



Byggeri, Beton

Notat

Dansk Beton
Letbetonelementgruppen

28. august 2007
CLN/MEG

Sammenligning mellem ekstra let og middeltungt boligbyggeri

1. Introduktion

Dette notat indeholder en sammenligning, hvor CO₂-regnskabet for to byggematerialer sammenlignes igennem hele byggeriets livscyklus. Opgaven er rekvireret af Dansk Beton, Letbetonelementgruppen.

Der foretages sammenligning af typisk etplans enfamiliebolig svarende til energiberegningerne foretaget i Ref. 1 (se referenceliste nedenfor). Beregninger af energiforbruget til opvarmning iht. det nye bygningsreglement blev udført i regi af Produktområdeprojektet vedr. Betonprodukter, 2004-2006. Disse beregninger er suppleret med CO₂-udledningstal i forbindelse med produktion af byggematerialer og opførelsen af boligen i nærværende notat.

Der er foretaget beregninger af forskellen i CO₂-udledning pr. etageareal svarende til følgende to opbygninger af bagmur og indvendige skillevægge:

1. Ekstra lette vægkonstruktioner svarende til en opbygning af gipsplader på træskelet, som følger.
De indvendige skillevægge består af 45x70 mm trælægter pr. 600 mm, hvorpå der er monteret to lag 13 mm gipsplade på begge sider. Skillevæggene har desuden en kerne af mineraluld. Den totale tykkelse af lette skillevægge er dermed 120 mm. Bagmuren er opbygget af 45x195 mm træstolper placeret pr. 600 mm. Indvendigt er bagmuren beklædt med to lag gipsplader og desuden et lag gips ud imod ydermuren (vindgips). Dertil kommer en dampspærremembran. Isoleringen i bagmuren medtages ikke, da den forudsættes identisk med den tilsvarende hulmursisolering i letbetonkonstruktionen.
2. Middeltunge vægkonstruktioner svarende til letbetonelementer i 100 mm tykkelse udført i letklinkerbeton type LAC 10/1850. Såvel bagmur som indvendige skillevægge er udført i samme materiale og 100 mm tykkelse.

Der vurderes kun på forskellene imellem de to materialevalg, og derfor medtages ikke terrændæk, formur, lofter, tagkonstruktion, isolering af klimaskærm, gulve, vinduer og døre samt alle installationer. Disse elementer forudsættes identiske for de to beregningstilfælde. Der er heller ikke medtaget bidrag fra vedligeholdelse og ombygninger i boligens levetid.

Byggeri, Beton

Notat

Dansk Beton
Letbetonelementgruppen

28. august 2007
CLN/MEG

2. Beregningsgrundlag

Der er lagt følgende referencer til grund for beregningerne:

1. Teknologisk Institut, Beton, ”Varmeakkumulering i beton”, Miljøstyrelsens Arbejdsrapport nr. 19, 2007.
2. Arup, ”A lifecycle analysis of carbon dioxide emissions from housing under climate change examining the role of thermal mass”, The Concrete Centre, London, Juni 2006.
3. ”Håndbog i miljørigtig projektering”, BPS publikation nr. 121, 1998.
4. Glavind & Riis, ”Indsamling af miljødata i letklinkerbetons livscyklus”, Teknologisk Institut, 1999.
5. Kjellsen, Guimaraes & Nilsson, ”The CO₂ balance of concrete in a life-cycle perspective”, Teknologisk Institut, 2005.

Reference 1 omfatter beregninger af energibehovet til opvarmning/afkøling i driftssituationen i henhold til det nye Bygningsreglement fra 2006. Beregningerne er foretaget vha. SBI's beregningsværktøj Be06. Dette beregningsprogram medtager den termiske inerti afhængigt af de anvendte byggematerialer svarende til 4 grupper spændende fra ekstra let, middel let, middel tung til ekstra tung. Baggrund og forudsætninger for beregningerne er givet i Ref. 1 samt i SBI-anvisning 213.

Reference 2 er en britisk undersøgelse, som medtager hele livscyklus for en typisk engelsk enfamiliebolig for en nystartet familie. Etagearealet er 66 m² fordelt på to etager. Beregningerne medtager desuden forudsigelser af global opvarmning samt vurderinger af fire forskellige materialevalg fra lette til tunge byggematerialer. De forskellige byggematerialers CO₂-udledninger (embodied CO₂ = ECO₂) er taget fra det britiske Institution of Structural Engineers og dækker naturligvis over engelske produktionsforhold. Reference 2 bruges som sammenligningsgrundlag for nærværende beregninger og til dels også som vurderingsgrundlag af de anvendte udledningstal.

Reference 3 indeholder danske tal for forskellige byggematerialers CO₂-udledninger for alle faser i livscyklus. Tallene har ganske vist et vist antal år på bagen, men de vurderes stadig brugbare til denne undersøgelse.

Reference 4 indeholder en beskrivelse af CO₂-udledninger tilknyttet delmaterialerne såvel som de færdige letklinkerbetonprodukter. Der er både givet data for vægge, dæk og blokke.

Reference 5 indeholder oplysninger omkring CO₂-optag som følge af betonens karbonatisering. Rapporten er en del af et nordisk projekt, som foregik i 2004-2005. Disse tal benyttes til at vurdere letbetonelementers CO₂-balance efter nedrivning og nedknusning.



Byggeri, Beton

Notat

Dansk Beton
Letbetonelementgruppen

28. august 2007
CLN/MEG

Nedenfor er de forskellige livscyklusfaser beskrevet:

Total CO ₂ =	ECO ₂ +	+ Energibehov · t +	+ Nedrivning
Fase nr.	1 + 2 + 3	4	5
Tidspunkt:	t = 0	0 ≤ t ≤ t _{service}	t > t _{service}
	Udledninger associe- ret med råstofudvin- ding, oparbejdning til byggematerialer, pro- duktion af byggemate- rialer og opførelse af byggeri.	Energi til opvarm- ning, ventilation og afkøling i byggeriets driftsperiode. Der medtages ikke vedli- gehold og reparatio- ner på bygningsdele, da de antages ens for de to materialevalg.	Energiforbrug til ned- rivning, knusning, sortering, deponering, bortkørsel. Karbonatisering af nedknust beton.

hvor

- t_{service} = levetid for bygningen. Er sat lig 70 år i beregningerne.
CO₂ = CO₂-udledning beregnet som kg pr. m² etageareal.
ECO₂ = CO₂-udledninger i forbindelse med fremstilling af byggematerialer og indbygning i færdigt byggeri, inkl. transportbidrag.

I de følgende afsnit er CO₂-tallene for hver fase behandlet.

3. Beregninger af ECO₂ – fase 1-3

I nedenstående tabel 1 er ECO₂ beregnet pr. m² væg. For de lette byggematerialer er der ganske stor variation på de værdier for CO₂-udledninger, som findes i litteraturen. Derfor er det valgt at regne med nedre og øvre værdier for træ og gipsplader samt isolering i skillevæggene.

ECO₂-data for betonkonstruktioner er vurderet at være mere veldefinerede, og derfor regnes der kun med en værdi i det følgende. Denne kan opfattes som en middelværdi.

Byggeri, Beton

Notat

Dansk Beton
Letbetonelementgruppen

28. august 2007
CLN/MEG

Tabel 1 – Beregningsdata for ECO₂ opgjort pr. m² vægareal.

	A	B	C = A*B	
Materiale	$\frac{kg \text{ materiale}}{m^2 \text{ væg}}$	$\frac{kg \text{ CO}_2}{kg \text{ materiale}}$	$\frac{kg \text{ CO}_2}{m^2 \text{ væg}}$	Datakilde for CO ₂
Middeltung bagmur ^a , 100 mm LAC 10/1850	185	0,18	33	Ref. 4 (inkl. ca. 3 kg stål pr. m ²)
Let bagmur, træskelet, 45x195 mm pr. 600 mm ^b	12	0,2 ^c – 0,6	2,4 – 7,2	Nedre grænse fra Ref. 3. Øvre grænse ligger 50 % over Ref. 2.
3 lag 13 mm gips à 9 kg/m ²	27	0,18 – 0,3	4,9 – 8,1	Nedre grænse fra Ref. 2. Øvre grænse fra Ref. 3.
0,2 mm dampspærre (PVC) med densitet 1100 kg/m ³	0,2	3,2	0,7	Ref. 3.
I alt, let bagmur	ca. 39	-	8 – 16	-
Let skillevæg, træskelet, 45x70 mm pr. 600 mm ^b	5	0,2 – 0,6	1 – 3	Se ovenfor.
4 lag 13 mm gips à 9 kg/m ²	36	0,18 – 0,3	6,5 – 10,8	Se ovenfor.
70 mm mineraluld med densitet 30 kg/m ³	2,1	0,9 – 1,7	1,9 – 3,6	Ref. 3. Nedre og øvre grænse svarende til stenuld og glasuld, hhv.
I alt, let indvendig skillevæg	ca. 43	-	9 – 17	-

^a Bagmur og indvendig skillevæg er identisk udført i 100 mm letklinkerbeton helvægselementer.

^b Der er desuden medtaget en rem i væggen top og bund.

^c ECO₂ for konstruktionstræ varierer ekstremt meget i litteraturen. Ref. 3 angiver 0,1 kg CO₂ pr. m³ kg træ, hvilket giver 0,2 kg CO₂ pr. kg træ baseret på en densitet på 500 kg/m³. Denne værdi anvendes som nedre værdi. Ref. 2 angiver, at konstruktionstræ kan have CO₂-udledninger på op til 1,6 kg pr. kg træ, men dette vurderes meget højt, og en værdi på 0,4 kg/kg benyttes i Ref. 2. Det er på den baggrund valgt at anvende en værdi på 0,6 kg/kg som øvre værdi i nærværende beregninger.

Byggeri, Beton

Notat

Dansk Beton
Letbetonelementgruppen

28. august 2007
CLN/MEG

For at kunne relatere tallene i tabel 1, som gælder pr. m² vægareal, til boligens etageareal benyttes følgende sammenhænge for referenceboligen på 180 m² i Ref. 1. Nedenstående skitse (Fig. 1) viser boligens grundplan til orientering. Boligens hoveddimensioner er ca. 9 m bredde og ca. 18 m længde. Dertil kommer en karnap i forbindelse med stuen.

- Areal af bagmur (eksklusiv åbninger) i forhold til etageareal er lig med $(111 \text{ m}^2)/(180 \text{ m}^2) = 0,6$.
- Areal af indvendige skillevægge er lig 132 m² fratrukket 10 døråbninger, hvilket betyder, at forholdet for skillevæggene er lig $(109 \text{ m}^2)/(180 \text{ m}^2) = 0,6$. Dvs. stort set identisk forhold som for bagmuren.

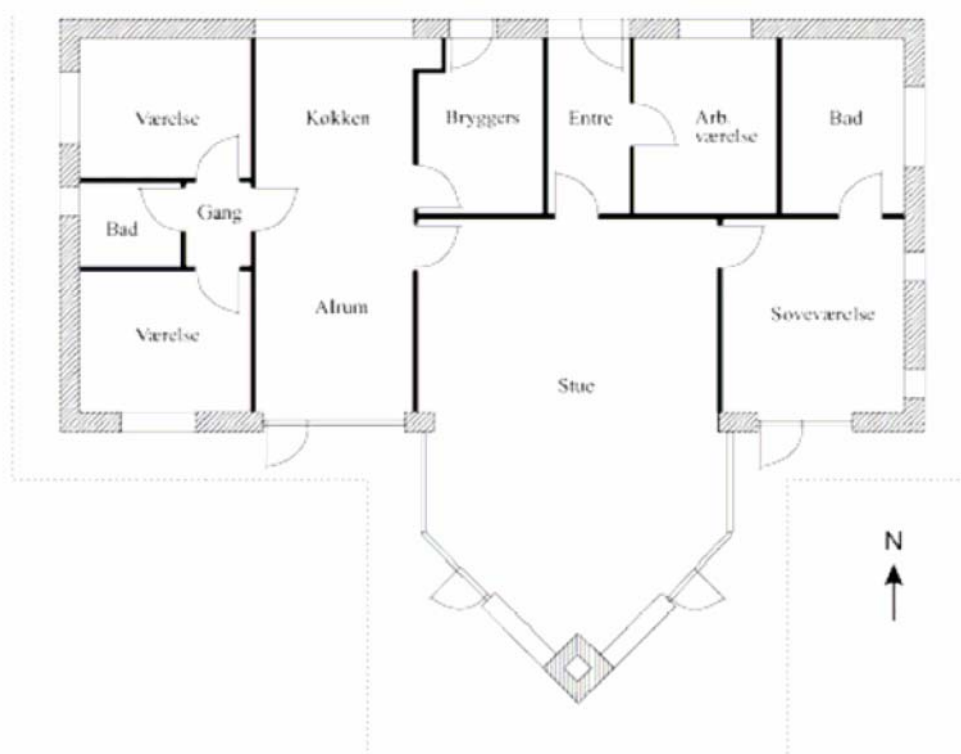


Fig. 1

Dette giver følgende resultat for ECO₂ angivet pr. m² etageareal, når tallene fra tabel 1 anvendes:

1. Ekstra let, nedre værdi $\text{ECO}_2 = 0,6 \cdot (8+9) \text{ kg CO}_2/\text{m}^2 = 10 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$
Ekstra let, øvre værdi $\text{ECO}_2 = 0,6 \cdot (16+17) \text{ kg CO}_2/\text{m}^2 = 20 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$
2. Middeltungt: $\text{ECO}_2 = 2 \cdot 0,6 \cdot 33 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2 = 40 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$

Byggeri, Beton Notat

Dansk Beton
Letbetonelementgruppen

28. august 2007
CLN/MEG

Når der udelukkende betragtes forskelle mellem de to løsninger ses det, at der opnås en CO₂-udledning pr. m² etageareal, som er 20 til 30 kg højere for det middeltunge materialevelag end for ekstra lette vægge. Denne forskel benyttes som startværdi i afsnit 6.

3.1 Vurdering af ECO₂ bidrag fra de enkelte delmaterialer

I Fig. 2 ses de enkelte ECO₂-bidrag til letklinkerbeton halvægge illustreret (Ref. 4). Søjlen repræsenterer udledningen på 33 kg CO₂ pr. m² væg, som blev benyttet i skemaet på foregående side. Cementproduktionen står for ca. 2/3 af det samlede udslip og fase 2, som omfatter aktiviteterne på elementfabrikken, står for knap 1/5. Den resterende del deles af de øvrige delmaterialer og montering på byggeplads.

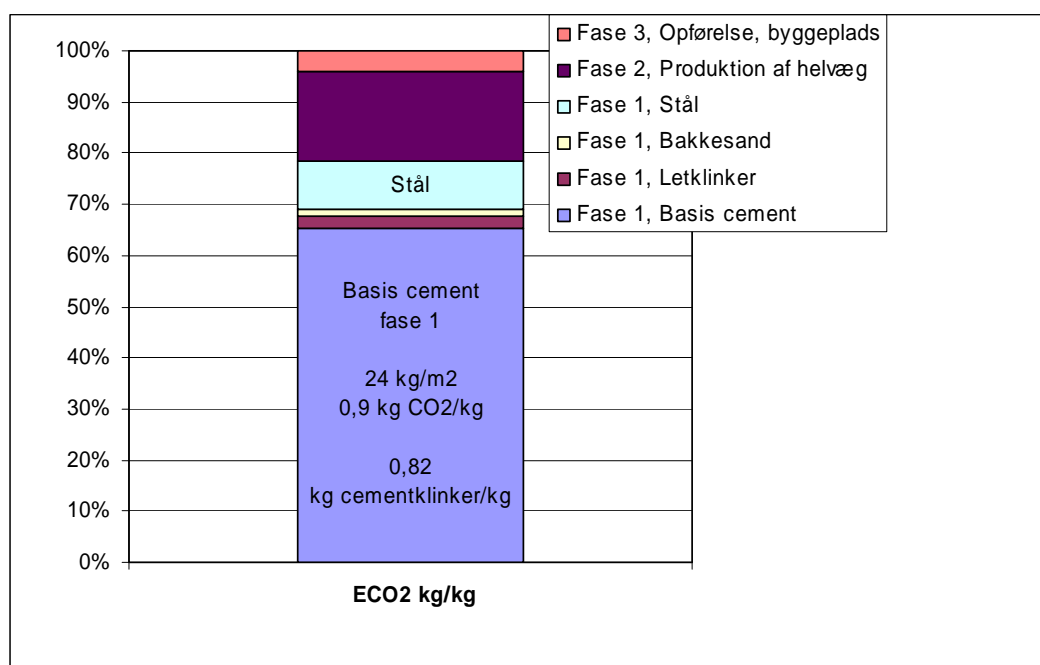


Fig. 2

Tallene i Ref. 4 er baseret på recept på LAC 10/1800 fra Ref. 4 bestående af Basis cement 236 kg/m³ – flyveaske 29 kg/m³ – letklinker 62 kg/m³ – bakkesand 1540 kg/m³. Set i forhold til en nutidig recept på LAC 10/1850 oplyst fra Expan A/S er der visse forskelle, men cementmængden varierer kun et par procent, så det vurderes ikke, at der er grund til at justere tallene.

I Fig. 3 er der tilsvarende lavet en opdeling af en let indvendig skillevæg. Det bemærkes, at gipspladerne står for ca. 70 % af udledningen i forbindelse med udvinding af råvarer og produktion af byggematerialer.

Byggeri, Beton Notat

Dansk Beton
Letbetonelementgruppen

28. august 2007
CLN/MEG

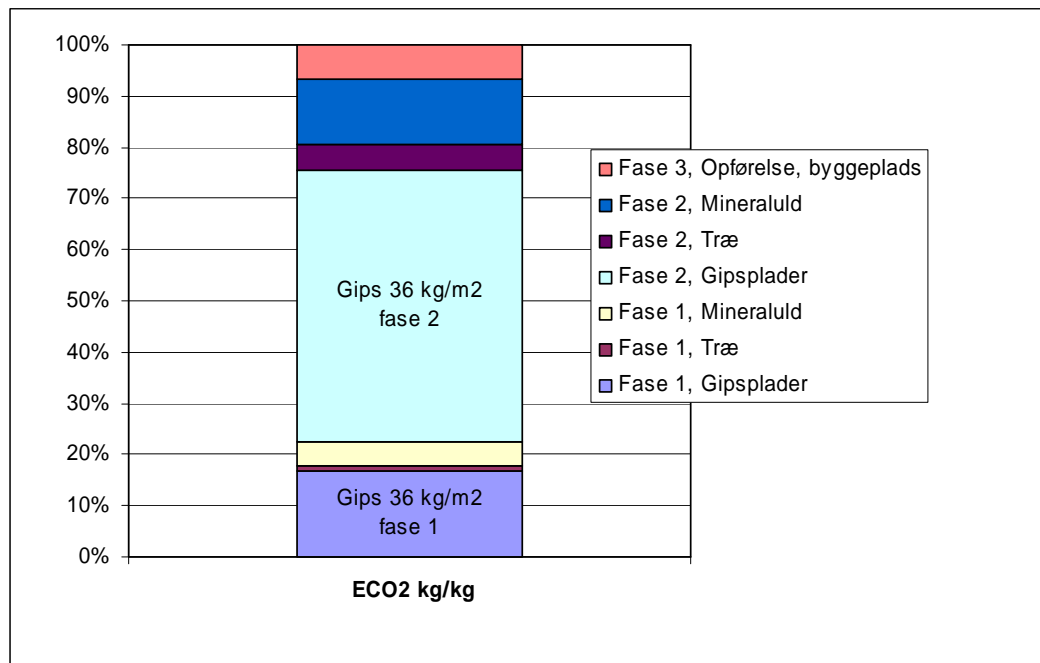


Fig. 3

Reference 2 indeholder en komplet beregning af ECO_2 på baggrund af engelske data. Et halvt dobbelthus i to etager med i alt 66 m^2 etageareal, dvs. betydeligt mindre end referenceboligen i Ref. 1. Beregningerne indeholder en letvægts- og en mellemvægtsmodel, som svarer stort set til de to typer, som er benyttet i nærværende beregninger. Mellemvægtsmodellen indeholder dog indvendige vægge opbygget af letklinkerblokke og etageadskillelse af huldæk. Fælleselementer er ydermuren, lofts- og tagkonstruktion (tegl), og der er også et betonterrændæk i alle tilfælde. Resultater af de engelske beregninger kan summeres til:

- Fælles elementer (terrændæk, ydermur, loft, tag, installationer, tæpper, døre og vinduer) $\text{ECO}_2 = 424 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$
- Tillæg for letvægtsmodel: $\text{ECO}_2 = 59 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$
- Tillæg for mellemvægtsmodel: $\text{ECO}_2 = 104 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$

Alt sammen opgjort pr. m^2 etageareal. Som det fremgår, bidrager fælleselementerne med mere end 4/5 af det samlede ECO_2 . Forskellen i ECO_2 mellem de to modeller er på $45 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$. Denne forskel er ganske vist højere end den, som blev beregnet i afsnit 3, men dog af samme størrelsesorden.

Byggeri, Beton Notat

Dansk Beton
Letbetonelementgruppen

28. august 2007
CLN/MEG

4. Beregninger af energibehov i driftsfasen – fase 4

Reference 1 indeholder beregningerne af energibehovet til opvarmning, ventilation og køling af enfamilieboligen beskrevet i forrige afsnit (Fig. 1). Energiberegningerne medtager ikke elektricitetsforbruget, idet dette ikke afhænger af de anvendte byggematerialer.

Resultaterne er gengivet i tabel 2 nedenfor, hvoraf det ses, at beregningsforudsætningerne spiller en stor rolle for energibehovet:

- Forceret ventilation betyder, at ventilationen øges fra det normale niveau, når temperaturen overskrider en vis tærskelværdi. Det vil være normalt i en bolig at medtage forceret ventilation svarende til, at vinduerne åbnes i varme perioder.
- Solindfaldet kan enten være middel eller stort svarende til hhv. aktiv solafskærmning (udvendige markiser o.l.) eller ingen solafskærmning. Det er normalt for danske boliger at benytte stort solindfald. Solindfaldet afhænger desuden af udhængsstørrelsen, orientering i forhold til verdenshjørnerne samt evt. skyggegive-re.

Tabel 2 – Opgørelse af energibehov pr. m² etageareal taget fra Ref. 1. Beregninger er udført vha. beregningstværværktøjet Be06, som medtager de varmebidrag og -tab, som er krævet i Bygningsreglementet. Beregningerne er baseret på danske klimadata.

Forceret ventilation?	Solindfald	kWh/m ² /år		
		Ekstra let træ og gips	Middeltungt letklinkerbeton	Forskel
Nej	Middel	97,7	91,8	5,9
Nej	Stort	98,4	91,5	6,9
Ja	Middel	90,5	87,2	3,3
Ja	Stort	91,3	82,1	9,2

Beregningerne i Ref. 1 viser generelt, at jo tungere byggematerialer der anvendes, jo mindre energibehov opnås der, alt andet lige. Dette skyldes bl.a. de tunge byggematerialers evne til at lagre energi (varme) og dermed udligne temperaturforskelle i løbet af døgnet. Om sommeren betyder dette, at overtemperaturer minimeres, og at der skal fjernes mindre overskudsvarme fra bygningen.

Forskellen mellem middeltungt og ekstra let byggeri varierer mellem 3,3 og 9,2 kWh/m²/år i førstnævntes favør, som det fremgår af tabel 2. Den mest normale situation med forceret ventilation og stort solindfald giver sig udslag i den største forskel, mens den mindste forskel optræder, når der anvendes udevendig solafskærmning (middel solindfald).

Hvis de to yderpunkter i forskel (3,3 og 9,2 kWh/m²/år) omregnes til CO₂-udledninger, fås hhv. 1,5 og 4,1 kg CO₂/m²/år. Omregning er foretaget svarende til en udledningsfaktor for dansk fjernvarme på 0,45 kg CO₂/kWh (Ref. 3).

Byggeri, Beton Notat

Dansk Beton
Letbetonelementgruppen

28. august 2007
CLN/MEG

5. Beregning af CO₂-balance under og efter nedrivning – fase 5

Cementproduktionen af Basis cement er opgjort til ca. 0,9 kg CO₂/kg i Ref. 4, hvilket er i rimelig overensstemmelse med nutidige værdier opgjort af Aalborg Portland A/S. Dette tal medtager udgravning og transport af råmaterialer samt cementproduktionen og transport af cement.

For Basis cement er cementklinkerindholdet ca. 0,82 kg pr. kg cement. Den resterende andel består af kalkfiller, gips, mv. Kalcineringsbidraget til CO₂-udledningen ligger på 0,55 kg CO₂ pr. kg cementklinker (Ref. 5). Det er dette tal, som er udgangspunktet for potentialet for CO₂-optag i forbindelse med karbonatisering efter nedrivning og nedknusning. Ifølge Ref. 5 er det praktisk muligt at genoptage op til 75 % af den mængde CO₂, som blev frigivet i forbindelse med kalcineringen i cementovnen. Dette giver følgende potentiale for CO₂-optagelse i letklinkerbeton LAC 10/1850 pr. m³:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2\text{-optag} &= \\ 0,75 * 240 \text{ kg cement/m}^3 * 0,82 \text{ kg/kg} * 0,55 \text{ kg CO}_2/\text{kg cementklinker} &= \\ 81 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3 & \end{aligned}$$

Det forudsættes, at denne genoptagelse af CO₂ foregår efter nedrivning og nedknusning. Den karbonatisering, som foregår i driftsperioden negligeres pga. tapet og malebehandling af væggene. Ydermere forudsættes det, at 90 % af alt betonaffald nedkneses, og dermed fås følgende CO₂-optagelse pr. m² letklinkerbeton helvæg:

$$\text{CO}_2\text{-optag} = 0,9 * 81 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3 * 0,1 \text{ m} = 7 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$$

Denne mængde CO₂ svarer til ca. 1/3 af cementbidraget i Fig. 2. Dette tal skal efterfølgende multipliceres med 0,6 m² væg pr. m² etageareal for både bagmur og indvendige skillevægge for at opnå en optagelse af CO₂ fra atmosfæren på knap 9 kg CO₂ pr. m² etageareal.

Selve nedrivningen af især de tunge byggematerialer koster energi og dermed CO₂. Reference 4 angiver, at der udledes 0,002 kg CO₂ pr. kg letklinkerbeton til nedrivningsarbejdet, hvilket kan omregnes til følgende pr. m² etageareal:

$$\text{CO}_2\text{-nedrivning} = 2 * 0,6 * 185 \text{ kg/m}^2 * 0,002 \text{ kg CO}_2/\text{kg} = 0,4 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$$

Som det ses, er denne mængde så beskeden set i forhold til de øvrige bidrag, at det er valgt ikke at medtage den i det følgende. Der medtages heller ikke nedrivningsbidrag fra de lette byggematerialer.

Byggeri, Beton Notat

Dansk Beton
Letbetonelementgruppen

28. august 2007
CLN/MEG

6. Samlet beregning i hele byggeriets livscyklus

Nedenfor ses CO₂-udledning pr. m² etageareal afbilledet i form af forskellen mellem ekstra let og middeltungt byggeri (Fig. 4). Kurverne starter i minus svarende til den forøgede ECO₂, som er indbygget i letklinkerbeton set i forhold til lette vægge (jf. afsnit 3). Dette forspring er på 20-30 kg CO₂/m².

Hældningen på de to kurver svarer til forskellene i energiforbrug til opvarmning, ventilation og afkøling pr. år (tabel 2). Området mellem de to kurver illustrerer den variation, der er i denne type beregninger og indflydelsen af beregningsforudsætningerne. Det ses, at der går fra ca. 5 til 20 år, inden de middeltunge byggematerialer opnår en bedre CO₂-balance end det lette byggeri. Derefter vil de middeltunge byggematerialer betyde en CO₂-besparelse set i forhold til de lette materialer.

Ved 70 år antages byggeriet at nå sin levetid, og beregningerne afsluttes. Der er angivet et spring i CO₂-forskellen svarende til 9 kg CO₂/m² (afsnit 5). Det efterfølgende vandrette plateau svarer til slutsituationen efter karbonatiseringen. Karbonatiseringen vil i virkeligheden ikke foregå momentant, sådan som det er skitseret i diagrammet, men vil typisk ske over en 5-10 års periode efter nedknusning.

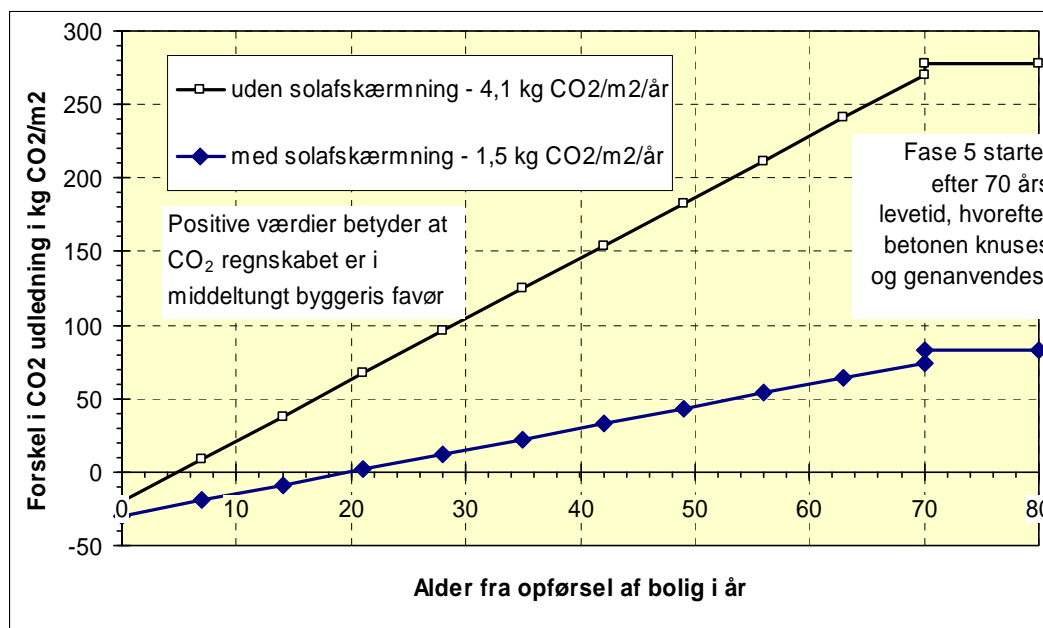


Fig. 4

Claus V. Nielsen & Mette Glavind
Teknologisk Institut, Beton