidrag til betonens CO₂-aftryk fordeler sig på processer og delmaterialer. Eksemplerne dækker de forskellige kvaliteter og styrkeklasser svarende til ovenstående.

Cementens bidrag til betonens CO₂-aftryk er altdominerende, svarende til ca. 90 % af det samlede aftryk.

Tallene i Tabel 5 viser, hvordan de forskellige delmaterialer bidrager med indlejret CO₂ svarende til deres emissionstal hidrørende fra produktionen af det enkelte delmateriale (fase A1). Hvert delmateriale har desuden et transportbidrag i fase A2, der afhænger af producentens placering i forhold til materialeleverandørerne. De viste tal er gennemsnitsdata for danske betonproducenter, men stor variation må forventes på transportbidragene. Nederst i

hver beregning er bidragene fra fase A1 og A2 opsummeret og fase A3 er angivet med en gennemsnitsværdi der er stærkt afhængig af den enkelte producents produktionsanlæg, energiforbrug mv.

Til slut er der angivet et transportbidrag (fase A4) svarende til en gennemsnitlig afstand fra betonværket til støbestedet svarende til 25 km.

Cementens store indflydelse på betonens totale CO₂-aftryk ses tydeligt i eksemplerne i Tabel 5. De øvrige delmaterialers emissionstal er forsvindende i forhold til cementens og transportbidrag er oftest kun ca. 5 % af total CO₂-aftryk. Derfor er det åbenlyst, at CO₂-reduktioner er mest oplagte at håndtere igennem en optimering af cement og bindersammensætning. Dette emne er behandlet i Betonhåndbogens afsnit omhandlende Reduktion af cementindhold.

De danske branche-EPD'er (Figur 10) dækker over flere producenter og adskillige produktionssteder, hvilket betyder at gennemsnitsværdierne for CO₂-aftrykkene indeholder en vis variation som følge af forskelle i delmaterialer og betonrecepter. Dette er illustreret i Figur 11, hvor normalfordelingen er antaget at gælde for variationer i producenterne betonsammensætning. Ud fra data til branche-EPD'er er det vurderet, at cementindholdet varierer med en variationskoefficient på 8 til 12 %, hvilket er udgangspunktet for normalfordelingen. De øvrige delmaterialer og transportbidrag har kun en mindre indflydelse på CO₂-aftrykkets variation set i forhold til cementen.

Den blå linje i Figur 11 angiver fordelingsfunktionen med middelværdi på 1 og heraf kan det fx aflæses, at 10 % af produktionen, eller derunder, vil have mindre end 0,87 gange det gennemsnitlige CO₂-aftryk. Tilsvarende vil under 10 % af produktionen indeholde mere end 1,13 gange det gennemsnitlige CO₂-aftryk. Omvendt kan man sige, at ca. to tredjedele af produktionen kan forventes at opnå CO₂-aftryk indenfor et interval på gennemsnitsværdien ± 10 %.

Tabel 5: Eksempler på forskellige beregninger af CO₂-aftryk for forskellige betonsammensætninger.

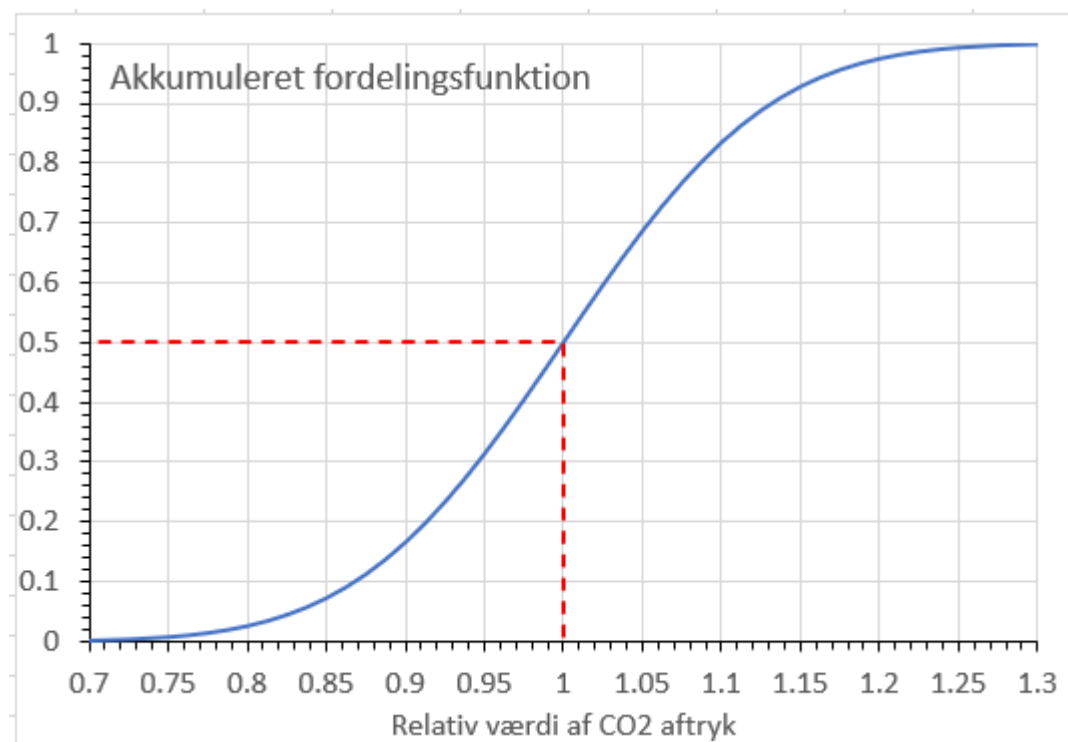
Eksempel på C25 P	Mængde	Fase A1 <i>Emissionstal</i>	Delma- terialer, A1	Transport, Fase A2
	kg/m ³	kgCO ₂ /kg	kgCO ₂ /m ³	kgCO ₂ /m ³
Rapidcement	260	0.86	223.6	1.7
Flyveaske	0	0.002	0.0	0.0
Mikrosilika	0	0	0.0	0.0
Vand	167	0.0005	0.1	0
Sand, 0-4 mm	872	0.003	2.6	2.6
Sten, grusgrav	944	0.003	2.8	2.8
Tilsætningsstoffer	2.2	0.5	1.1	0.0
	2245.2		230.2	7.2
Indhold af pasta	255	liter/m ³ ekskl. luft		
Nominelt v/c forhold	0.64			
Produktion på betonfabrik, Fase A3:			10	kgCO ₂ /m ³
Transport til byggeplads, Fase A4:			5	kgCO ₂ /m ³
		I alt A1 - A4:	252.4	kgCO₂/m³

Eksempel på C30 M	Mængde	Fase A1 <i>Emissionstal</i>	Delma- terialer, A1	Transport, Fase A2
	kg/m ³	kgCO ₂ /kg	kgCO ₂ /m ³	kgCO ₂ /m ³
Rapidcement	335	0.86	288.1	2.2
Flyveaske	46	0.002	0.1	0.3
Mikrosilika	0	0	0.0	0.0
Vand	159	0.0005	0.1	0
Sand, 0-4 mm	698	0.003	2.1	2.1
Sten, sømaterialer	1005	0.003	3.0	3.0
Tilsætningsstoffer	4.5	0.5	2.3	0.0
	2247.5		295.6	7.6
Indhold af pasta	290	liter/m ³ ekskl. luft		
Nominelt v/c forhold	0.44			
Produktion på betonfabrik, Fase A3:			10	kgCO ₂ /m ³
Transport til byggeplads, Fase A4:			5	kgCO ₂ /m ³
		I alt A1 - A4:	318.2	kgCO₂/m³

Tabel 5... fortsat

Eksempel på C35 A	Mængde	Fase A1 <i>Emissionstal</i>	Delma- aterialer, A1	Transport, Fase A2
	kg/m ³	kgCO ₂ /kg	kgCO ₂ /m ³	kgCO ₂ /m ³
Delmaterialer				
Rapidcement	368	0.86	316.5	2.4
Flyveaske	64	0.002	0.1	0.4
Mikrosilika	0	0	0.0	0.0
Vand	168	0.0005	0.1	0
Sand, 0-4 mm	650	0.003	2.0	2.0
Sten, grusgrav	1002	0.003	3.0	3.0
Tilsætningsstoffer	5	0.5	2.5	0.0
	2257.0		324.1	7.8
Indhold af pasta	315	liter/m ³ ekskl. luft		
Nominelt v/c forhold	0.42			
Produktion på betonfabrik, Fase A3:			10	kgCO ₂ /m ³
Transport til byggeplads, Fase A4:			5	kgCO ₂ /m ³
		I alt A1 - A4:	346.9	kgCO₂/m³

Eksempel på C40 E (brobeton)	Mængde	Fase A1 <i>Emissionstal</i>	Delma- aterialer, A1	Transport, Fase A2
	kg/m ³	kgCO ₂ /kg	kgCO ₂ /m ³	kgCO ₂ /m ³
Delmaterialer				
Lavalkali Sulfatbestandig	416	0.925	384.8	2.7
Flyveaske	42	0.002	0.1	0.3
Mikrosilika	17	0	0.0	0.4
Vand	158	0.0005	0.1	0
Sand, 0-4 mm	604	0.003	1.8	1.8
Knust granit, Norge	1042	0.003	3.1	12.5
Tilsætningsstoffer	5.9	0.5	3.0	0.0
	2284.9		392.9	17.7
Indhold af pasta	315	liter/m ³ ekskl. luft		
Nominelt v/c forhold	0.34			
Produktion på betonfabrik, Fase A3:			10	kgCO ₂ /m ³
Transport til byggeplads, Fase A4:			5	kgCO ₂ /m ³
		I alt A1 - A4:	425.6	kgCO₂/m³



Figur 11. Fordelingsfunktion for fabriksbetons CO₂-aftryk baseret på de danske branche-EPD'er [3]. Den røde stiplede linje angiver gennemsnitsværdien.

21.1.2.2 Betonelementer

Ud over de førnævnte branche-EPD'er for fabriksbeton, har branchesammenslutningen Dansk beton udgivet en lang række EPD'er for forskellige præfabrikerede betonprodukter. Dette drejer sig om følgende produkter:

- Betonfliser og belægningssten, deklareret enhed = 1 m² belægning
- Betonrør til kloak og afvanding, deklareret enhed = 1 m rørledning
- Letklinkerblokke, deklareret enhed = 1 m³ letklinkerblok
- Fundablokke, deklareret enhed = 1 ton fundablok ekskl. udfyldningsbeton
- Vægelementer i normal beton og letklinkerbeton med slap armering, deklareret enhed = 1 m² væg inkl. udsparinger og huller
- Facade-sandwichelementer med bagmur, isolering og facadeplade, deklareret enhed = 1 m² facade inkl. udsparinger og huller
- Dækelementer med forspænding (huldæk og TT-ribbedæk), deklareret enhed = 1 m² dæk ekskl. udsparinger og huller.

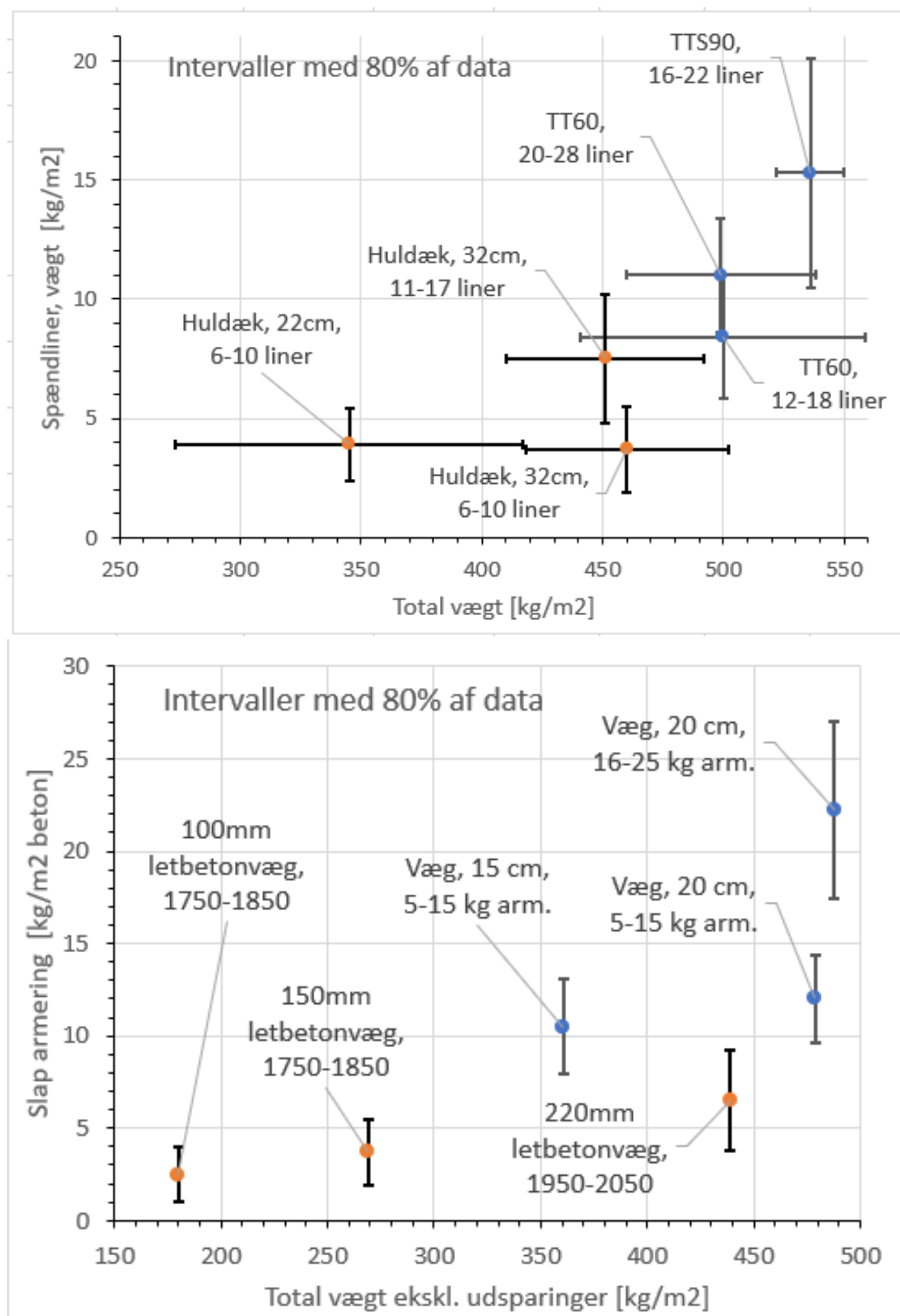
Her skal der kun fokuseres på betonelementer til byggeri i form af vægelementer og dækelementer, hvor CO₂-aftrykket er sammensat af bidrag fra både beton og armering. På samme måde som for fabriksbeton har de forskellige producenter indrapporteret data, som danner udgangspunkt for en gennemsnitlig branche-EPD for hvert produkt.

Figur 12 indeholder de varianter, der er omfattet af branche-EPD'er for væg- og dækelementer. For de forspændte dækelementer drejer det sig om 3 forskellige hul-dæktyper og 3 forskellige TT-dæk, som det fremgår af det øverste diagram. Vægten pr. m² dæk er vist langs x-aksen og armeringsmængden er vist langs med y-aksen.

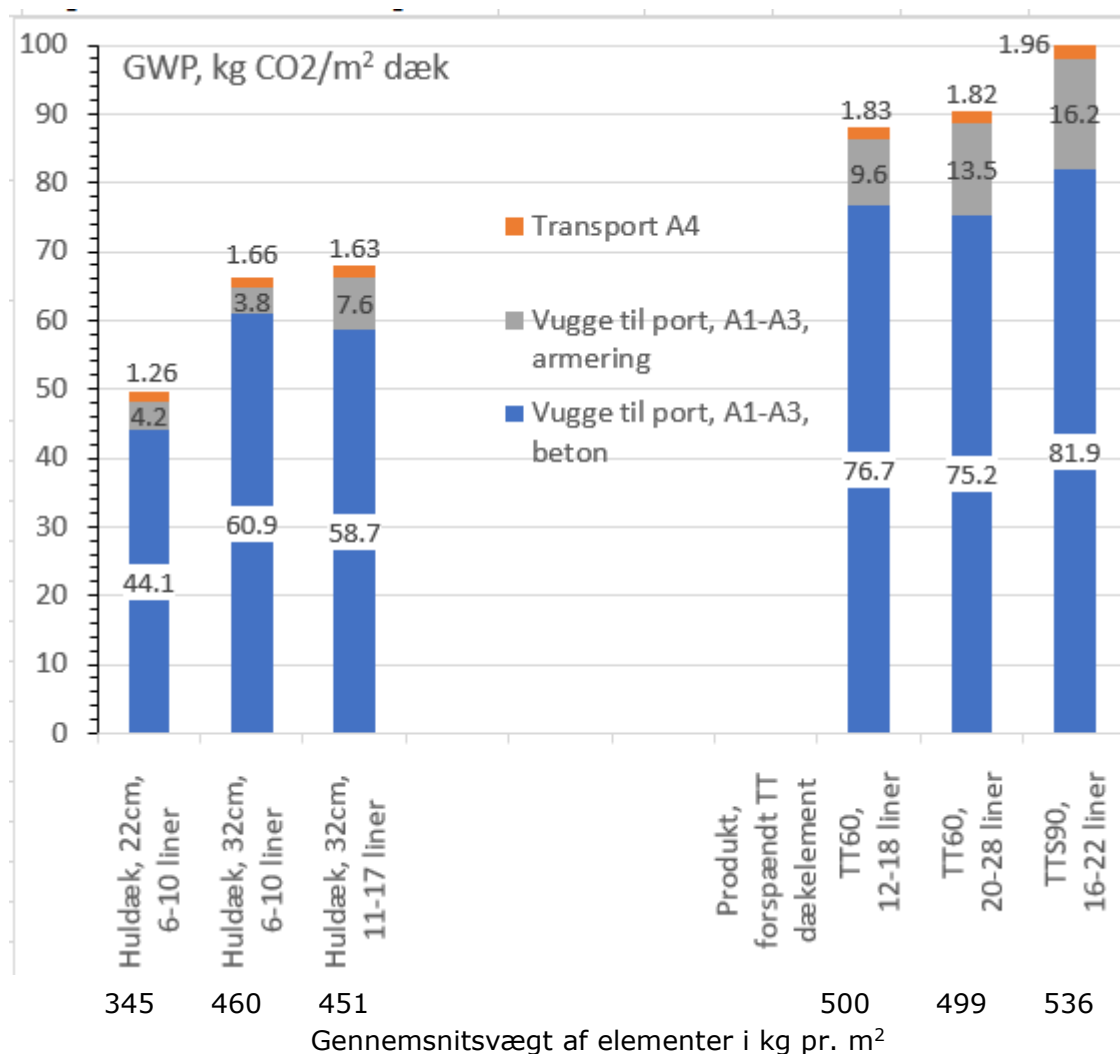
For vægelementerne ses tilsvarende for 3 forskellige vægelementer i normal beton og 3 helvægge i letklinkerbeton. For vægelementerne er der ikke nogen variation i vægten pr. m², da den er entydig bestemt af vægtykkelsen. Det skal bemærkes, at branche-EPD'er for vægelementer er baseret på en kvadratmeter væg indeholdende ca. 11 % udsparinger og huller. Tallene som er anvendt i nærværende beskrivelse, er omregnet til betonareal ekskl. udsparinger og huller.

Branche-EPD'er for betonelementer indeholder ikke angivelser af styrkeklasser og/eller tilhørende miljøpåvirkning, men det er forudsat, at de er beregnet til indbygning i indendørs omgivelser, hvilket typisk svarer til miljøpåvirkning P. De valgte elementtyper og varianter dækker et stort anvendelsesområde i alle typer af byggeri.

Fælles for betonelementerne er, at der hovedsageligt anvendes Basis cement (Tabel 4), som har lavere CO₂-aftryk end fx Rapidcement, og som sikrer den høje tidlige styrke, som betonelementbranchen har brug for i deres produktionscyklus. Bidrag fra armering er medregnet, svarende til gennemsnitstallene for europæisk armering, jf. afsnit 21.1.2.3.



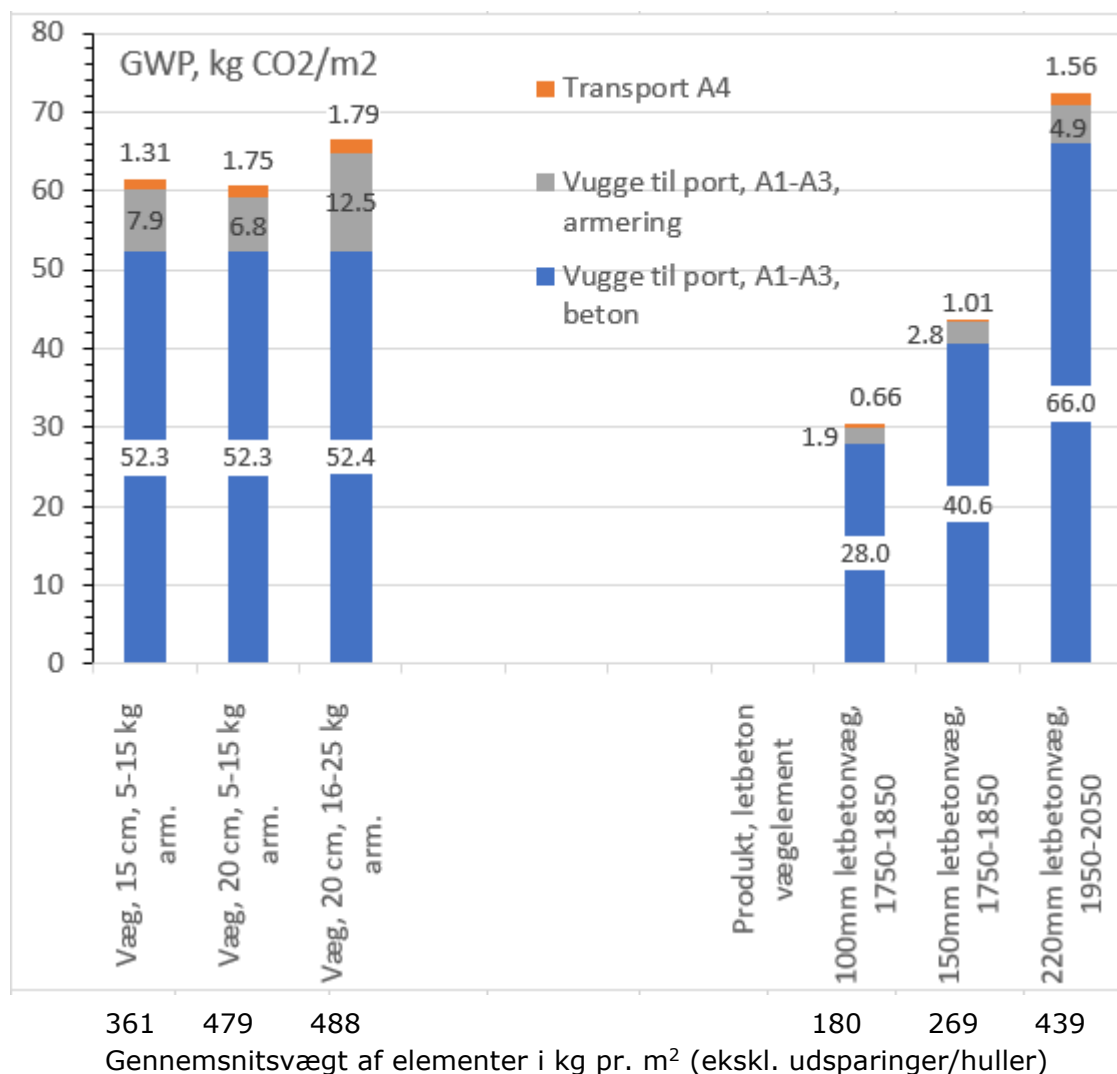
Figur 12. Oversigt over forspændte dækelementer (øverst) og vægelementer (nederst) indeholdt i de danske branche-EPD'er [3]. Symbolerne angiver gennemsnittet og intervaller repræsenterer 80 % af data.



Figur 13. Gennemsnitligt CO₂-aftryk pr. m² dækelementer [3]. Se gyldighedsområdet i Figur 12.

Opgjort pr. kvadratmeter er CO₂-aftrykket vist i Figur 13 og Figur 14 for hhv. dæk- og vægelementer. Diagrammerne indeholder en opdeling på beton og armering ud fra en forudsætning om, at emissionstallene for slap armering og spændarmering svarer til gennemsnitstallene for Europa (jf. afsnit 21.1.2.3). Det skal bemærkes, at branche-EPD'erne ikke medtager beton og fugearmering til sammenstøbning af elementerne. Disse bidrag er dog oftest negligele.

Transportbidraget (fase A4) er baseret på en gennemsnitsafstand på 50 km fra beton-elementproducenten til indbygningsstedet. Såfremt transportbidraget omregnes fra m² til vægten af elementerne fås et konstant værdi svarende til 4 kg CO₂ pr. ton for alle produkterne i både Figur 13 og Figur 14.



Figur 14. Gennemsnitligt CO₂-aftryk pr. m² vægelementer [3]. Ren beton ekskl. udsparinger og huller. Se gyldighedsområdet i Figur 12.

21.1.2.3 Armering

Stålarmering produceres ved en energiintensiv proces, hvilket medfører et relativt højt CO₂-aftryk. Armering til danske byggerier stammer typisk fra forskellige europæiske producenter i Tyskland, Spanien, Storbritannien og Norge. Armering kan produceres ud fra to fundamentalt forskellige processer, nemlig fra skrot, der smeltes i en elektrisk lysbueovn, eller fra jernmalm, der udvindes og smeltes i en højovn. Den førstnævnte metode giver langt det mindste CO₂-aftryk og anvendes ofte til armeringsstål.

Armeringsstål har et CO₂-aftryk svarende til cement, når man sammenligner kg til kg.

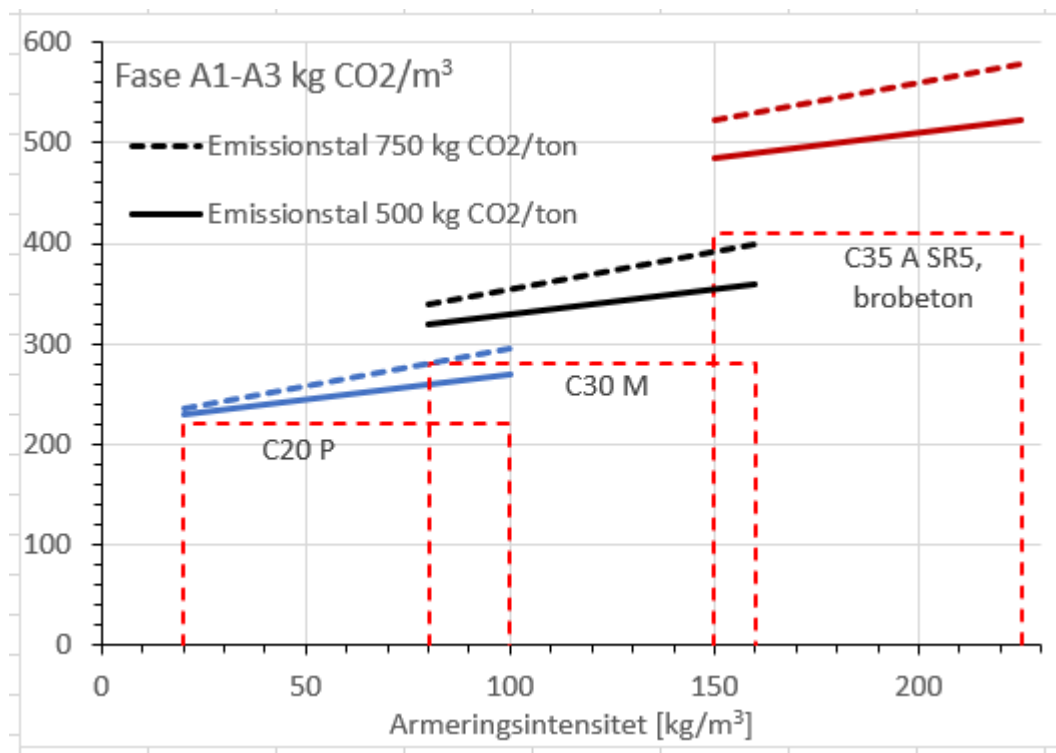
Armeringsstål tildannet og klar til brug i betonen vil have et CO₂-aftryk fra mellem 400 til 800 kg

CO₂ pr. ton. Dette dækker processerne i fase A1-A3, og oveni dette tal kommer transport til byggepladsen. Firmaet Celsa Steel producerer armeringsprodukter til hele Norden på sin fabrik i det nordlige Norge, hvor der anvendes grøn elektricitet fra vandkraft. Dette medfører et CO₂-aftryk på knap 500 kg CO₂/ton (fase A1-A3) for armering

produceret i Norge, skåret, svejst og tildannet i Danmark og efterfølgende transportet ud til betonproducenten.

LCA værktøjet LCA-Byg⁹ indeholder generiske data for stålarmering baseret på Økobau databasen, hvilket medfører et CO₂-aftryk på knap 700 kg CO₂/ton, hvilket kan forventes at svare til gennemsnittet for armering i Europa. En LCA undersøgelse, gennemført af de svenske Cement og Betonginstitut [16], vurderer emissionstallene for europæisk stålarmering til i gennemsnit at ligge mellem 750 og 1000 kg CO₂/ton.

For spændarmering ligger CO₂-aftrykket typisk omkring 1000 kg CO₂/ton og ofte højere [16] for fase A1-A3. Undersøgelsen af efterspændt beton til broer [17] medtager desuden bidrag fra forankringer, blikrør og injiceringsgrout, som er nødvendige for at foretage en efterspænding. Dette betyder, at emissionstallet samlet set ender på ca. 1800 kg CO₂ pr. ton spændstål. Heraf er godt halvdelen bidraget fra stålkablerne.



Figur 15. Armeringens indflydelse på armeret betonkonstruktions samlede CO₂-aftryk. De røde stiplede søjler repræsenterer betonens bidrag.

Når armering indbygges i betonen, bidrager dets indlejrede CO₂ naturligvis i den samlede betonkonstruktions CO₂-aftryk. Dette var tilfældet i branche-EPD'er for betonelementer beskrevet i forrige afsnit. Figur 15 illustrerer, hvor stor en andel armeringen typisk udgør af CO₂-aftrykket for en kubikmeter armeret beton. Der er anvendt tre forskellige betoner i Figur 15:

⁹ LCA-Byg ver. 5 kan frit downloades fra www.lcabyg.dk

- C20/25 P til letarmerede konstruktioner såsom fundamenter, terrændæk, indvendige vægge mv.
- C30/37 M til normalt-armerede konstruktioner såsom søjler, bjælker og kælder-vægge.
- C35/45 A brobeton til hårdt-armerede anlægskonstruktioner, hvor der ofte er krav om Lavalkali sulfatbestandig cement (SR5).

De fuldt optrukne linjer i Figur 15 repræsenterer totalt CO₂-aftryk baseret på et emissionstal for slap armering på 500 kg CO₂/ton, og de fede stiplede linjer svarer til et højere emissionstal på 750 kg CO₂/ton. For letarmerede konstruktioner vil armeringens andel være omkring 5 %, men ofte ligger den på 20-30 % af det totale CO₂-aftryk. Det ses også, at der er nemme reduktioner at hente ved at vælge armering med lavt CO₂-aftryk og stille krav til stålleverandørerne.

21.1.2.4 Endt levetid

De nævnte branche-EPD'er for betonprodukter indeholder CO₂-bidrag fra livscyklusfaserne C1-C4 samt fase D, der omfatter processerne efter endt levetid. Dette inkluderer nedbrydning, sortering, fraktionering, transport til knuseanlæg, knusning og håndtering af det nedknuste materiale. Bidraget i fase D er negativt, da den nedknuste beton kan nyttiggøres fx som vejfyld og dermed sparer på de naturlige råstoffer.

Afsnit 21.1.3 indeholder mere information omkring genanvendelse af nedknust beton i produktionen af ny beton.

CO₂-aftrykket for faserne C1-C4 udgør ca. 14 kg CO₂ pr. ton beton. Dette gælder både for fabriksbeton og betonelementer. Det negative CO₂-aftryk i fase D varierer fra produkt til produkt afhængig af, om der er stålarmering i nedknusningsaffaldet eller ej. For ren beton – fx fabriksbeton uden armering – ligger bidraget på -2 kg CO₂ pr. ton svarende til besparelsen ved at udvinde jomfruelige råstoffer. Økobau databasen, som benyttes i LCA-Byg værktøjet angiver således et negativt bidrag for stål på ca. -400 kg CO₂/ton.

21.1.3 Genanvendelse og genbrug

Som nævnt i 21.1.1.1 under punktet cirkulær økonomi er der stor fokus på at spare ressourcer vha. genindvinding, genanvendelse og genbrug. Nedrivnings- og byggeaffald estimeres til at udgøre nogle millioner tons årligt i Danmark, men der findes ikke nøjagtige tal for mængderne [18]. Betonens andel af affaldsmængden estimeres til ca. 25 % og i 2010-2013 er det vurderet, at betonaffald udgjorde ca. 2 mio. tons årligt [18].

I en anden opgørelse [19] er det stipuleret, at beton og asfalt udgjorde ca. halvdelen af bygge- og anlægsaffaldet i 2014, hvilket resulterer i ca. 2 mio. tons beton- og asfalt-affald tilsammen. I samme reference vurderes det, at knap 90 % af affaldet sorteres og genanvendes. Størstedelen af bygge- og anlægsaffaldet kommer fra nedrivningsopgaver [19], mens den resterende del er spild under nybyggeri og renovering samt emballageaffald. For betons vedkommende har der været god efterspørgsel på nedknust beton til anvendelse som ubundne bærelag til veje og befæstede pladser. Dette produkt

går normalt under betegnelsen genbrugsstabil og kan indeholde både nedknust tegl og asfalt. Der har generelt været en god efterspørgsel på genbrugsstabil i markedet, hvilket er en af årsagerne til, at nedknust beton kun i begrænset grad har været anvendt som erstatning for tilslag i ny beton.

Der har dog i de senere år været fokus på at genanvende materialer på et kvalitetsniveau, som er mindst svarende til det niveau, som materialerne oprindeligt kommer fra. Denne tendens ses også for andre materialer – fx plastik- og metalaffald, som indsamles separat fra husholdningerne til genbrug, frem for blot at ende i brændbart affald. Det samme gør sig gældende indenfor nedrivningsaffald, hvor materialerne ses som en ressource snarere end affald [20].



Figur 16. Nedrivningsaffald kan indeholde mange forskellige materialer.

Det er blevet dokumenteret i mange F&U projekter, både i Danmark og rundt omkring i verden, at nedknust beton som erstatning for især den grove tilslagsfraktion ikke medfører nogen væsentlige problemer med genbrugsbetonens egenskaber. Disse projekter skal ikke refereres særskilt her, men som det fremgår i afsnit 21.1.3.1, er der indført visse begrænsninger i forhold til erstatningsgrad og anvendelsesområder for genbrugsbeton. Disse begrænsninger er fastlagt ud fra forskellige hensyn til holdbarhed og egnethed, samt ud fra erfaringer opnået i de forskellige laboratorieundersøgelser, som er udført igennem de seneste 30+ år. Ydermere er der indført renhedskrav, der skal sikre, at uønskede materialer og underlødige materialekvaliteter ikke gør dem uegnede som betontilslag, se Figur 16.

Generelt viser erfaringerne, at betoner produceret med genanvendt tilslag i erstatningsgrader højere end 10 til 20 % vil opleve markante ændringer i især E-modul, udtøringsvind og krybning, hvilket kan påvirke de statiske beregninger og betonkonstruktionens virkemåde. Der er generelt store variationer på de forsøgsresultater, der findes i litteraturen, og derfor er der stillet krav i betonstandarden om, at producenten skal

deklarere disse egenskaber, hvis der anvendes erstatningsgrader over 10 til 20 %. Dette er nærmere beskrevet i næste afsnit. Nyere resultater tyder på, at E-modulet ligger 5 til 10 % lavere end for en tilsvarende konventionel beton [21] (ens styrke), men det vil afhænge stærkt af det genanvendte tilslags kvalitet. For svind og krybning kan der i visse tilfælde observeres stigninger på op til 50 % i forhold til konventionel beton uden genanvendt tilslag.

I det følgende er reglerne for genanvendelse af spildbeton og nedrivningsaffald kort gennemgået. Langt den største kilde til genanvendt tilslag er nedrivningsaffald som nævnt tidligere, men betonspild hos den enkelte betonproducent er estimeret til at ligge fra ca. 2 % for fabrikbetonproducenter op til ca. 8 % for elementproducenter (især fra huldækproduktionen). Denne mængde kan relativt nemt elimineres og genanvendes som procestilslag, hvis man følger nogle få simple anvisninger [22].

21.1.3.1 Regler for genanvendelse af beton

Generelt er der gode muligheder for genanvendelse af nedknust beton som erstatning for naturligt tilslag i produktionen af ny beton. Reglerne er beskrevet i den danske betonstandard, der opdeler genanvendt tilslag i tre typer (jf. afsnittet omhandlende genbrugsbeton):

- Udvasket procestilslag kommer fra friske betonrester, returbeton, vaskevand, prøveudtagningsmateriale til sætmål og luft mv., hvorfra tilslagsdelen udvaskes i et specielt kar, inden hærkning er gået i gang. De bundfældede materialer kan efterfølgende samles op og genanvendes.
- Nedknust procestilslag er hærnet beton som ikke har været indbygget i nogen permanent konstruktion endnu. Det vil sige returbeton og overskudsproduktion, hærkede prøveemner samt afsavede dele af fx huldæk. Betonen placeres typisk i et område, indtil der er tilpas stor mængde til at et mobilt knuseanlæg bestilles, som knuser det ned (Figur 17).
- Genanvendt tilslag er nedknust beton stammende fra nedrivning af de bærende konstruktioner i eksisterende byggeri eller fra andre konstruktioner.



Figur 17. Mobilt knuseanlæg i aktion. Brokker hældes ind til venstre og nedknust materiale kommer ud til højre.

Udvasket procestilslag

For udvasket procestilslag er det generelt muligt at anvende dette i mængder op til 5 % af totalt tilslag uden at sortere i groft og fint. Hvis det anvendes i erstatningsgrader over 5 % skal det sorteres og opfylde DS/EN 12620. Udvasket procestilslag skal stamme fra beton, der har efterlevet kravene til tilslag iht. DS/EN 12620 og den danske betonstandard. Generelt skal udvasket procestilslag anvendes internt på eget produktionssted, men under visse omstændigheder og øget kontrol kan udvasket procestilslag anvendes af en gruppe af betonproducenter i fællesskab.

Udvasket procestilslag kan primært anvendes til beton i passiv miljøpåvirkning (eksponeringsklasserne X0 og XC1), medmindre producenten har specielle dokumenterede procedurer, der sikrer, at det udvaskede procestilslag udelukkende stammer fra betoner i eksponeringsklasser, svarende til den ønskede anvendelse.

DS/EN 206 DK NA annex E.3.1 stiller krav til maksimale erstatningsgrader på 30 % af fint tilslag og op til 100 % af groft tilslag. Hvis mængden af udvasket procestilslag overstiger 25 % af totalt tilslag, skal der foretages ekstra prøvning af dette.

Det er ligeledes muligt at genanvende procesvand som blandevand i beton, ligesom det tillades at bruge overfladevand og industrielt spildevand. Sidstnævnte dog kun hvis visse krav til indholdet af tungmetaller er overholdt. Betonstandarder indeholder de specifikke krav til bl.a. tørstofindhold.

Nedknust procestilslag

Nedknust procestilslag opfattes som en ren kilde til genanvendt betontilslag, da det ikke har været indbygget i permanent byggeri og ikke udsat for den samme forurening fra andre byggematerialer. Derfor er kravene til nedknust procestilslag generelt lavere end for betonaffald stammende fra nedrivning af eksisterende byggeri. Producenten skal dog sikre, at råmaterialet holdes adskilt fra andre forurenende stoffer såsom isolering, plast, organisk materiale (fx fra løvfald) mv. Dette er ikke anderledes end de krav, der gælder for tilslagsmaterialer i øvrigt.

Tabel 6 indeholder en oversigt over de krav, som er gældende iht. DS/EN 206 DK NA, når en betonproducent ønsker at genanvende sit procestilslag i egen betonproduktion. Hvis en gruppe af producenter i fællesskab ønsker at gøre det samme, skal der i tillæg bestemmes densitet, absorption og chloridindhold iht. DS/EN 12620 ligesom for naturligt tilslag.

Tabel 6: Regler for genanvendelse af nedknust procestilslag til produktion af ny beton iht. betonstandarden. Genanvendt nedknust procestilslag må kun anvendes til beton i eksponeringsklasserne X0 og XC1 og i normal eller skærpet kontrolklasse. Kravene til erstatningsgrader > 5 % af totalt tilslag (højre kolonne) gælder også for generelt genanvendt tilslag.

Erstatningsgrad	≤ 5 % af totalt tilslag	> 5 % af totalt tilslag
Generelle krav	<u>Ikke</u> krav om sortering i groft og fint	Skal sorteres i groft og fint tilslag
	Skal stamme fra beton produceret iht. betonstandarden	
Supplerende krav	-	Renhedskrav i DS/EN 12620 skal opfylde Rcu ₉₅ , Rb ₁₀₋ , Ra ₁₋ , XRg _{0,5} , FL _{0,2-}
	-	Densitet, absorption og chloridindhold skal bestemmes ved prøvning som for naturligt tilslag
Supplerende krav til maksimalt tilladte erstatningsgrader:		
...ved anvendelse i beton op til styrkeklasse C35/45*	-	≤ 10 % af fint tilslag ≤ 20 % af groft tilslag
...ved anvendelse i beton over styrkeklasse C35/45**	-	≤ 10 % af fint tilslag ≤ 10 % af groft tilslag

*Noter: * erstatningsgraden kan dog øges til 100 % af groft og fint tilslag, hvis betonens E-modul, krybning og udtørringssvind dokumenteres i relevant omfang. ** erstatningsgraden kan dog øges til 20 % af fint tilslag og 50 % af groft tilslag, hvis betonens E-modul, krybning og udtørringssvind dokumenteres i relevant omfang.*

Hvis en gruppe af producenter ønsker at genanvende procestilslag i mængder > 5 % af totalt tilslag, skal dette opfattes som genanvendt tilslag og ikke som nedknust procestilslag, se Tabel 6 højre kolonne.

Et af de krav som fremgår af Tabel 6 er, at kildebetonen skal være produceret iht. betonstandarden, hvilket betyder, at der er tale om konstruktionsbeton. Dog er det tilladt at benytte fejlblandinger og returbeton, som ikke nødvendigvis opfylder standarden til punkt og prikke. Eksempelvis kan der være tale om for lavt luftindhold, eller forkert konsistens, der bevirker, at betonen kasseres og sendes retur.

En del af kravene i Tabel 6 er fremkommet på baggrund af de erfaringer, der blev registreret og dokumenteret i Nulspildsprojekter [22] og i Sydhavn Genbrugscenter [23]. Som en del af dokumentationen i de nævnte rapporter blev der også foretaget vurderinger af CO₂-aftrykket for beton med genanvendt tilslag sammenlignet med konventionel beton, og resultater viser, at gevinsten i form af CO₂-reduktioner er marginal. Nedknuste genanvendte materialer "koster" ca. det samme i CO₂ som jomfruelige materialer. Dog kan transportomkostningen gøre en væsentlig forskel i de tilfælde, hvor nedknusningsmaterialet findes tæt på produktionsstedet. Dette er fx tilfældet for genanvendt procestilslag.

Nedknust genanvendt tilslag

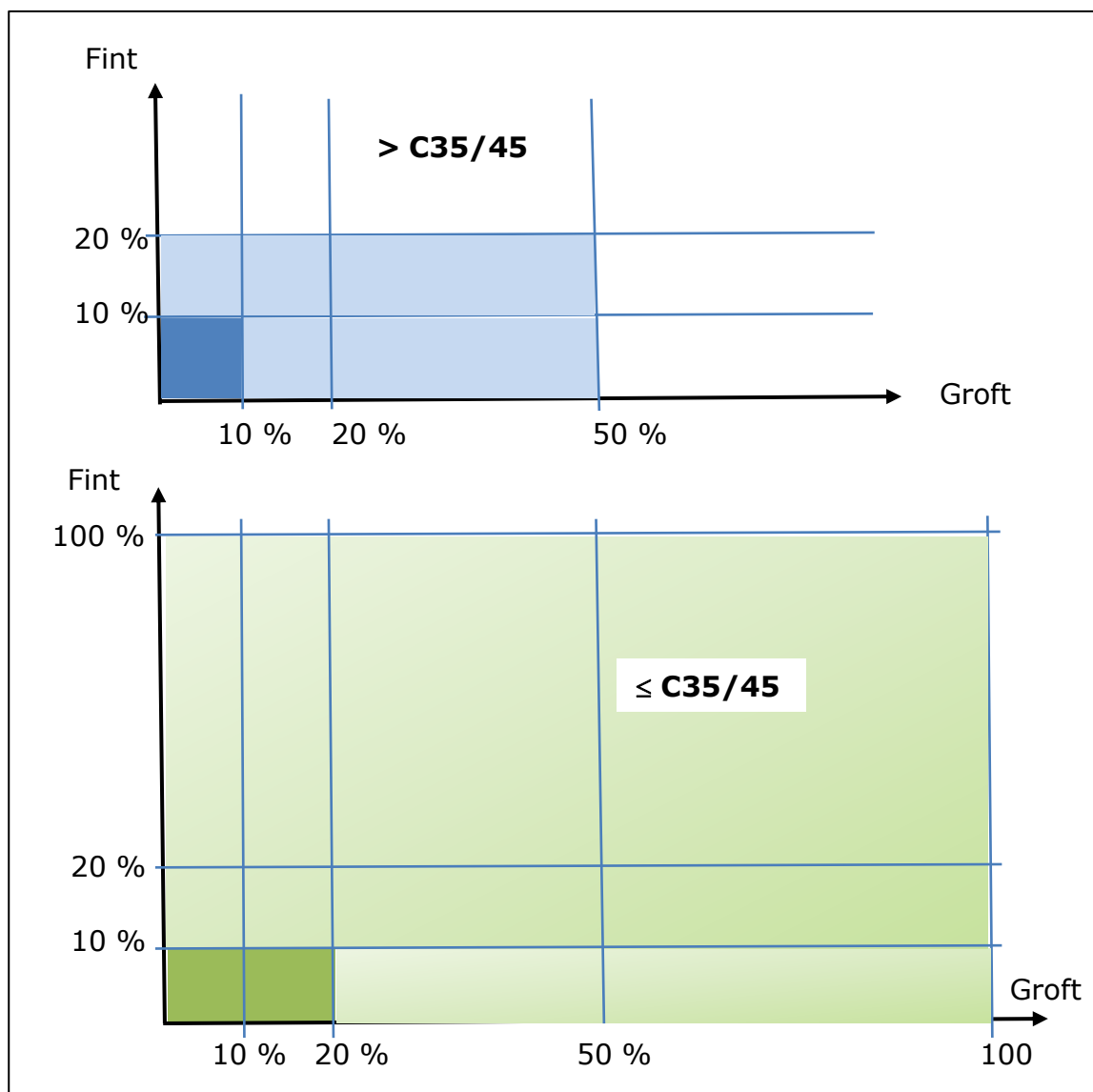
For knust nedrivningsaffald og anvendelser ud over dem, som er nævnt ovenfor, skal erstatningsgrader over 5 % af totalt tilslag kategoriseres som genanvendt tilslag, og kravene svarer til dem, som ses i højre kolonne i Tabel 6 ovenfor.

Det vil sige, at for genanvendt tilslag er der en sammenhæng mellem maksimal tilladt erstatningsgrad og styrkeklasse. Såfremt betonen udnytter de høje erstatningsgrader, som beskrevet i noten til Tabel 6, og samtidig skal anvendes til konstruktioner, hvor E-modul, krybning og svind har betydning for dens virkemåde og sikkerhed, så skal disse egenskaber dokumenteres vha. en række laboratorieforsøg, der er specificeret nærmere i DS/EN 206 DK NA, Annex E.3.3. Figur 18 indeholder en skematisk oversigt for de kombinationer af genanvendt fint og groft tilslag, der er tilladte.

Hvis man holder sig under de øvre grænser for erstatningsgrader, som er nævnt i Tabel 6 er der ikke behov for disse supplerende undersøgelser. Dette svarer til de mørksværede områder i Figur 18.

Et andet vigtigt krav, som er nævnt i Tabel 6, er renhedskravet til groft tilslag. Kravspecifikationen lyder RCu_{95} , Rb_{10-} , Ra_{1-} , $XRg_{0,5-}$, $FL_{0,2-}$ og dækker over følgende:

- Beton og natursten skal udgøre mindst 95 % af materialet (vægt-%).
- Tegl, porebeton og andre lette materialer må højst udgøre 10 %.
- Asfaltrester og bitumen må højst udgøre 1 %.
- Andre forurenende materialer såsom jord, metal, glas, hård plast mv. må højst udgøre 0,5 %.
- Lette flydende materialer (fx visse plasttyper, pap, træ, isolering mv.) må højst udgøre 0,2 liter pr. ton materiale.



Figur 18. Erstatningsgrader tilladt for genanvendt tilslag iht. DS/EN 206 DK NA. De farvede områder angiver tilladte kombinationer af fint og groft genanvendt tilslag. For kombinationer i de lyse farvede områder skal der foreligge en deklaration af genbrugsbetonens mekaniske egenskaber (E-modul, udtørringssvind og krybning). Dette er ikke krævet, når man holder sig indenfor de mørksværte områder.

Dette betyder, at kilden til det genanvendte tilslag skal være altovervejende beton med meget få forurenende materialer, hvilket stiller høje krav til sorteringen under nedrivningsprocessen. Betonstandarden beskriver ydermere, at betonen skal stamme fra konstruktionsbeton, hvilket betyder, at beton fra brøndgods, belægningssten, tagsten, porøbeton, letklinkerblokke, puds og mørtel ikke må anvendes til genanvendt tilslag i ny beton, som skal opfylde betonstandarden.

21.1.4 Eksempel på LCA

21.1.4.1 Etagebyggeri

I det følgende vises der et eksempel på livscyklusberegninger, hvor betonens bidrag illustreres. Der tages udgangspunkt i et tænkt betonbyggeri, som beskrevet i en rapport med tre forskellige cases [24]. Der er tale om et etagebyggeri med et bruttoareal på 6235 m², bestående af 8 blokke på 3 og 4 etager. Der er ikke kælder i byggeriet, og det er funderet direkte på terræn. Fundament og terrændæk er udført in-situ med beton C20/25 (selvkomprimerende beton). Alle etageadskillelser og tagdæk er udført i huldæk. De lodrette indvendige vægge og lejlighedsskel er udført som massive vægelementer i beton, og facader er opbygget med sandwichelementer med bagmur og forplade i beton.

Nedenstående Tabel 7 indeholder mængder på de forskellige konstruktionsdele samt emissionstal for de forskellige betoner baseret på GWP-data fra branche-EPD'er, jf. afsnit 21.1.2. Alle faser i livscyklus er medtaget for at illustrere fordelingen af betonkonstruktionernes CO₂-aftryk. Dog er fase A5 udeladt pga. manglende data.

Normalt skal en LCA for en bygning indeholde alle materialer inkl. døre, vinduer og tekniske installationer både i opførelsesfasen og i brugsfasen (udskiftninger) over en betragtningsperiode på 50 år [25,26]. Ud over indlejret CO₂ fra byggematerialerne skal der beregnes driftsenergi (elektricitet, ventilation og varme), som medfører emissioner igennem hele bygningens levetid. I DGNB-systemet¹⁰ og i de normale LCA-beregninger for bygninger [25,26] fordeles alle emissioner og energiforbrug jævnt hen over betragtningsperioden og bygningens areal, således at man får enheden kg CO₂e pr. m² pr. år. Normalt er levetiden for de bærende konstruktioner i beton langt højere end betragtningsperiodens 50 år, hvilket betyder, at der ikke sker udskiftninger af betonkonstruktioner, ligesom det fx er tilfældet for tagpap, vinduer, træbeklædning mv.

Tabel 7 omfatter kun betonkonstruktioner og er derfor ikke resultatet af en fuld LCA-beregning. Mængden af beton i fundamenter og terrændæk er opgjort i m³, mens alle væg- og sandwichelementer er opgjort i m² inkl. ca. 10 % huller (vinduer og døre). De vandrette huldæk i etageadskillelser og tagkonstruktioner er opgjort i netto m², hvor gennemføringer og huller er fratrasket. Der er ikke opgjort mængder af elementfugemørtel til sammenstøbning. I alt vejer betonkonstruktionerne ca. 4500 tons inkl. armering, hvilket svarer til godt 700 kg pr. kvadratmeter bruttoareal. Dette svarer til, at der placeres et lag beton af ca. 300 mm tykkelse fordelt over byggeriets areal.

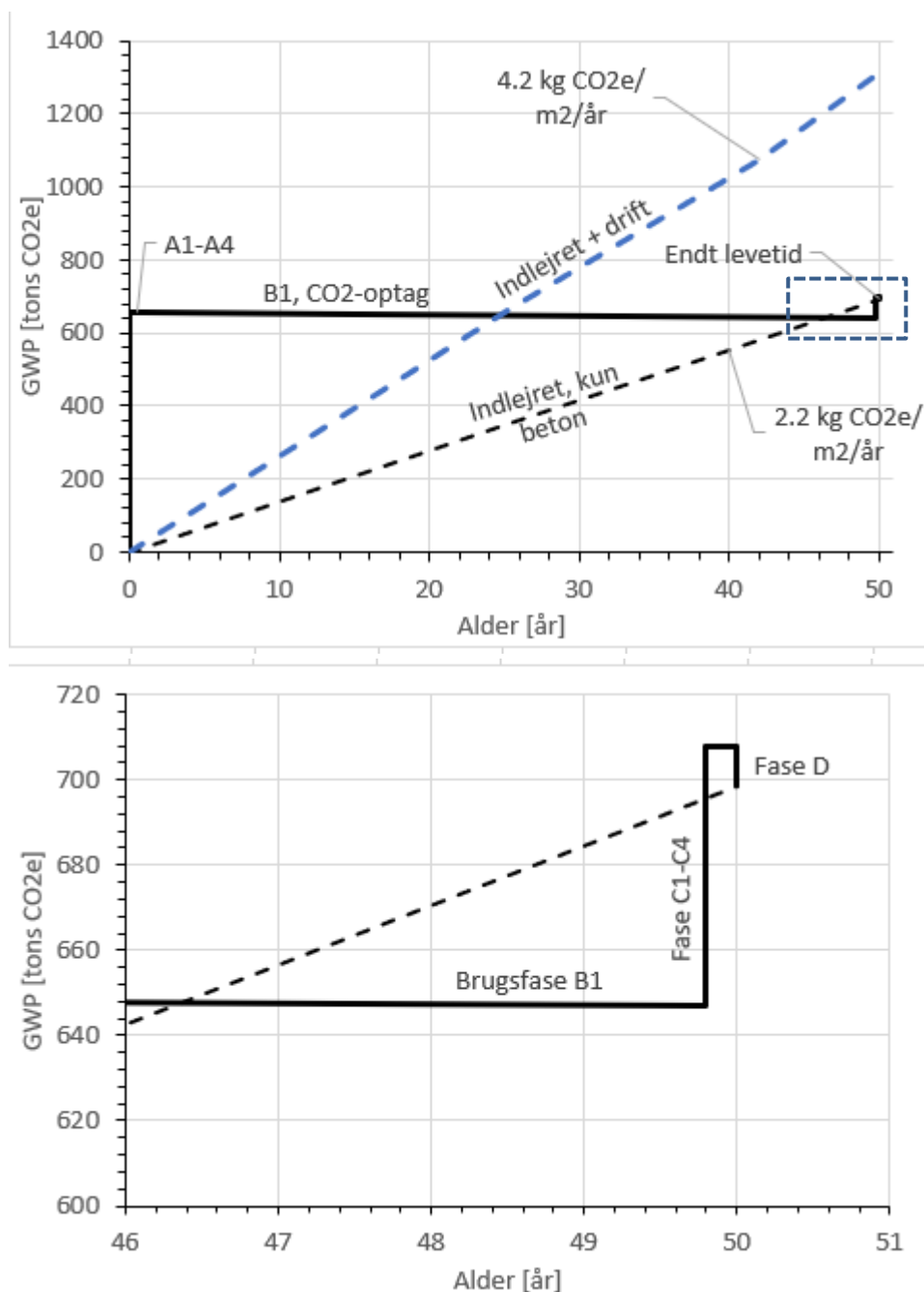
¹⁰ Se www.dk-gbc.dk

Tabel 7: Livscyklusanalyse på betonkonstruktioner til etagebyggeri med et bruttoareal på 6235 m². Mængder og konstruktionsdele er baseret på case 3 fra en tidligere sammenligningsrapport [24]. GWP-data stammer fra de danske branche-EPD'er for de pågældende betontyper.

Etagebyggeri	Fundament/ terrændæk	Vægge, Sandwich- 200 mm elementer	Huldæk, 220 mm	Total	
Enhed	m ³	m ²	m ²	m ²	-
Mængder	430	1100	1700	6300	-
Armering [kg/Enhed]	40	10	15	3	-
Vægt pr. bruttoareal	165	75	137	349	725 kg/m²
Vægt i alt	1028	469	853	2174	4523 tons
Andel af total	22.7%	10.4%	18.9%	48.1%	100%
GWP, A1-A4, [kg CO ₂ e/Enhed]	239	68.5	92.4	51	-
GWP, A1-A4	102.8	75.4	157.1	321.3	657 tons CO₂e
GWP, B1 [kg CO ₂ e/Enhed]	-1.1	-1.2	-2	-0.7	-
GWP, B1	-0.5	-1.3	-3.4	-4.4	-10 tons CO₂e
GWP, C1-C4 [kg CO ₂ e/Enhed]	31	5.7	6.9	4.7	-
GWP, C1-C4	13.3	6.3	11.7	29.6	61 tons CO₂e
GWP, D [kg CO ₂ e/Enhed]	-5	-1	-1	-0.7	-
GWP, D	-2.2	-1.1	-1.7	-4.4	-9 tons CO₂e
I alt GWP	113.5	79.2	163.7	342.1	698 tons CO₂e
Andel af total	16.2%	11.3%	23.4%	49.0%	100%

Omtrent halvdelen af betonen består af huldæk, mens den resterende halvdel er fordelt på de øvrige konstruktioner, som det fremgår af Tabel 7. Den samme fordeling går igen på CO₂-aftrykket, hvor det fremgår, at indlejret CO₂ i materialerne under produktionen (fase A1-A4) udgør den altovervejende andel på mere end 90 % af totalen. Der er medregnet negative bidrag fra fase B1 (karbonatisering, CO₂-optag, jf. afsnit 21.1.1.1) samt fra fase D (erstatning af jomfrueligt tilslag med nedknust beton, jf. afsnit 21.1.2.4) udgør kun nogle få procent af totalen.

Figur 19 (øverst) indeholder en illustration af de forskellige bidrag fordelt ud på hele betragtningsperioden (fuldt optrukket streg). Ved opførelsen realiseres bidraget fra fase A1-A4, hvorefter karbonatiseringen foregår løbende år efter år igennem brugsfasen med en lille reduktion af CO₂-aftrykket til følge. Når afslutningen af betragtningsperioden nås, medregnes emissioner forårsaget af nedbrydning og håndtering af materialer (sortering nedknusning, transport mv.) i fase C1-C4 samt evt. fase D, som dog ofte udelades, eftersom dette ligger udenfor projektets afgrænsning. De sidste bidrag er illustreret i Figur 19 nederst.



Figur 19. CO₂-aftryk for etagebyggeri (data i Tabel 7). Øverst ses hele betragtningsperioden på 50 år. Nederst ses en forstørrelse af kurverne ved endt levetid (stiplet kasse).

Diagrammet i Figur 19 indeholder desuden to stiplede linjer. Den sorte stiplede repræsenterer det totale CO₂-aftryk divideret med 50 år og bruttoarealet, hvilket medfører et jævnt fordelt indlejret CO₂, hidrørende fra betonkonstruktionerne, på:

$$(698 \text{ tons CO}_2\text{e}) / (50 \text{ år}) / (6235 \text{ m}^2) = 2,2 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2\text{/år}$$

I brugsfasen benyttes der energi til drift af bygningen. I henhold til tidligere LCA-beregninger [26] på 60 forskellige danske bygninger svarer driftsforbruget til ca. 2 kg CO₂e/m²/år, hvilket svarer til forskellen mellem de to stiplede streger i Figur 19.

I samme undersøgelse er den indlejrede CO₂ opgjort til mellem ca. 4 og 11 kg CO₂e/m²/år svarende til alle byggematerialer og tekniske installationer¹¹. Den gennemsnitlige indlejrede CO₂ ligger på 7-8 kg CO₂e/m²/år, men der er stor variation afhængig af bygningstype, materialevalg mv. og en spredning på 2 til 3 kg CO₂e/m²/år.

21.1.4.2 Anvendelse af LCA

Det må forventes, at LCA-beregninger vil vinde større indpas i både planlægning, design og udførelse af byggeri. Fra 2023 indbygges der et krav i Bygningsreglementet, hvor det skal dokumenteres vha. LCA, at den indlejrede CO₂ for nyt byggeri over 1000 m² ikke overstiger 12 kg CO₂e/m²/år. For mindre byggerier skal CO₂-aftrykket beregnes vha. LCA, men uden kravsætning.

I DGNB-systemet findes der allerede en GWP-referenceværdi for indlejret CO₂ på 9,2 kg CO₂e/m²/år, som benyttes til at give DGNB-point efter. For at opnå DGNB-certificering, skal der foreligge LCA-beregninger, som dokumenterer miljøpåvirkningen for et byggeri. Hvis man ligger mere end 50 % over referencen, får man ingen point; hvis man ligger på referencen, får man 45 point, og hvis man er 20 % under referencen tildeles man 75 point. Det skal dog nævnes, at DGNB foruden CO₂-aftrykket vurderer på yderligere 5 miljøindikatorer, som hver især vægter 10 til 15 %, mens CO₂-aftrykket er dominerende (GWP vægter 40 %). For hver indikator kan der foretages en beregning i stil med den, som er vist i Tabel 7, hvorefter totalen kan sammenlignes med en referenceværdi, og der opnås DGNB-point.

LCA anvendes også ofte til at udpege hot-spots for optimering i forhold til materialevalg og tekniske løsninger. Som det indledningsvist blev nævnt i afsnit 21.1.1, er der typisk tre metoder til at reducere CO₂-aftrykket for en betonkonstruktion. Anvendelse af cement med reduceret CO₂-udslip samt optimering af betonrecepten mht. cementindholdet bidrager begge til at mindske emissionsfaktorerne i Tabel 7 og dermed det totale CO₂-aftryk. Dette gælder både for beton og armering, og skal dokumenteres igennem retvisende EPD'er for de enkelte materialer. Den sidste metode for CO₂-reduktioner ligger i en optimering af betonforbruget igennem konstruktive løsninger samt bedre udnyttelse af betonens egenskaber. Jo tidligere i processen optimeringen ligger, jo større chance er der for at opnå markante reduktioner.

Hvis man normaliserer CO₂-aftrykket i Tabel 7 med betonens vægt så får man følgende emissionsværdi:

¹¹ Livscyklusberegninger er udført i programmet LCA-Byg, som er udviklet af SBI (nuværende AaU Build) til anvendelse i DGNB og den frivillige bæredygtighedsklasse. Beregningerne indeholder hverken fase B1 (CO₂-optag), eller fase D.

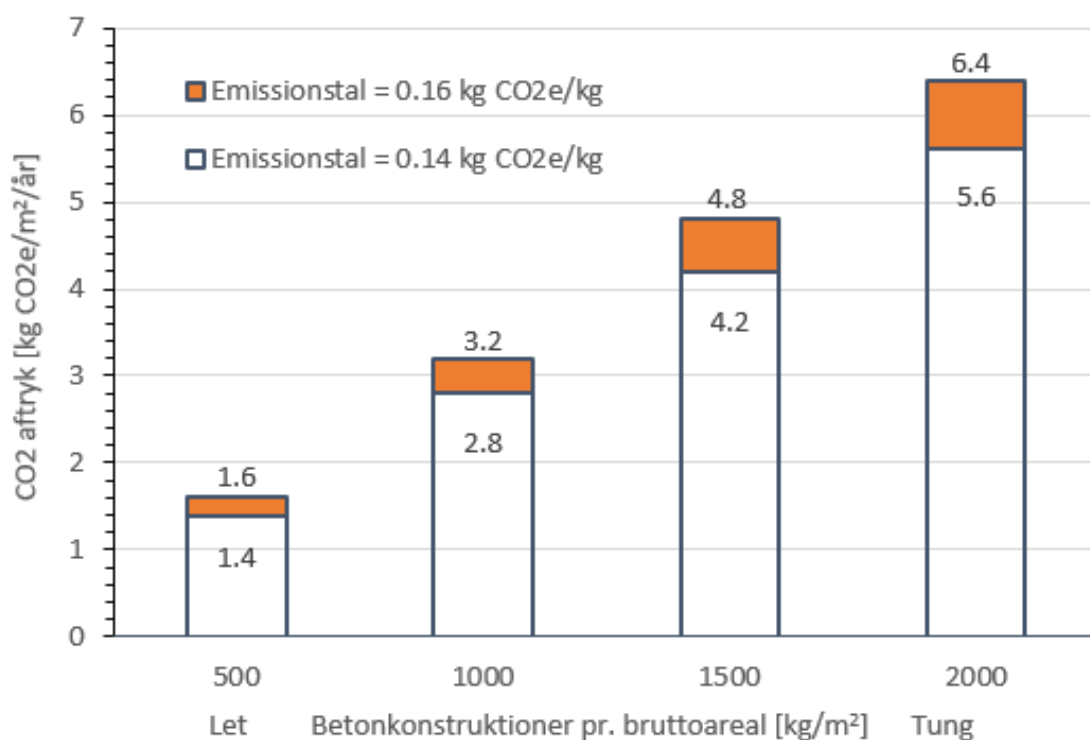
$$(698 \text{ tons CO}_2\text{e}) / (4523 \text{ tons armeret beton}) = 0,15 \text{ kg CO}_2\text{e/kg}$$

Erfaringsmæssigt vil et kg armeret beton til byggeri bidrage med mellem 0,14 og 0,16 kg CO₂e afhængig af betonkvalitet og armeringsintensitet. Dette stemmer overens med værdierne i Tabel 2 og Figur 15. For anlægsbygværker til broer og tunneler vil emissionstallet dog normalt ligge 25-40 % højere.

Betonbyggeri med en vægt på op til 500 kg pr. bruttoareal betegnes generelt som let og har et lavt CO₂-aftryk.

Når man kigger i litteraturen, hvor LCA-beregninger er rapporteret, vil man finde, at betonmængden i betonbyggeri typisk ligger fra 500 kg/m² (vægt pr. bruttoareal) og op til ca. 2000 kg/m² [25,27,28]. Eftersom langt de fleste bygninger indeholder beton i fundament, kælder og terrændæk, vil mængden afhænge stærkt af jordbundsforhold, grundvandspejlets beliggenhed, funderingsmetode mv. Figur 20 viser hvilket interval, der kan forventes for betonkonstruktionernes indlejrede CO₂ fra en meget let konstruktion på 500 kg/m² til en meget tung konstruktion på 2000 kg/m². De anvendte emissionstal i Figur 20 svarer til normal beton med armeringsintensitet i normalområdet (Figur 15). Der er ikke tale om beton med optimeret cementindhold eller andre grønne tiltag, der reducerer betonens CO₂-aftryk.

Som nævnt ovenfor anvendes der normalt markant mere beton i broer og tunneler end i bygninger, når man sammenligner, hvor mange kvadratmeter nytteareal, der skabes. Til gengæld består anlægskonstruktioner typisk udelukkende af beton og stål. Der findes kun få LCA-beregninger på broer [29], men resultaterne viser, at CO₂-aftrykket oftest er mere end dobbelt så højt som de værdier, der er vist i Figur 20. Dette skyldes dels, at krav til betonkvaliteten generelt er højere end for beton til byggeri, og dels at der benyttes mere beton og armering pr. kvadratmeter brodæk end til en kvadratmeter byggeri, jf. Tabel 3.



Figur 20. CO₂-aftryk for betonkonstruktioner pr. bruttoareal byggeri, jævnt fordelt over en betragtningsperiode på 50 år. Der er ikke medtaget bidrag fra andre byggematerialer.

21.1.5 Litteratur

21.1.5.1 Artikler og rapporter

- [1] Center for Ressourcebesparende Betonkonstruktioner (Grøn Beton), 1998-2002, www.gronbeton.dk
- [2] Dansk Beton, *Halvering af CO₂-udledningen fra Betonbyggeri, Roadmap mod 2030*, www.baeredygtigbeton.dk, 2019.
- [3] Dansk Beton, *Branche-EPD'er for 14 forskellige beton produkter*, <https://www.danskbeton.dk/baeredygtighed/miljoevaredeklarationer-epd/>
- [4] Damtoft, J.S., Glavind, M. & Munch-Petersen, C., "Danish Centre for Green Concrete", *Proceedings CANMET/ACI International Symp. On Sustainable Development of Cement and Concrete*, San Francisco, Sept. 2001.
- [5] Hasholt, M.T., Berrig, A. & Mathiesen, D., *Anvisning i Grøn Beton*, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, 2002.
- [6] Nielsen, C.V. & Glavind, M., "Danish experiences with a decade of green concrete", *Journ. Advanced Concrete Technology*, Japan Concrete Institute, Vol 5, pp. 3-12, 2007.
- [7] *Beton – til gavn for miljø og samfund*, Publikation fra Betonindustriens fællesråd, Aalborg Portland og Teknologisk Institut, 2006.

- [8] Pommer, K. & Pade, C., *Guidelines - Uptake of carbon dioxide in the life cycle inventory of concrete*, DTI, 2005.
- [9] Kjellsen, K.O., Guimaraes, M. & Nilsson, Å., *The CO₂ balance of concrete in a life cycle perspective*, DTI, 2005.
- [10] Pade, C. & Guimaraes, M., "The CO₂ uptake of concrete in a 100 years perspective", *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Vol. 37, pp. 1348-1356, 2007.
- [11] Löfgren, I., "Betydelsen av betongens koldioxidupptag ur ett livscykelperspektiv", *Husbyggaren* nr. 1, pp. 27-31, 2021.
- [12] Betonginitiativet, *Färdplan för klimatneutral konkurrenskraft, Betongbranchen*, Fossilfrit Sverige, 2018.
- [13] Aalborg Portland, Roadmap for bæredygtig cementproduktion i Danmark, <https://www.aalborgportland.dk/baeredygtighed/2030-roadmap/> , 2020
- [14] Norsk Betongforening, *Lavkarbonbetong*, Publikation nr. 37, 2020.
- [15] Unicon Prislister for Færdigbeton, januar 2021.
- [16] SBUF, *Klimatoptimeret byggnade av betongbroar*, SBUF projekt 13207, 74 pp. Maj 2017.
- [17] Teknologisk Institut, *CO₂-beregninger på bro*, Rapport udført for CCL Scandinavia, Marts 2021.
- [18] Miljøstyrelsen, *Udredning af teknologiske muligheder for at genbruge og genanvende beton*, Miljøprojekt nr. 1667, 2015.
- [19] Miljøstyrelsen, *Affaldsforebyggelse i byggeriet, forprojekt*, Miljøprojekt nr. 1919, 2017.
- [20] Miljøstyrelsen, *Ressourcekortlægning af bygninger*, Miljøprojekt nr. 2006, 2018.
- [21] Teknologisk Institut, *Nulspildsprojektet - Resultatopsamling*, Dansk Beton, 2019.
- [22] Teknologisk Institut, *Anvisning - Nulspildsløsninger i betonproduktion*, Dansk Beton, 2020.
- [23] Lauritzen, E. & Laugesen, P., *Genanvendelse af beton – Erfaringer fra nedrivning af skorsten og genanvendelse af knust beton som tilslag i ny beton til opførelse af Sydhavn Genbrugscenter i Valby*, Københavns Kommune og ARC, 2020.
- [24] Rambøll, *CO₂-besparelse ved træbyggeri*, Foreningen Træ i Byggeriet, 2020.
- [25] Birgisdóttir, H. & Madsen, S.S., *Bygningers indlejrede energi og miljøpåvirkninger – Vurderet for hele bygningers livscyklus*, SBI rapport nr. 2017:08, 2017.

- [26] Zimmermann, R.K., Andersen, C.E., Kanafani, K. & Birgisdottir, H., *Klimapåvirkning fra 60 bygninger – Muligheder for udformning af referenceværdier til LCA for bygninger*, SBI rapport nr. 2020:04, 2020.
- [27] Østfoldforskning, *Klimagassregnskap av tre- og betongkonstruksjoner*, Rapport nr. OR.26.19, 2019.
- [28] Kurkinen, E.L., Norén, J., Penaloza, D., Al-Ayish, N. & During, O., *Energi och klimateffektiva byggsystem – Miljövärdering av olika stomalternativ*, SP Rapport nr. 2015:70, 2015.
- [29] Nielsen, C.V., Thrane, L.N. & Rosengaard, W., "LCA and carbon footprint of concrete bridges", IABSE Conf. 2018, København, Juni 2018.
- [30] Cao, Z., Myers, R.J., et al., "The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle", *Nature Communications*, Vol. 11, 2020.

21.1.5.2 Standards

DS/EN 197-1:2012, *Cement – del 1: Sammensætning, krav til egenskaber og overensstemmelseskriterier for almindelige cementer*, CEN

DS/EN 206 DK NA:2020, *Beton – Specifikation, egenskaber, produktion og overensstemmelse – Regler for anvendelse af EN 206 i Danmark*, Dansk Standard

DS/EN 12620:2002+A1:2008, *Tilslag til beton*, CEN

DS/EN 16757:2017, *Bæredygtighed inden for byggeri og anlæg – Miljøvaredeklarerationer – Produktkategoriregler for beton og betonelementer*, CEN

DS/EN 15804+A1:2013, *Bæredygtighed inden for byggeri og anlæg – Miljøvaredeklarerationer – Grundlæggende regler for produktkategorien byggevarer*, CEN