

# FutureBuilt ZERO metodebeskrivelse

Eirik Resch, Inger Andresen, Eivind Selvig, Marianne Wiik,  
Lars Gunnar Tellnes, Stein Stoknes

27. juni 2020

## Sammendrag

FutureBuilt ZERO introduserer kriterier for netto klimagassutslipp over hele byggets levetid. Kriteriene strammes gradvis inn over tid for å bidra til at Norge når sine klimamål. FutureBuilt ønsker å best mulig insentivere de valg som vil føre til lavest klimapåvirkning fra de mangfoldige aspektene ved bygninger. Det introduseres derfor en helhetlig metode som tar hensyn til utviklinger i utslipp over tid, og deres bidrag til global oppvarming. Både direkte og indirekte utslipp er med, fra energibruk i drift, fra materialfremstilling og transport av materialer til byggeplass, både under oppføring og for senere utskiftninger av materialer. Det er også med utslipp fra byggeplass, og fra avfallsforbrenning av utskiftninger og ved endt levetid. I tillegg tas effektene fra biogent karbonopptak, fra karbonatisering av sement, fra tilrettelegging for ombruk, og fra eksportert energi med. I dette dokumentet beskrives metoden, og prinsippene og logikken som ligger bak.

## Innhold

<b>1 Introduksjon til metoden</b>	<b>1</b>
1.1 Kriterienivå	1
1.2 Omfang	2
1.3 Avvergede og negative utslipp	3
1.4 Beregning	3
<b>2 Tidsavhengige effekter og utviklinger</b>	<b>4</b>
2.1 Tidsvektning	4
2.2 Teknologivektning	6
2.3 Biogent karbon	8
2.4 Karbonatisering i sementprodukter	10
2.5 Avfallsforbrenning	11
2.6 Ombrukbarhet	12
<b>A Vedlegg</b>	<b>14</b>
A.1 Kriterier	14
A.2 Faktorer	17
A.3 Fastsettelse av kriterier	18

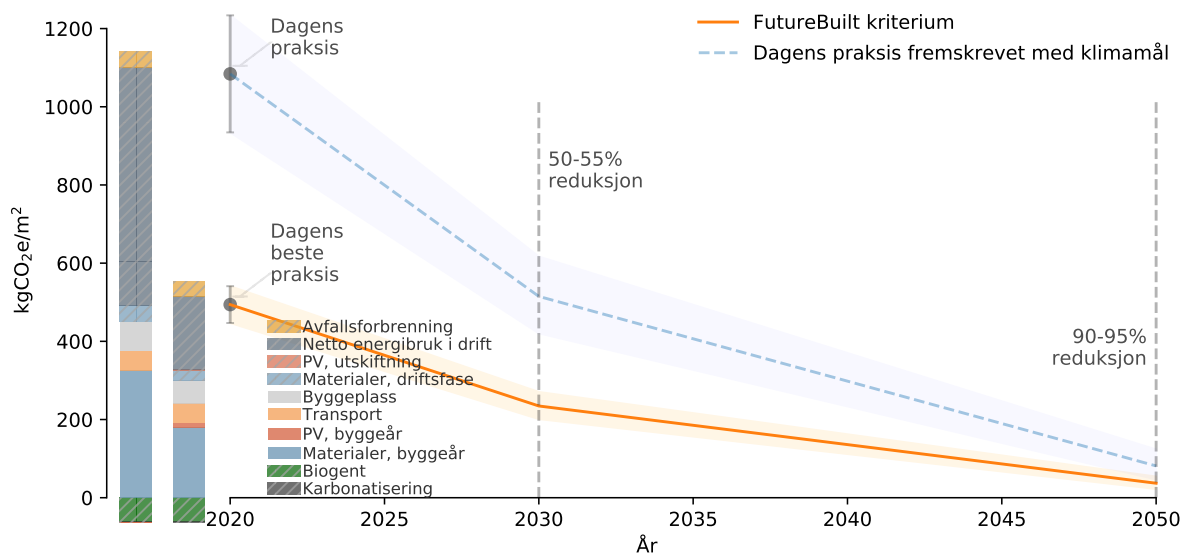
## 1 Introduksjon til metoden

### 1.1 Kriterienivå

FutureBuilt ZERO stiller kriterier for maksutslipp for bygningers totale bidrag til global oppvarming gjennom levetiden. Dagens klimagassutslipp må reduseres raskt for å nå de nasjonale klimamålene. Figur 1 viser både ‘dagens praksis’ og ‘dagens beste praksis’, fremskrevet med reduksjon iht. de nasjonale klimamålene. Startpunktet for FutureBuilt kriteriet er ‘dagens beste praksis’<sup>1</sup>, hvor utslippene er basert på et nesten-nullenergibygg der klimagassutslipp fra materialbruk tilsvarer nedre kvartil av erfaringstall fra innsamlede eksempelbygg [1, 2], og som

<sup>1</sup>Se appendix A.3 for detaljer rundt fastsetting av startverdier på kurvene.

har solceller på et areal som tilsvarer 10% av oppvarmet bruksareal (BRA). Klimagassutslipp fra transport av materialer, fra byggeplass, og fra avfallsforbrenning er basert på erfaringstall. Hovedkriteriet strammes inn hvert år slik at det oppnås 50-55% reduksjon i 2030 og 90-95% reduksjon i 2050 sammenlignet med 2020-nivået for ‘dagens beste praksis’. I tillegg stilles det separate kriterier til maksutslipp fra energibruk i drift og fra materialer. Figur 2 viser hoved-, material- og energikriteriene fra år 2020 frem mot 2050. Tallverdier er presentert i tabell A2. Maksutslipp materialer inkluderer alle utslippskilder utenom energibruk i drift.



Figur 1: FutureBuilt hovedkriterium for hvert år frem mot 2050. Klimagassutslipp for ‘dagens praksis’ og ‘dagens beste praksis’, med fremskrivninger basert på klimamål. For startverdiene vises også et 95% usikkerhetsintervall, som er fremskrevet på lik måte. I søylene er fremtidige utslipp er skravert.

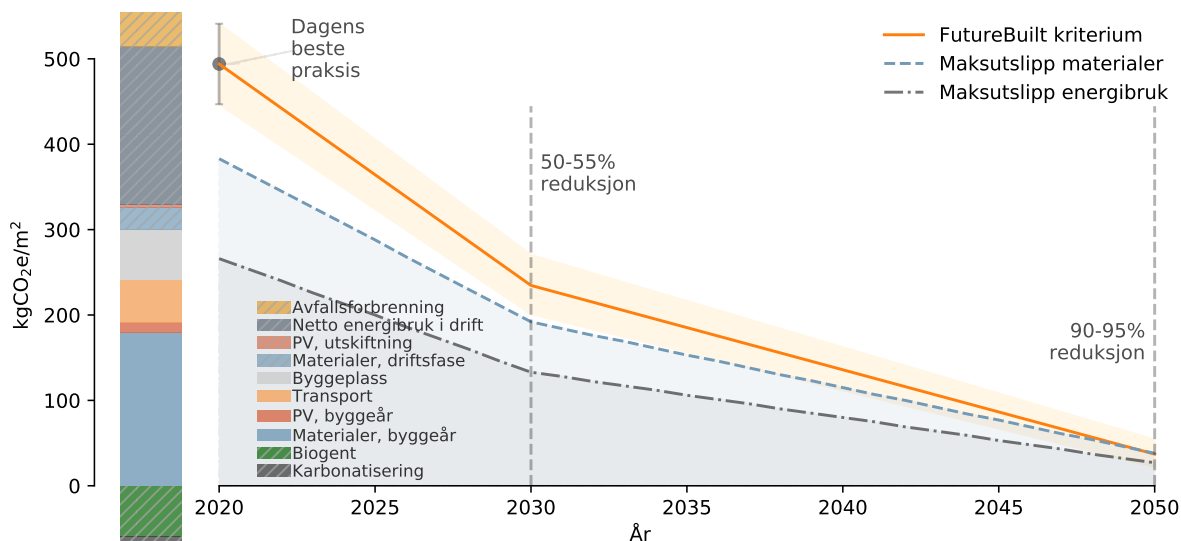
## 1.2 Omfang

Hovedkriteriet omfatter klimagassutslipp relatert til energibruk i drift ( $B_6$ )<sup>2</sup>, produksjon av bygningsmaterialer, inkl. energiproduserende materialer ( $A_{1-3}$ ), transport av materialer til byggeplass ( $A_4$ ), materialsvinn og energibruk på byggeplass ( $A_5$ ), og fremtidige utskiftninger av materialer ( $B_{2-5}$ )<sup>3</sup>. I tillegg kan avvergede og negative utslipp komme til fratrekk i regnskapet. Blant annet skal effekter av biogen karbonbinding i skog, og effekter av karbonbinding i sementprodukter slik som betong medregnes. Fremtidige utslipp fra avfallsforbrenning er også med, og det kan regnes inn effekten av tilrettelegging for fremtidig ombruk av bygningsmaterialer for å unngå forbrenning og for å substituere fremtidig produksjon. Bygningsmaterialene som skal tas med i regnskapet for kriteriet er de som inngår i bygningselementene 21-29 (selve bygget), og 49 (energiproduserende systemer), og dette følger dermed NS3720 basis. Det skal likevel dokumenteres utslipp fra alle bygningsdeler, selv de som er utenfor kriteriet<sup>4</sup>. Flere bygningsdeler vil bli inkludert i kriteriet etter hvert som erfaringstall foreligger. Byggets levetid skal settes til 60 år. Det tas i metoden hensyn til en forventet teknologitviking, som vil føre til lavere utslipp fra fremtidige utskiftninger av materialer, fra transport, og fra fremtidig energibruk. Alle utslipp og opptak skal vektet etter hvor langt frem i tid de skjer, da tidspunktet for utslippene er essensielt for å nå klimamålene.

<sup>2</sup>Klimagassutslippene deles inn i livsløpsmodulene A-D, og nummererte undermoduler, etter standarden NS-EN 15978 [3], som også brukes i NS 3720 ‘Metode for klimagassberegninger for bygninger’ [4].

<sup>3</sup>I praksis er det vanskelig å skille  $B_2$ ,  $B_3$ ,  $B_4$ , og  $B_5$ , disse kan derfor rapporteres samlet. Ofte betegnes denne modulen som kun  $B_4$ ; nytt her er at vi også inkluderer de  $B_2$ ,  $B_3$ , og  $B_5$ .

<sup>4</sup>Inklusive minimum fem tekniske komponenter.



Figur 2: Klimagassutslipp for 'dagens beste praksis', og fremskrivninger basert på klimamål. Dagens beste praksis er utgangspunktet for FutureBuilt ZERO hovedkriteriet, som gradvis blir strammet inn. For startverdien vises også et 95% usikkerhetsintervall, som er fremskrevet på lik måte. I tillegg vises separate kriterier for materialbruk og for energibruk i drift. I søylene er fremtidige utslipp er skravert.

### 1.3 Avvergede og negative utslipp

Avvergede og negative utslipp skal også medregnes, og kan kompensere for forårsakede klimagassutslipp. De avvergede utslippene er tilknyttet eksport av lokalt produsert energi, som da vil erstatte tilsvarende mengde energi fra energinettet ( $D_{\text{energi}}$ ), og avvergede utslipp som resultat av at det er lagt til rette for at bygningsdeler og materialer kan ombrukes ( $D_{\text{ombruk}}$ ). De negative utslippene er relatert til opptak av karbon i ny trevekst som følge av bruk av bærekraftig høstet trevirke, og binding av karbon i sementprodukter som betong.

### 1.4 Beregning

Metoden følger i hovedsak NS 3720 'Metode for klimagassberegninger for bygninger', men introduserer flere tilleggskonsepter. I hovedsak handler forskjellen om å vektlegge utslipp iht. det tidspunkt de skjer. Fremtidig teknologiutvikling blir hensyntatt av *teknologifaktorer*, og det blir lagt mer vekt på utslipp som skjer i dag enn utslipp som skjer langt frem i tid gjennom bruk av *tidsfaktorer*. Utslipp, positive og negative, fra karbonopptak i skog ved bruk av trevirke, karbonopptak i sementprodukter gjennom karbonatisering, avfallsforbrenning og ombrukbarhet, er alle inkludert ved bruk av faktorer som forenkler beregningene betraktelig. I tillegg er utslippsintensiteter for energibruk i drift (for elektrisitet og fjernvarme) oppgitt for alle fremtidige år. I praksis utføres klimagassberegningene på normal måte, for så å blir vektet med *totalfaktorene* gitt i tabell 1. Disse totalfaktorene inneholder både teknologivekting, tidsvekting, og andre relevante effekter, og samler dermed flere viktige effekter i ett tall. Hensikten er å gjøre det enkelt å oppnå en helhetlig vurdering av byggets innvirkning på global oppvarming, og å best mulig bidra til å at klimamålene nås.

Følgende formel viser hva som er med i regnskapet, og hvilke deler som teknologivektes og tidsvektes. Teknologifaktorer og tidsfaktorer er beskrevet i kapittel 2, og oppsummert i tabell 1

sammen med totalfaktorene.

$$E_{\text{tot}} = E_{A_{1-3}} + E_{A_4} + E_{A_5} \tag{1}$$

$$+ \underbrace{E_{B_{2-5}} + E_{B_6} + E_{D_{\text{energi}}} + E_{B,C_{\text{forbr.}}} + E_{D_{\text{ombruk}}}}_{\text{teknologivektes}} + E_{B_{\text{biog.}}} + E_{B_{\text{karb.}}}$$

$$\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{tidsvektes}}$$

## 2 Tidsavhengige effekter og utviklinger

For å oppnå de nasjonale klimamålene om å begrense den globale oppvarmingen vil tidspunktet for utslipp og opptak av klimagasser være avgjørende; det vil være fordelsmessig å utsette utslipp så lenge som mulig. Alle utslipp og opptak vektes derfor etter hvor langt frem i tid de skjer. I løpet av den lange levetiden til bygninger er det en rekke tidsavhengige effekter og utviklinger som har innflytelse på byggets klimapåvirkning: Teknologiutvikling vil føre til lavere påvirkning fra materialer som produseres frem i tid, og dermed gi lavere utslipp for produksjon av materialer som skiftes ut i fremtiden. Teknologiutvikling vil også føre til lavere utslippsintensitet fra elektrisitet, både fra nett og egenprodusert, så vel som fra annen energi som anvendes i bygget. Anvendelse av treprodukter fører til tilvekst av ny skog og dermed karbonopptak gjennom fotosyntese, og vil samtidig føre til midlertidig karbonlagring i bygningens treprodukter. Eksponert betong fører til opptak og binding av karbon. Organiske produkter slik som tre og plast inneholder karbon, som blir midlertidig lagret i bygningen, og utsetter derfor utslipp fra forbrenning. Tilrettelegging for ombruk kan føre til at materialer i bygningen kan erstatte fremtidig produksjon av tilsvarende produkter. Det vil også være mulig å forhindre at utslipp fra avfallsforbrenning slippes ut i atmosfæren etter hvert som teknologi for karbonfangst utvikles.

Alle disse effektene skjer over en tidshorisont på byggets levetid, men utslipp som skjer i dag vil innen 2050 ha lengre tid på seg til å varme opp atmosfæren enn utslipp som skjer frem i tid. I FutureBuilt ZERO introduseres en rekke faktorer for å justere de tradisjonelle klimagassutslippsberegningene, slik at det tas hensyn til disse effektene. Metoden er betraktelig forenklet med mål om å gjøre anvendelsen enkel. Tabell 1 viser utslippsposter og faktorer for teknologi- og tidsvekting. Det er kun totalfaktorer som skal brukes i klimagassberegningene. Prinsippet, grunnlaget, og logikken bak faktorene beskrives her.

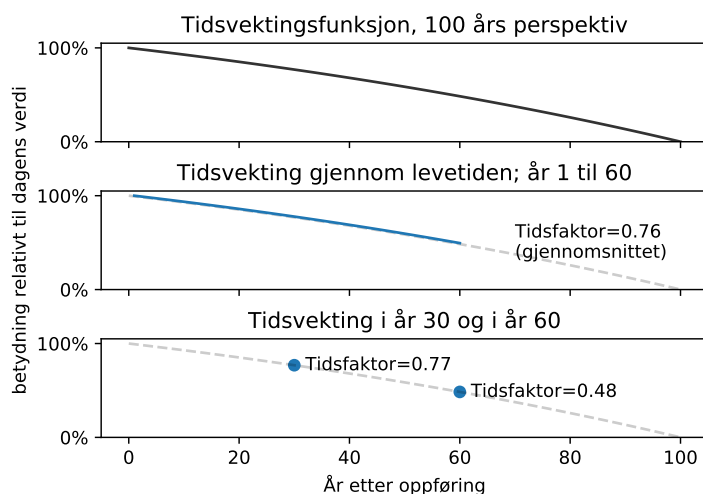
Tabell 1: Utslippsposter og faktorer. Det er kun totalfaktoren som skal brukes i beregninger.

	Modul	År for utslipp	Teknologi	Tid	Totalfaktor
Oppføring av bygg	A <sub>1-5</sub>	0	1	1	1
Utskiftning av materialer	B <sub>2-5,21-29</sub>	1-60	0.75	0.76	0.57
Utskiftning av PV	B <sub>2-5,49</sub>	30	0.33	0.77	0.25
Karbonopptak i sement	B <sub>2-5</sub>	1-60	1	0.83	-0.06
Karbonopptak i skog	B <sub>2-5</sub>	1-60	1	0.83	-1.27
Avfallsforbrenning, utskiftn.	B <sub>2-5</sub>	1-60	0.5	0.76	0.22
Avfallsforbrenning, slutfase	C <sub>3</sub>	60	0.1	0.48	0.18
Ombruk	D <sub>ombruk</sub>	1-60	0.75	0.76	-0.1
Energibruk i drift	B <sub>6</sub> , D <sub>energi</sub>	1-60	tab. A3&A4	0.76	tab. A3&A4

### 2.1 Tidsvekting

FutureBuilt ønsker å bidra til at klimamålene nås, og da vil tidspunkt for utslipp være avgjørende. Klimagasser varmer opp atmosfæren over tid, og jo lenger tid de er i atmosfæren jo mer oppvarming. I et uendelig tidsperspektiv vil effekten av å utsette utslipp jevnes ut, men i den begrensede tiden frem mot målene vil tidspunktet være av betydning. Alle fremtidige utslipp skal derfor vektes avhengig av hvilket år utslippene skjer. Dette gjelder positive, så vel som

negative og avveggede utslipp, og også de som allerede har blitt teknologivektet. Figur 3 viser tidsvektingsfunksjon og beregning av tidsfaktorer. Totale utslipp for gjeldende utslippsmoduler vektet med tidsvektingsfaktorene presentert i tabell 1.



Figur 3: Tidsvektingsfunksjon (øverst), beregning av gjennomsnittsfaktor (midten), og verdien i utvalgte år frem i tid (nederst).

Under utformingen og oppføringen av et bygg er det vanskelig å ta hensyn til utslipp som skjer tiår frem i tid og helt til langt etter vår levetid; vi må fokusere på utslipp vi kan gjøre noe med nå. Utslipp som skjer frem i tid vil i et 100 års perspektiv ha kortere tid på seg til å varme opp atmosfæren enn utslipp som skjer i dag. Den avtagende betydningen av utslipp beskrives her av funksjonen  $2 - e^{-0.00693t}$  (øverst i figur 3), som gradvis gir fremtidige utslipp mindre betydning basert på oppvarmingspotensialet i perioden, og ender til slutt opp på null etter 100 år.<sup>5</sup> For produkter med lang levetid der utslippene skjer over mange år, slik som bygninger, er det metodisk inkonsekvent å ikke ta hensyn til disse tidsaspektene, da indikatoren  $GWP_{100}$  allerede har tidsaspektet innbakt for andre klimagasser enn karbondioksid. Dette er godt beskrevet i artikkelen [5], som metoden her er bygget på. Klimagasser vil gradvis brytes ned i atmosfæren, og har derfor gradvis avtakende oppvarmingspotensial. Funksjonen anvendt her tar hensyn til dette.

Med antakelse om at utslippene/opptaket skjer jevnt over levetiden, fra år 1-60, kan en anvende gjennomsnittet av denne kurven til å vekte totalen over denne perioden. En får da en tidsfaktor  $f_{tid, \text{år } 1-60}$  som ganges med totalen. Å anvende denne gjennomsnittsfaktoren er en forenkling, siden utslipp/opptak i virkeligheten ikke skjer helt jevnt over levetiden. For høyere presisjon kan en anvende en gjennomsnittsfaktor som er vektet med tidspunkt og størrelse på de enkelte utslipp/opptak (se [6] for detaljer). For de fleste formål vil likevel gjennomsnittsfaktoren være tilstrekkelig nøyaktig<sup>6</sup>. For utslipp som ikke skjer over en periode, men som skjer i enkeltår, kan en anvende faktoren for det spesifikke året. Faktorene for år 30 (utskifting av solcellesystemer) og år 60 (avfallshåndtering) er presentert under, sammen med gjennomsnitts-

<sup>5</sup>Funksjonen er basert på den dynamiske LCA metoden presentert i [5], etter indikatoren Global Warming Potential 100,  $GWP_{100}$ . Denne funksjonen er en forenklet analytisk tilnærming til metoden i artikkelen: funksjonen har blitt manuelt tilpasset etter numeriske resultatverdier beregnet med metoden fra artikkelen.

<sup>6</sup>Siden teknologiutviklingen fører til lavere fremtidige utslipp, vil ikke utslippene skje jevnt over levetiden, de vil avta. Det blir her ignorert at tidsfaktoren er en funksjon av teknologifaktoren. Bruk av den mer nøyaktige, årlige tidsvektingen vil derfor føre til en tidsvektingsfaktor som ligger  $\sim 3-18\%$  høyere enn de oppgitte gjennomsnittsfaktorene.

faktoren.

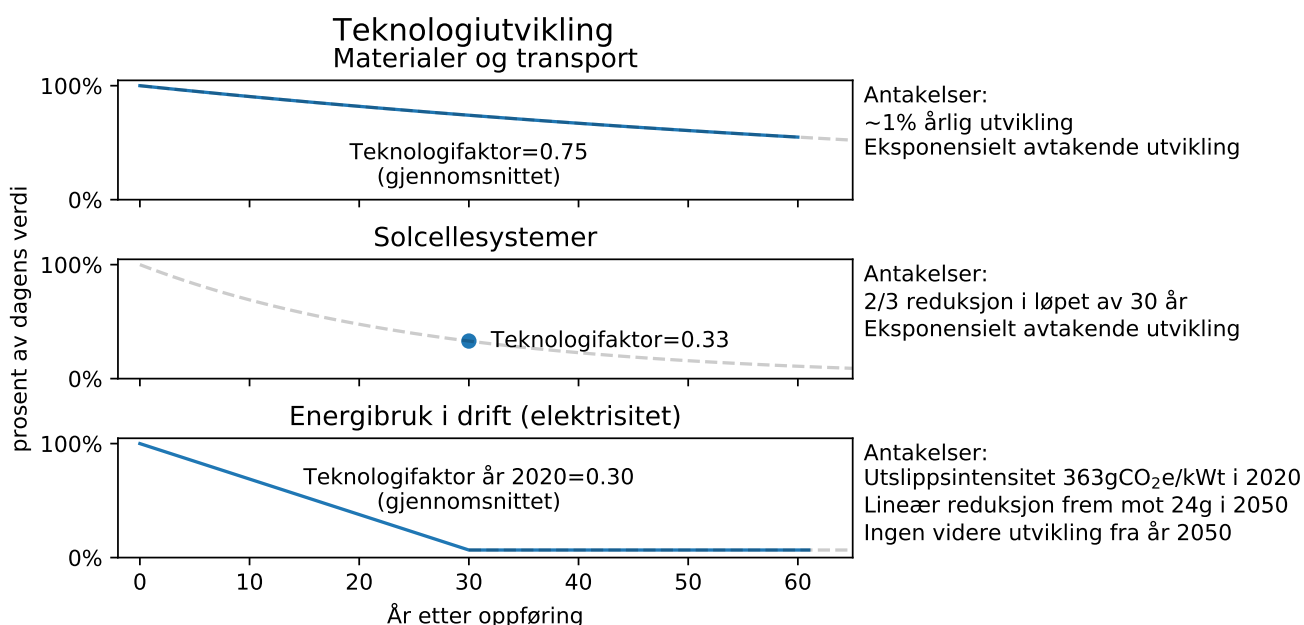
$$f_{\text{tid, år 1-60}} = \frac{1}{60} \sum_{t=1}^{60} [2 - e^{-0.00693t}] = 0.76 \quad (2)$$

$$f_{\text{tid, år 30}} = 2 - e^{-0.00693 \cdot 30} = 0.77 \quad (3)$$

$$f_{\text{tid, år 60}} = 2 - e^{-0.00693 \cdot 60} = 0.48 \quad (4)$$

## 2.2 Teknologivekting

Over tid kan det forventes en reduksjon av utslipp relatert til produksjon av materialer på grunn av teknologiske utviklinger i materialteknologi, produksjonsteknologi, gjenvinningsrate, transportteknologi, og elektrifiseringen av disse prosessene sammen med en dekarbonisering av energinettet. Fremtidige utslipp fra materialproduksjon skal derfor vektet avhengig av hvilket år byggevaren skiftes ut. Utviklingen i utslippsintensitet fra materialproduksjon vil avhenge av materialkategori, men det er her gjort en forenkling basert på historisk utvikling i norsk industri som har ligget på omtrent 1% årlig forbedring [7]. Denne utviklingen anvendes for alle bygningsmaterialer, med unntak av energiproduserende utstyr hvor reduksjonen kan antas å være større, og kan tillegges 2/3 reduksjon før utskiftning skjer etter 30 år. Det anvendes også 1% årlig teknologit utvikling for transport. Figur 4 viser antatt teknologit utvikling og beregning av teknologifaktorer. Totale utslipp vektet med disse teknologifaktorene, som også er presentert i tabell 1.



Figur 4: Teknologivekting for materialproduksjon, transport, solcellesystemer, og for elektrisitet.

Fremtidige utslipp fra energibruk vektet med teknologifaktor for energi, som i takt med Europeiske målsetninger endres frem mot 2050. Utviklingen i utslippsintensitet for energibruk i drift avhenger av energikilde. For elektrisitet er det antatt lineær reduksjon fra dagens verdi frem mot 2050, som forblir uendret deretter<sup>7</sup>. Utslippsfaktorer, teknologifaktorer, og gjennomsnittlige utslippsfaktorer for elektrisitet fra nett for hvert år frem mot 2050 er å finne i tabell A3. For fjernvarme, se eget avsnitt.

På lik linje med tidsvekting antas det at utslippene skjer jevnt over levetiden, og det benyttes derfor gjennomsnittsfaktorer for år 1-60; dette er for å forenkle anvendelse av metoden, og vil

<sup>7</sup>Tilsvarende scenario 2 (EU28+NO) i NS 3720 [4], som er en justert versjon av "ZEB-kurven".

være tilstrekkelig nøyaktig. Teknologifaktorene for byggematerialer og for solcellesystemer er beregnet slik

$$f_{\text{teknologi, materialer}} = \frac{1}{60} \sum_{t=1}^{60} e^{-0.01t} = 0.75 \quad (5)$$

$$f_{\text{teknologi, solcellesystemer}} = e^{-0.037 \cdot 30} = 0.33, \quad (6)$$

hvor de eksponentielt avtagende funksjonene sørger for at teknologifaktorene er de samme for alle fremtidige år. For elektrisitet derimot, endres teknologifaktoren fra år til år (siden funksjonen endres brått i år 2050, og er ikke-deriverbar). Teknologifaktor for elektrisitet beregnes slik

$$f_{\text{teknologi, elektrisitet}}(y) = \frac{\text{gj.snitt. utslippsintensitet fra år } y \text{ til } y+60}{\text{utslippsintensitet i år } y} \quad (7)$$

$$= \frac{\frac{1}{60} \sum_{t_0=y}^{y+60} \begin{cases} 363 - \frac{363-24}{30} \cdot t & , \text{ når } t \text{ er for år } < 2050 \\ 24 & , \text{ når } t \text{ er for år } \geq 2050 \end{cases}}{\begin{cases} 363 - \frac{363-24}{30} \cdot y & , \text{ når } y \text{ er for år } < 2050 \\ 24 & , \text{ når } y \text{ er for år } \geq 2050, \end{cases}}$$

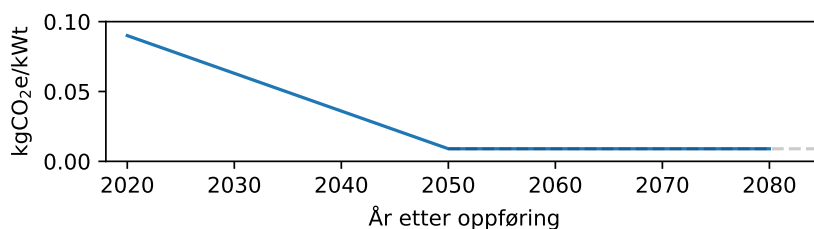
hvor  $y$  er byggeåret i antall år etter 2020. Under gjennomføring av klimagassberegningene behøver en ikke å eksplisitt benytte teknologifaktoren for elektrisitet (likning (7)), da det vil være mer naturlig å benytte seg direkte av den oppgitte gjennomsnittlige utslippsintensiteten for året bygget settes i drift (tabell A3). Denne har teknologifaktoren innbakt.<sup>8</sup> Denne fremstillingen av elektrisitetsfaktoren er likevel pedagogisk og metodisk viktig da den står parallelt med de andre teknologifaktorene.

### 2.2.1 Fjernvarme

For fjernvarme (FV) skal utslippsfaktor beregnes ut fra det konkrete FV-systemet man er tilknyttet. Det vil si at fordelingen av innfyrte energivarer som anvendes i varmeproduksjonen, distribusjonstapet fram til bygget, og systemvirkningsgraden internt i bygget, skal medregnes. Når avfall inngår som en energivare i FV-systemet skal det benyttes en utslippsfaktor på 0,09 kgCO<sub>2</sub>e/kWt per innfyrte avfall. Her er det benyttet en 50/50 allokering av utslipp til energigjenvinning/slutthåndtering av avfall. Faktoren er videre basert på Avfall Norge 2019 [8], som forutsetter ca. 20% plast i restavfallet som går til energigjenvinning frem til 2035 og konstant energiinnhold i avfallet på 11,5 GJ/tonn.

Det er forutsatt en forventet fremtidig teknologiutvikling for avfallsforbrenning gjennom karbonfangst, som fører til at kun 10% av utslippene ikke blir fanget opp og lagret i 2050, etter at generell gjenvinning, systemtap, prosessutslipp, allokering til energisektoren, og liknende hensyntas. Figur 5 viser denne utviklingen. Dette fører til årlige utslippsverdier gitt i tabell A4, fra den andelen energi som kommer fra avfallsforbrenning i fjernvarme. Deretter teknologivektes den årlige utslippsverdien for å ta hensyn til fortsatt teknologiutvikling, og en ender (etter tidsvekting) da opp med den vektete utslippsintensiteten, også gitt i tabell A4. Metoden for beregning av fjernvarmeverdiene er identisk som for elektrisitet, beskrevet i avsnitt 2.2 og likning 7. Det eneste som er endret er start og sluttverdiene for utslippsintensiteten, som for avfallsforbrenningsandelen i fjernvarme er hhv. 0.09 og 0.009 kgCO<sub>2</sub>e/kWt i 2020 og 2050.

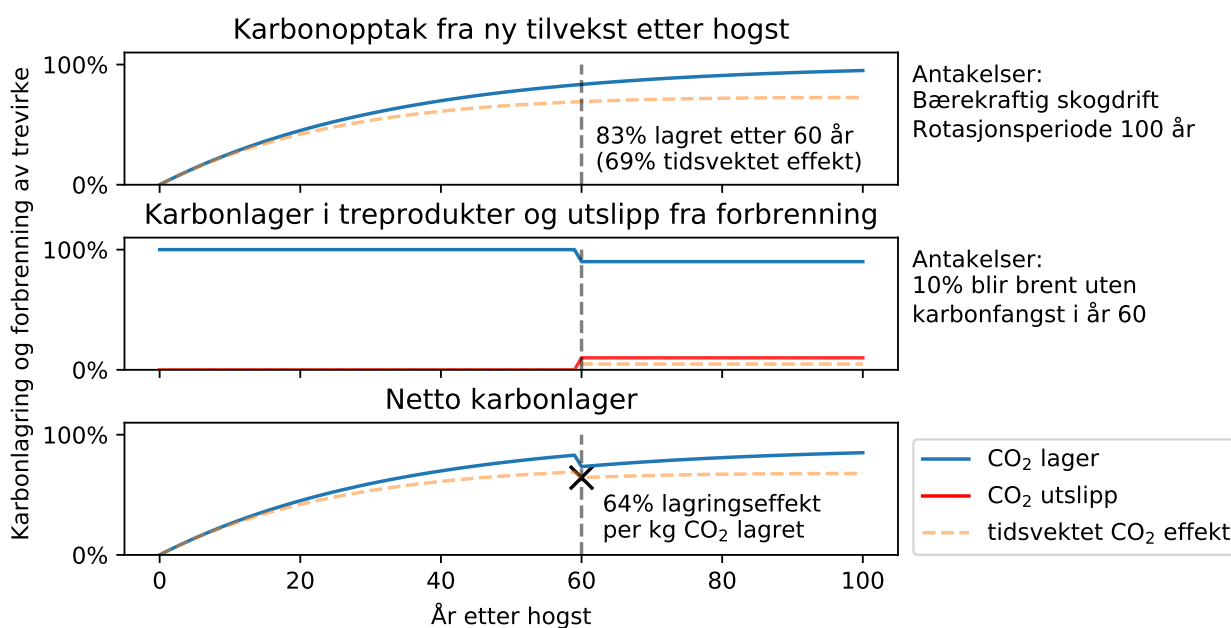
<sup>8</sup>Gjennomsnittlig utslippsintensitet over levetiden er ekvivalent med utslippsintensiteten i år  $y$  ganget med teknologifaktoren i år  $y$ .



Figur 5: Utviklingen i utslippsintensiteten fra avfallsforbrenningsandelen i fjernvarme.

## 2.3 Biogent karbon

Effekten av biogent karboninnhold er todelt. For det første fører tilvekst av ny skog til karbonopptak, i det nye trær vokser opp i området der de som er brukt i bygget ble kuttet ned. Dette karbonopptaket skjer i løpet av driftsfasen til bygningen. For det andre vil treproduktene i bygget avfallshåndteres ved endt levetid, og noe av karbonet lagret i produktene vil da oksideres og tilbakeføres til atmosfæren. Begge disse effektene og den samlede effekten er fremstilt i figur 6. For materialer med kortere levetid enn byggets vil utslipp fra forbrenning være høyere. Her beskrives disse prosessene og metoden som ligger til grunn.



Figur 6: Effekten av biogent karbon for et treprodukt som brennes etter 60 år.

### 2.3.1 Karbonopptak i skog

Under produksjon av byggevarer av tre hogges det ned skog. Så lenge skogdriften forvaltes bærekraftig vil nye trær vokse opp og erstatte hogst. Tilveksten av nye trær binder over tid CO<sub>2</sub> fra atmosfæren, som lagres som karbon, C, i trevirke. I løpet av levetiden til bygget vil dette karbonopptaket føre til negative utslipp, og denne karbonen lagres i de nyvokste trærne inntil de på nytt hogges. Hvor mye karbon som tas opp i tilveksten i løpet av levetiden til bygget er avhengig av mange faktorer, blant annet trærnes vekstfunksjon. Det vil også være av betydning når i byggets levetid opptaket skjer, og utslippene må derfor tidsvektes. Det antas her en forenklet vekstfunksjon lik  $1 - e^{-0.03t}$  (øverst i figur 6), hvor  $t$  er antall år etter hogst. Denne funksjonen er basert på en rotasjonsperiode på 100 år, som her antas å være representativ for



norsk gran [9]. Ved  $t = 100$ , den antatte rotasjonsperioden, har trærne nesten vokst tilbake til størrelsen de hadde ved hogst<sup>9</sup>. Ved slutten av byggets levetid vil 83% av mengden karbon lagret i byggevarene ( $f_{\text{karbonopptak 60 år}}$ ) være tatt opp i nye trær, siden bygningens levetid på 60 år er kortere enn rotasjonsperioden på 100 år<sup>10</sup>. Karboninnholdet  $f_{\text{karboninnhold}}$  varierer mellom treprodukter men ligger rundt  $\sim 50\%$  per tørrvekt, som er verdien som anvendes her. Når karbon oksideres og blir til karbondioksid øker også vekten på grunn av de to oksygenatomene, og hvert kg karbon blir til 3.67 kg karbondioksid. Totalfaktoren for biogent karbonopptak under tilvekst av trær blir da

$$\begin{aligned} f_{\text{biogent}} &= - f_{\text{karbonopptak 60 år}} \cdot f_{\text{karboninnhold}} \cdot 3.67 \cdot f_{\text{tid,1-60}} \\ &= - 0.83 \cdot 0.50 \cdot 3.67 \cdot 0.83 \\ &= - 1.27, \end{aligned} \quad [\text{kgCO}_2\text{kg}^{-1}] \quad (8)$$

som vil si at hvert kilogram trevirke i bygningen fører til opptak av 1.27 tidsvektede kilogram karbondioksid i løpet av byggets levetid. Her er tidsfaktoren beregnet basert på årene for opptak i vekstkurven.

Effekten av biogent karboninnhold, slik den er presentert her, gjelder kun for trevirke med opphav fra bærekraftig skogdrift. Det er en begrenset mengde tre tilgjengelig i verdens skoger, altså er det en ressursknapphet som må tas hensyn til. Det har under utvikling av metoden vært en bekymring at en kraftig nedkjølingseffekt i regnskapet for trevirke kan føre til mindre fokus på å redusere materialmengder, og dermed øke materialforbruk. Siden overforbruk er uønsket for en begrenset ressurs, er det i FutureBuilt ZERO kriterier mulig å oppnå **nøytral**, men ikke negativ klimaeffekt fra fremstilling og avfallsforbrenning av trevirke. Dette gjøres for å unngå feilinsentivering og for å unngå utilsiktede konsekvenser, slik at det ikke brukes mer materiale enn nødvendig. Nøytraliteten beregnes som netto effekt fra materialfremstilling og avfallshåndtering av treproduktet og det biogene opptaket. Altså kan summen av disse gå i null, men ikke bli negativ. I mange tilfeller vil dette føre til at trevirke kommer ut som klimanøytralt i produksjons og avfallshåndteringsfasen. Transportutslipp kan ikke kompenseres for med biogent opptak. Utslipp fra materialsvinn inngår ikke, da disse utslippene ikke vil ha effekten av midlertidig lagring. Dokumentert ombrukbarhet (avsnitt 2.6) vil fortsatt føre til fratrekk fra produksjonsutslippene.

### 2.3.2 Utslipp fra avfallshåndtering av treprodukter

Utslipp fra avfallsforbrenning er beskrevet i avsnitt 2.5, og skal medregnes for alle brennbare produkter, ikke bare trevirke. Det gis her en grundigere bakgrunn spesifikt til avfallsforbrenning av treprodukter.

Treprodukter i bygg lagrer karbon inntil de en gang i fremtiden avfallshåndteres. Det er mulighet for at noe av avfallet brennes, og den lagrede karbonen i treproduktet vil da oksideres og bli til CO<sub>2</sub> som slippes ut i atmosfæren. Treavfallet i Norge går i dag hovedsakelig til energigjenvinning, og fra 2020 vil EUs rammedirektiv stille krav om materialgjenvinning av treavfall fra bygge- og anleggsvirksomhet [10]. Altså vil det være rimelig å anta substitusjonseffekter for forbrenning av trevirke selv om det er uvisst hva som skjer med slikt avfall i fremtiden; det er i dag ikke mulig å si hvor stor andel som vil brennes, og det er en mulighet for at en slik eventuell forbrenning vil foregå med karbonfangst og lagring.

Biogent karbon lagret i treprodukter i bygningen blir først sluppet ut i atmosfæren igjen når treproduktet blir brent eller råtner en gang i fremtiden. I B-modulen skjer dette i verste fall i takt med utskiftningene, dvs. at de vektet med tidsfaktor for år 1-60. Dette er en konservativ implementering av lagringseffektene, da forbrenning sannsynligvis ikke skjer samtidig som

<sup>9</sup>Den nøyaktige verdien for den anvendte formelen er 95% av størrelsen de hadde ved hogst.

<sup>10</sup>Det er altså kun karbonopptaket gjennom byggets levetid som medregnes, på lik linje med alle andre utslippkilder. Hva som skjer med trærne etter endt levetid er dermed utenfor regnskapet.

utskiftningene, men heller senere, og forråtnelse også vil føre til delvis lagret karbon. I denne metoden er det sett bort ifra disse detaljene, og det antas her at trevirke brennes på lik linje med andre brennbare produkter i bygningen. Den totale vekten av treprodukter ganges med avfallsforbrenningsfaktorene for trevirke, beskrevet i avsnitt 2.5.

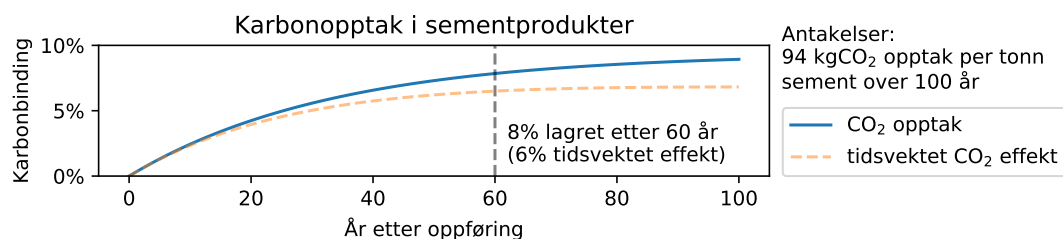
### 2.3.3 Forenklinger

Ved utvikling av denne forenklete beregningsmetoden har noen kompliserende faktorer ved fremstilling av trevirke blitt utelatt. Kun deler av treet ender i virkeligheten opp som byggevarer. Greiner og topper (GROT) blir ofte etterlatt i skogen. Ved skogdrift vil også betydelige deler av treet bli værende igjen i form av røtter under bakken. Karbon fra disse delene av treet går dels inn i jordsmonnets karbonlager og dels blir oksidert gjennom forråtnelsesprosesser og vil kunne gi utslipp fra skogbunn og jordsmonn. Oksidering av den biogene karbonen i restproduktene, altså i hvor stor grad den biogene karbonen går tilbake til atmosfæren i form av karbondioksid, er ikke med i metoden.

En annen effekt som ikke er hensyntatt er at skogsdrift kan øke albedoeffekten fra boreal skog (nordlige skoger). I litteraturen har det blitt vist varierende effekter, fra  $-0.18 \text{ kgCO}_2\text{e/kgCO}_{2,\text{lagret}}$  [9] og opp til positive tall; dette er derfor ikke hensyntatt her.

## 2.4 Karbonatisering i sementprodukter

Sementprodukter vil over tid binde karbondioksid fra luften; en prosess som kalles *karbonatisering*. Disse negative utslippene kan i løpet av byggets levetid kompensere for deler av utslippene fra produksjon av materialene. En forenklet modell for opptaket over en 100 års periode er fremstilt i figur 7. Her er det antatt et opptak  $94 \text{ kg CO}_2$  per tonn sement etter en brukstid på 100 år [11]. Det vil være mest opptak de første årene, og opptaket vil deretter avta eksponentielt. Den approksimerte funksjonen brukt her er  $0.094(1 - e^{-0.03t})$  per kg sement. Etter 25 år vil omtrent halvparten av opptaket som skjer over en 100 års periode ha funnet sted, hvorav kun det opptaket som skjer i årene som inngår i byggets levetid tillegges bygget. Tidsfaktoren er beregnet basert på årene for opptak i karbonopptakskurven frem til år 60. Videre vil det



Figur 7: Effekten av karbonatisering i sementprodukter.

kunne skje et forhøyet opptak om sementproduktet etter levetiden knuses opp og i høyere grad eksponeres for luft; denne effekten kan ikke tillegges bygget, men snarere den eventuelle videre bruken av materialene.

Mengden opptak i løpet av byggets levetid per kg sement er gitt av totalfaktoren

$$\begin{aligned}
 f_{\text{opptak år 1-60}} &= f_{\text{opptak per vekt 100 år}} \cdot f_{\% \text{ opptak 60 år}} \cdot f_{\text{tid, 1-60}} \\
 &= 0.094 \cdot 0.83 \cdot 0.83 \\
 &= 0.06, \qquad \qquad \qquad [\text{kgCO}_2\text{kg}^{-1}] \quad (9)
 \end{aligned}$$

hvor  $f_{\text{opptak per vekt 100 år}}$  er mengden karbonopptak per kg sement i en 100 års bruksfase, og  $f_{\% \text{ opptak 60 år}}$  er andelen av dette som tas opp de første 60 årene. Totalfaktoren ganges med

andelen sement i produktet  $f_{\% \text{ sement}}$

$$f_{\text{karb,B}} = f_{\% \text{ sement}} \cdot f_{\text{opptak år 1-60}}, \quad [\text{kgCO}_2\text{kg}^{-1}] \quad (10)$$

som gir karbonopptaket per kg betong eller annet sementprodukt i bygningen.

### 2.4.1 Faglig bakgrunn for karbonatisering

Karbonatisering er en kjemisk prosess som oppstår når en betongflate er i kontakt med luft. Luften diffunderer langsomt inn i betongen. Karbondioksid fra luften ( $\text{CO}_2$ ) og vann ( $\text{H}_2\text{O}$ ) reagerer kjemisk med kalsiumhydroksid i betongen ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), slik at det dannes kalsiumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ).

Karbonatiseringsdybden kan beskrives av en versjon av Fick's lov, som  $x_{\text{CO}_2} = k\sqrt{t}$ , der  $k$  er en karboniseringsfaktor avhengig av ulike material- og miljøfaktorer, og  $t$  er tid.

Karboniseringshastigheten er avhengig av tettheten i betongen, i tillegg til fasthetsklassen (v/c-tall og materialvalg), utstøpning, herdevilkår og etterbehandling, rissvidder og miljø (fukt, temperatur, luftkvalitet, mm). Vanntettet eller helt tørr betong karboniserer ikke. I en rapport fra SINTEF Byggforsk [11] er det beregnet at årlig mengde  $\text{CO}_2$ -opptak i betongvarer i Norge er 111 kg  $\text{CO}_2$  per tonn sement. Dette er med forutsetning om 100 års brukstid og deretter 100 års gjenbruksfase. I løpet av brukstiden, fant studien at 94 kg  $\text{CO}_2$  per tonn sement ble bundet i betongen. I rapporten finnes det også eksempler på beregninger av GWP for ulike bygningskomponenter. For en innervegg av ubehandlet betong som er eksponert på begge sider, er det beregnet et GWP på 9,2 kg  $\text{CO}_2\text{e}$  per  $\text{m}^2$  i løpet av 60 års brukstid. For 100 års brukstid er opptaket beregnet til 11,9 kg  $\text{CO}_2\text{e}$  per  $\text{m}^2$ . Opptaket etter endt levetid er estimert til å være 0,12 kg  $\text{CO}_2\text{e}$  per  $\text{m}^2$  for veggen med 60 års levetid, og 0,8 kg  $\text{CO}_2\text{e}$  per  $\text{m}^2$  for veggen med 100 års levetid. Det ble antatt at 10% rives etter endt levetid, og at 90% av dette knuses.

Karbonopptaket for et hulldekke er estimert til å være henholdsvis 7,7 kg  $\text{CO}_2\text{e}$  per  $\text{m}^2$  overflate i bruksfasen for en levetid på 60 år og 10 kg  $\text{CO}_2\text{e}$  per  $\text{m}^2$  for en levetid på 100 år [11]. Eksemplene over viser at karbonatisering gir et opptak av  $\text{CO}_2$  tilsvarende 8-13% reduksjon av utslippet i produksjonsfasen, når karbonatiseringen skjer i løpet av 60 års brukstid, per  $\text{m}^2$  eksponert betong. I [12] er det gitt et formelverk med tilhørende karboniseringsfaktorer for beregning av  $\text{CO}_2$ -opptak i ulike betongprodukter avhengig av fasthetsklasser og bruksforhold (utendørs eksponert, innendørs, malt eller umalt, etc.). Dette kan eventuelt benyttes for å estimere karbonopptak i ulike typer bygg. I denne versjonen av FutureBuilt ZERO kriteriene har vi imidlertid valgt å bruke et forenklet estimat for  $\text{CO}_2$ -opptak i sementprodukter, gitt av likning 9 og 10.

## 2.5 Avfallsforbrenning

Utslipp skal beregnes for avfallshåndtering av alle brennbare/organiske materialer, hvor det ikke er dokumentert tilrettelegging for ombruk. Vekten av disse brennbare materialene ganges med faktorene beskrevet her, for å få utslippene fra forbrenning gjennom levetiden. Forbrenning skjer både for utskiftninger, og for slutfasen ved endt levetid. For begge disse fasene gjelder følgende likning

$$f_{\text{avfallsforbrenning}} = f_{\% \text{ material}} \cdot f_{\% \text{ forbrenning}} \cdot f_{\text{tid}} \cdot 3.67 \cdot f_{\text{karboninnhold}}, \quad (11)$$

hvor  $f_{\% \text{ material}}$  er andelen av opprinnelig materialbruk som blir brent under bruksfasen og slutfasen.  $f_{\% \text{ forbrenning}}$  er andelen av karbonet i materialene som slippes ut i atmosfæren, etter at karbonfangst, prosessutslipp, og generell gjenvinningsrate er hensyntatt.  $f_{\text{tid}}$  er tidsfaktoren enten for år 1-60 eller for år 60,  $f_{\text{karboninnhold}}$  er gjennomsnittlig karboninnhold i organiske materialer, og 3.67 konverterer fra karbon til karbondioksid<sup>11</sup>. Andelen karboninnhold vil variere

<sup>11</sup>Forholdet mellom den molekylære vekten til karbondioksid og karbon er  $44/12 \approx 3.67$ .

mellom produkter, hvor det kan skilles mellom treprodukter ( $\sim 50\%$ ) og oljebaserte produkter ( $\sim 80\%$ ). For utskiftningsfasen til oljebaserte produkter blir da avfallsforbrenningsfaktoren

$$\begin{aligned} f_{\text{forbr., 80\%, B}} &= 0.16 \cdot 0.76 \cdot 0.5 \cdot 3.67 \cdot 0.8 & [\text{kgCO}_2\text{kg}^{-1}] & \quad (12) \\ &= 0.18, \end{aligned}$$

hvor det fra erfaringstall (se avsnitt A.3) er antatt at 16% av materialmassen skiftes ut, og at teknologiutviklingen de neste 60 årene vil føre til at, i gjennomsnitt, 50% vil bli fanget opp av karbonfangst eller unngått på annen måte etter at prosessutslipp er medregnet, og at det er 80% gjennomsnittlig karboninnhold i de brennbare materialene. På lik måte blir avfallsforbrenningsfaktoren for oljebaserte produkter i slutfasen

$$\begin{aligned} f_{\text{forbr., 80\%, C}} &= 1 \cdot 0.48 \cdot 0.1 \cdot 3.67 \cdot 0.8 & [\text{kgCO}_2\text{kg}^{-1}] & \quad (13) \\ &= 0.14, \end{aligned}$$

hvor andelen av opprinnelig materialbruk som blir brent er lik én, tidsfaktoren er skiftet ut til å gjelde for år 60, og karbonfangst og andre unngåtte utslipp i år 60 vil føre til at 90% av utslippene fra forbrenning er unngåtte i slutfasen. Altså tillegges til sammen 32% utslipp for brennbare oljebaserte materialer gjennom byggets levetid, per kg material ( $0.32 \text{ kgCO}_2\text{e/kg material}$ ). Om det spesifikke karboninnholdet til produktene er kjent, kan en ved behov justere faktorene deretter. Den spesifikke verdien for byggets utskiftningsandel gjennom levetiden,  $f_{\% \text{ material}}$ , bør benyttes. Utskiftningsandelen kan beregnes som  $E_{\text{B}_{2-5, \text{materialfremstilling}}}/E_{\text{A}_{1-3}}$ , eller ut i fra levetidene til produktene og bygningens levetid.

Treprodukter inneholder en lavere andel karbon enn oljebaserte produkter, på  $\sim 50\%$ , og faktorene blir da noe lavere. For treprodukter kan en derfor anvende  $f_{\text{forbr., 50\%, B}} = 0.11$ , og  $f_{\text{forbr., 50\%, C}} = 0.09$ , som til sammen blir 20% utslipp per kg brennbart material. Om karboninnholdet til produktene er kjent (ofte oppgitt i produktets EPD), skal helst det spesifikke innholdet brukes. Karboninnholdet ganges da med følgende verdier for å få produktets spesifikke utslipp fra avfallsforbrenning

$$\begin{aligned} f_{\text{forbr., 100\%, B}} &= 0.16 \cdot 0.76 \cdot 0.5 \cdot 3.67 & [\text{kgCO}_2\text{kg}^{-1}] & \quad (14) \\ &= 0.22, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{\text{forbr., 100\%, C}} &= 1 \cdot 0.48 \cdot 0.1 \cdot 3.67 & [\text{kgCO}_2\text{kg}^{-1}] & \quad (15) \\ &= 0.18. \end{aligned}$$

Den totale vekten av den andelen av byggets brennbare materialer, hvor det ikke er dokumentert tilrettelegging for ombruk, ganges med disse faktorene for å få utslipp fra forbrenning. Ett kilogram brennbart oljebasert produkt fører da til utslipp av 320 tidsvektede gram karbondioksid i løpet av levetiden, og ett kilogram brennbart treprodukt fører til utslipp av 200 tidsvektede gram.

## 2.6 Ombrukbarhet

Bygningsprodukter som helt eller delvis kan brukes på nytt i fremtiden vil kunne erstatte produksjon av tilsvarende produkter, og dermed ha en klimagevinst. Det er umulig å si hva som vil skje med materialer i dagens bygninger langt frem i tid, men en kan likevel tilrettelegge for ombruk slik at sannsynligheten for ombruk øker. Materialer med dokumentert tilrettelegging for ombruk etter FutureBuilt's kriterier for sirkulære bygg [13] kan derfor tillegges en fremtidig negativ klimaeffekt på 10% av dagens utslipp for disse materialene. Denne verdien er allerede inkludert teknologiutvikling og tidsvektning. Det skal ikke beregnes utslipp fra forbrenning fra materialer med dokumentert tilrettelegging for ombruk.

$$E_{\text{D}_{\text{ombruk}}} = -0.1 \cdot E_{\text{A}_{1-3, \text{dokumentert ombruk}}} \quad [\text{kgCO}_2\text{e}] \quad (16)$$

## Referanser

- [1] Marianne Wiik mfl. “GHG emission requirements and benchmark values for Norwegian buildings”. I: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Bd. 0. 0. IOP Publishing. 2020, s. 0.
- [2] Marianne Wiik mfl. “Klimagasskrav til materialbruk i bygninger. Utvikling av grunnlag for å sette absolutte krav til klimagassutslipp fra materialbruk i norske bygninger.” I: *ZEN Report* (2020).
- [3] EN 15978:2011. “Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method”. I: *European Committee for Standardization*. Brussels, Belgium, 2012.
- [4] NS3720:2018. “Metode for klimagassberegninger for bygninger”. I: *Standard Norge*. Oslo, Norway, 2018.
- [5] Annie Levasseur mfl. “Considering time in LCA: dynamic LCA and its application to global warming impact assessments”. I: *Environmental science & technology* 44.8 (2010), s. 3169–3174.
- [6] Eirik Resch mfl. “An analytical method for evaluating and visualizing embodied carbon emissions of buildings”. I: *Building and Environment* 168 (2020), s. 106476. ISSN: 0360-1323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106476>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132319306882>.
- [7] Norsk Industri, Enova. “Potensial for energieffektivisering i norsk landbasert industri”. I: *Enova*. Oslo, Norway, 2009.
- [8] Avfall Norge. “Avfallsmengder frem mot 2035. Energigjenvinningens rolle i sirkulærøkonomien. Rapport nr. 07/2019”. I: *Avfall Norge*. Oslo, Norway, 2019.
- [9] Geoffrey Guest mfl. “Consistent quantification of climate impacts due to biogenic carbon storage across a range of bio-product systems”. I: *Environmental Impact Assessment Review* 43 (2013), s. 21–30. ISSN: 0195-9255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.05.002>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019592551300053X>.
- [10] Gry Alfredsen mfl. “Sekundærråstoff fra trebaserte verdikjeder i Norge”. I: *NIBIO Rapport* (2018).
- [11] CJ Engelsen og H Justnes. “CO2 binding by concrete. A summary of the state of the art and an assessment of the total binding in by carbonation in the Norwegian concrete stock. SINTEF Building and Infrastructure”. I: *Construction Technology, Norway* (2014).
- [12] Ronny Andersson mfl. “Calculating CO2 uptake for existing concrete structures during and after service life”. I: *Environmental science & technology* 47.20 (2013), s. 11625–11633.
- [13] FutureBuilt. “FutureBuilt kriterier for sirkulære bygg”. I: *FutureBuilt*. Oslo, Norway, 2019. URL: <https://www.futurebuilt.no/content/download/13987/94674>.
- [14] Atse Louwen mfl. “Re-assessment of net energy production and greenhouse gas emissions avoidance after 40 years of photovoltaics development”. I: *Nature Communications* 7.1 (2016), s. 1–9.

## A Vedlegg

### A.1 Kriterier

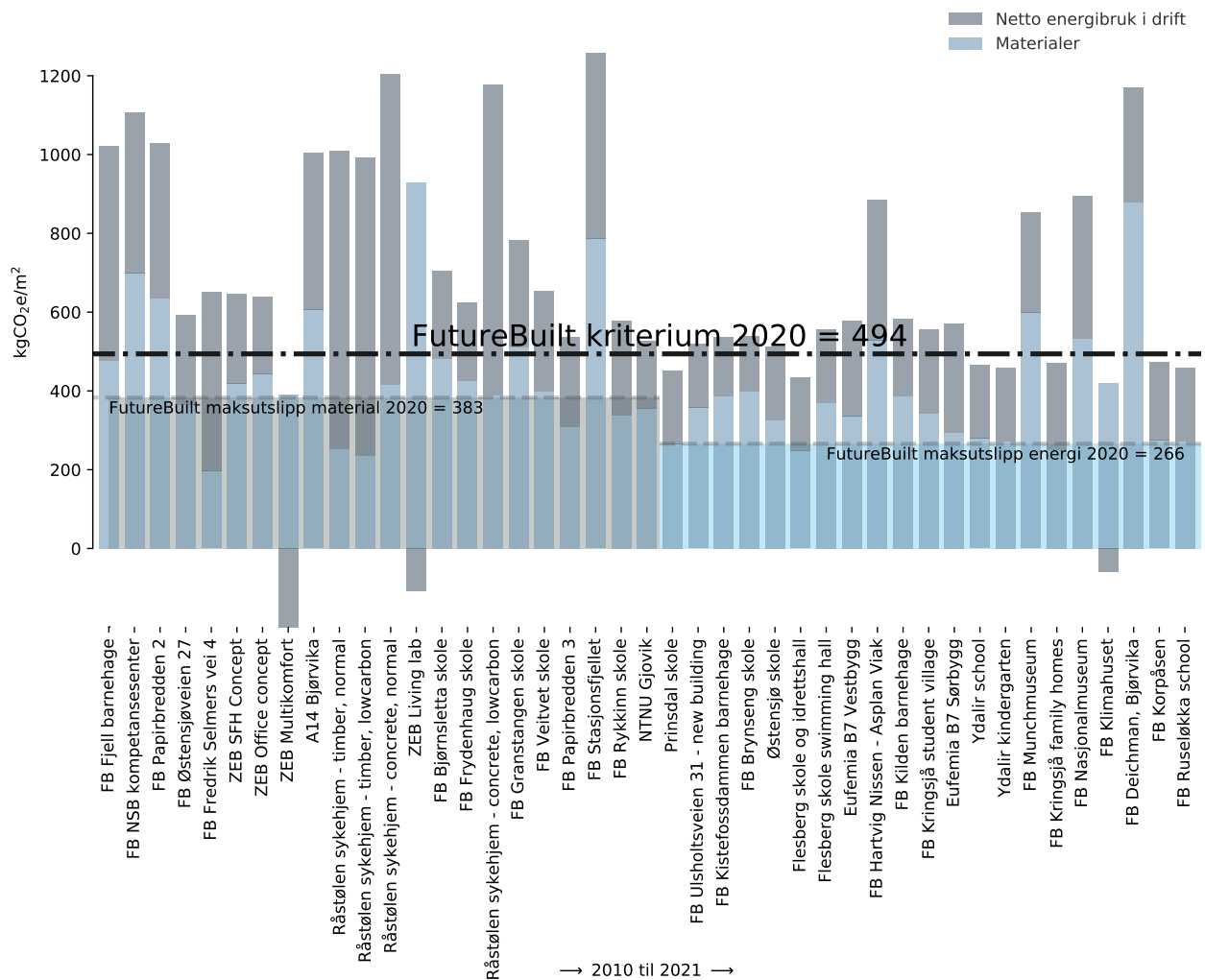
Tabell A2 viser kriterienivåer for FutureBuilt kriterium, maksutslipp materialer, og maksutslipp energi. FutureBuilt kriteriet inkluderer utslipp fra både materialer, energi, og alle andre inkluderte utslipp og opptak, som til sammen tilsvarer ‘dagens beste praksis’.

Maksutslipp materialer inkluderer produksjon og transport av materialer til byggeplass, også for energiproduserende utstyr og for utskiftninger gjennom levetiden, samt utslipp fra materialsvinn og energibruk på byggeplassen, og avfallsforbrenning gjennom levetiden, etter at effekter av biogent opptak og karbonatisering av sementprodukter er trukket fra. For maksutslipp materialer er det brukt medianverdi for utslipp fra materialfremstilling (dvs. at halvparten av eksempelbyggene gjør det bedre enn dette), utenom for energiproduserende utstyr som er uendret. De resterende utslippskildene er også uendret. Dette gir noe slingringsmonn til materialbruk i forhold til verdiene benyttet i totalkriteriet, men da gitt at de resterende utslippene er lavere slik at de til sammen fortsatt oppnår totalkriteriet. For maksutslipp energibruk er det brukt øvre spenn av 95% usikkerhetsintervallet for utslipp fra energibruk i drift, som gir et liknende slingringsmonn.

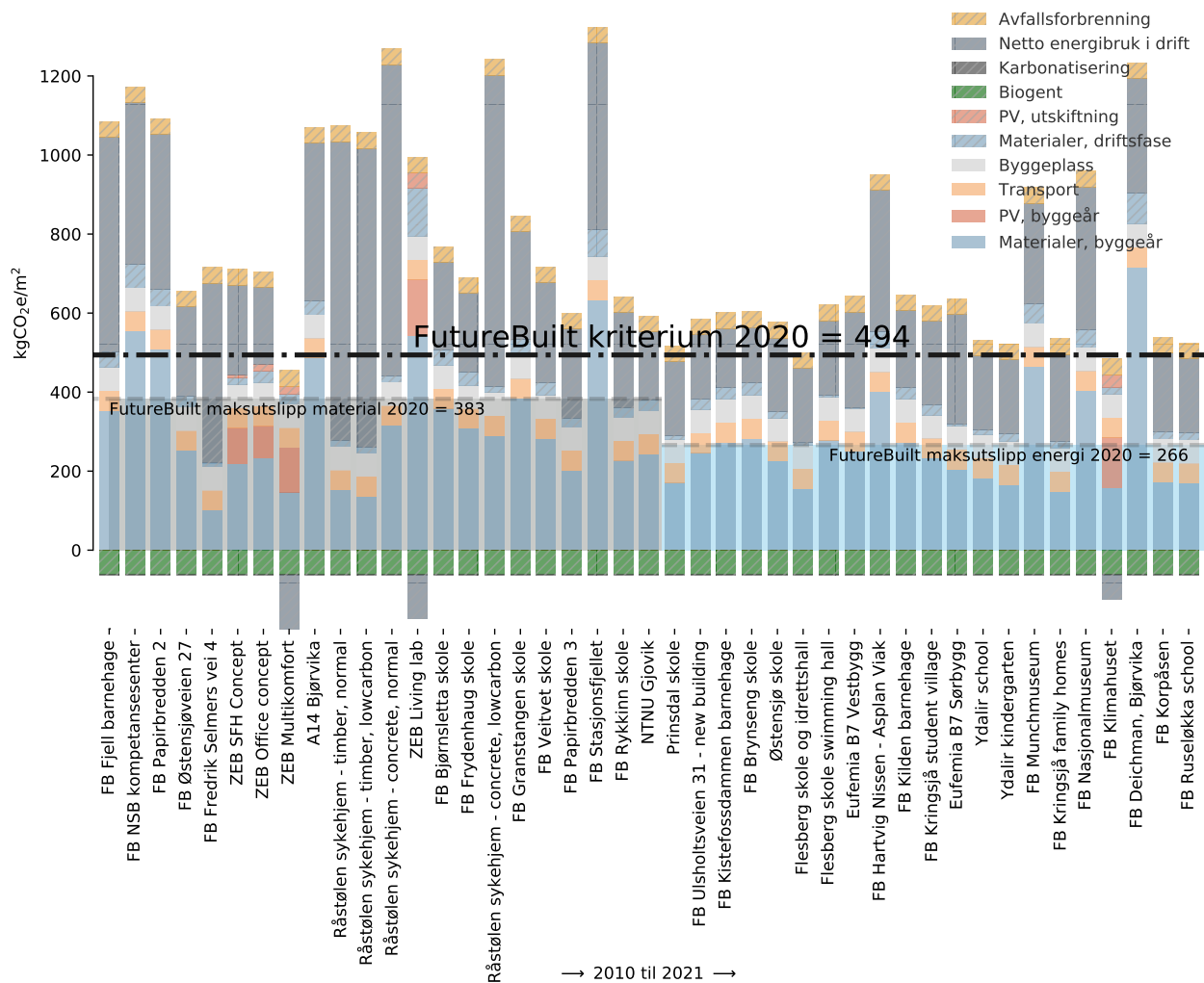
Tabell A2: Kriterienivåer for alle år frem mot 2050.

	FutureBuilt kriterium	Maksutslipp materialer	Maksutslipp energi
2020	494	383	266
2021	468	364	253
2022	442	345	240
2023	416	326	226
2024	390	307	213
2025	364	288	200
2026	338	268	186
2027	312	249	173
2028	286	230	160
2029	261	211	146
2030	235	192	133
2031	225	184	128
2032	215	176	122
2033	205	169	117
2034	195	161	112
2035	185	153	106
2036	175	146	101
2037	165	138	96
2038	156	130	90
2039	146	123	85
2040	136	115	80
2041	126	107	75
2042	116	100	69
2043	106	92	64
2044	96	84	59
2045	86	77	53
2046	77	69	48
2047	67	61	43
2048	57	54	37
2049	47	46	32
2050	37	38	27

Kriterienivåene (hoved, material, og energi) blir sammenliknet opp mot eksempelbygg i figur 8 og 9.



Figur 8: Kriterienivåer sammenliknet med eksempelbygg. Byggene er sortert etter årstall ferdigstilt. Maksutslipp for materialer og energi vises av fargede områder. Utslipp fra materialproduksjon inkl. PV og fra netto energibruk i drift er fra LCA analyser gjort av hvert enkelt bygg. I tilfeller hvor det mangler energibruk i drift er det i stedet brukt verdi fra 'dagens beste praksis'. Resterende utslippskilder (transport, byggeplass, avfallsforbrenning, biogent, karbonatisering) er også lik som for FutureBuilt kriteriet i 2020, og viser dermed ikke variasjonen mellom enkeltbyggene. Der hvor 'i drift'-verdier for materialfremstilling ikke finnes er det brukt verdier fra 'som bygget', og der de heller ikke finnes er det brukt verdier fra 'design'.



Figur 9: Kriterienivåer sammenliknet med eksempelbygg. Byggene er sortert etter årstall ferdigstilt. Maksutslipp for materialer og energi vises av fargede områder. Utslipp fra materialproduksjon inkl. PV og fra netto energibruk i drift er fra LCA analyser gjort av hvert enkelt bygg. I tilfeller hvor det mangler energibruk i drift er det i stedet brukt verdi fra 'dagens beste praksis'. Resterende utslippskilder (transport, byggeplass, avfallsforbrenning, biogent, karbonatisering) er også lik som for FutureBuilt kriteriet i 2020, og viser dermed ikke variasjonen mellom enkeltbyggene. Der hvor 'i drift'-verdier for materialfremstilling ikke finnes er det brukt verdier fra 'som bygget', og der de heller ikke finnes er det brukt verdier fra 'design'.



## A.2 Faktorer

Tabell 1 i hovedteksten viser teknologifaktorer og tidsfaktorer til bruk i beregningene. Tabell A3 viser utslippsintensiteter (årlig og gjennomsnittlig) og teknologifaktor for elektrisitet fra nett for hvert år frem til 2050. Tabell A4 viser utslippsintensiteter (årlig og gjennomsnittlig) og teknologifaktor for avfallsforbrenningsandelen i fjernvarme for hvert år frem til 2050.

Tabell A3: Utslippsintensitet for elektrisitet fra nett. Kolonnene viser fremskrevde utslippsintensitetsverdier per år, teknologi- og tidsfaktorer, totalfaktorer (teknologi og tid), og utslippsintensiteter vektet med totalfaktorer, for alle år frem mot 2050. Det er vektete utslipp som skal brukes i beregninger.

	kgCO <sub>2</sub> e/kWt	Teknologifaktor	Tidsfaktor	Totalfaktor	Vektete utslipp
2020	0.36	0.30	0.76	0.23	0.08
2021	0.35	0.30	0.76	0.23	0.08
2022	0.34	0.29	0.76	0.22	0.08
2023	0.33	0.29	0.76	0.22	0.07
2024	0.32	0.28	0.76	0.21	0.07
2025	0.31	0.28	0.76	0.21	0.06
2026	0.30	0.27	0.76	0.21	0.06
2027	0.28	0.26	0.76	0.20	0.06
2028	0.27	0.26	0.76	0.20	0.05
2029	0.26	0.26	0.76	0.19	0.05
2030	0.25	0.25	0.76	0.19	0.05

Tabell A4: Utslippsintensitet for den andelen av fjernvarme som kommer fra avfallsforbrenning. Kolonnene viser fremskrevde utslippsintensitetsverdier per år, teknologi- og tidsfaktorer, totalfaktorer (teknologi og tid), og utslippsintensiteter vektet med totalfaktorer, for alle år frem mot 2050. Det er vektete utslipp som skal brukes i beregninger.

	kgCO <sub>2</sub> e/kWt	Teknologifaktor	Tidsfaktor	Totalfaktor	Vektete utslipp
2020	0.09	0.33	0.76	0.25	0.02
2021	0.09	0.33	0.76	0.25	0.02
2022	0.08	0.33	0.76	0.25	0.02
2023	0.08	0.34	0.76	0.26	0.02
2024	0.08	0.34	0.76	0.26	0.02
2025	0.08	0.34	0.76	0.26	0.02
2026	0.07	0.35	0.76	0.26	0.02
2027	0.07	0.35	0.76	0.27	0.02
2028	0.07	0.35	0.76	0.27	0.02
2029	0.07	0.36	0.76	0.27	0.02
2030	0.06	0.36	0.76	0.28	0.02

### A.3 Fastsettelse av kriterier

Startåret for kriterienivåene har blitt beregnet ut fra gjennomsnittlige erfaringstall og antakelsene beskrevet i dette dokumentet, med parameterverdier gitt i tabell A5 og resultater gitt i tabell A6. I tillegg er det beregnet 95% konfidensintervaller for 2020-verdiene for ‘dagens praksis’ og ‘dagens beste praksis’ ved å “sample” 22k resultater vha. Saltelli/Sobol metoden. Resultater beregnes da ut ifra variasjoner i parameterene, med usikkerhetsintervallene for hver parameter gitt i tabell A5. Dette gir en tilnærmet normalfordelt sannsynlighetsfordeling, hvor 95% faller inn under konfidensintervallet. Kriteriet er beregnet med følgende verdier:

- Utslipp fra materialbruk satt til 25% prosentilen (dvs. at de 25% beste eksempelbyggene gjør det minst så bra) av de 112 kvalifiserende byggene som er hentet fra studiet bekrevet i artikkelen ‘*GHG emission requirements and benchmark values for Norwegian buildings*’ (2020) [1] og ZEN rapporten ‘*Klimagasskrav til materialbruk i bygninger*’ (2020) [2].
- Utslipp fra energiproduserende utstyr, med utgangspunkt i solcellesystem, er deretter lagt til. Det er gjort antakelse om et solcelleareal på 10% av BRA, og utslippsintensiteter og fremtidig utvikling basert på [14].
- Utslipp fra energibruk i drift baserer seg på gjennomsnittet av beregnede verdier for nesten-nullenergi boligblokk, kontorbygg, skolebygg, og barnehage<sup>12</sup>.
- Utslipp fra transport av byggematerialer har blitt beregnet basert på gjennomsnittet fra et materialinventar fra 19 bygg. Det er brukt gjennomsnittlig vekt på bygningene, 25% prosentil for transportavstand, og utslippsintensitet fra Ecoinvent v3.2 (lorry 16-32t, RER, Euro5, drivstofforbruk 0.0375 kg diesel/tkm).
- Utslipp fra byggeplass er beregnet med antakelse om 5% materialsvinn på byggeplass, som først må produseres og transporteres og den brennbare andelen deretter avfallsforbrennes. Begrensede erfaringstall viser at omtrent halvparten av utslipp fra byggeplass kommer fra energibruk på byggeplass, og det er basert på dette lagt til en faktor 2 for å innlemme energibruk i kriteriet.
- Andelen brennbare materialer er basert på erfaringstall for andelen trevirke, som har blitt beregnet basert på et materialinventar fra 19 bygg. Det er videre antatt at trevirke utgjør 2/3 av den totale vekten brennbare materialer.
- Biogent opptak er beregnet med andelen trevirke fra erfaringstall fra 19 bygg, og utslippsintensiteten til disse materialene. Opptaket tilsvarende produksjons og forbrenningsutslipp fra disse, med antakelse om at trevirket er klimanøytralt for disse utslippene (se avsnitt 2.3.1 for begrunnelse). Materialsvinn er utelatt, da disse utslippene ikke vil ha effekten av midlertidig lagring, og derfor ikke kan komme til fratrekk.
- Karbonatisering er beregnet med den gjennomsnittlige andelen sement fra erfaringstall fra 19 bygg.

---

<sup>12</sup>Inkluderer levert energi, med varmpumpe, til romoppvarming og kjøling, ventilasjonsvarme og kjøling, varmtvann, vifter, pumper, belysning, og teknisk utstyr.

Tabell A5: Parameterverdier og 95% usikkerhetsintervaller benyttet for fastsettelse av 2020 verdier.

	mean	lower c.i.	upper c.i.
B4pct	0.16	0.12	0.2
ftekn	0.748	0.577	0.97
fPV	0.33	0.297	0.363
fEL	0.303	0.273	0.333
ftid	0.756	0.756	0.756
A13B4_ref	391	325	457
A13B4_fb	216	176	255
A13B4_49	24	21.6	26.4
B6_ref	2.68E+03	2.23E+03	3.13E+03
B6_fb	817	755	878
Denergi_fb	0	0	0.001
Dmaterial_begge	0	0	0.001
byggetsvekt	1.26E+03	1.26E+03	1.26E+03
vekttrevirke	111	111	111
gjsmutslinttrevirke	0.34	0.34	0.34
andelsvinn	0.05	0.05	0.05
karboninntrevirke	0.5	0.5	0.5
totalfaktor_forbrenning	0.4	0.4	0.4
karbonatisering	6	6	6
transportperkg	0.04	0.04	0.04

Tabell A6: Startverdier for utslippsnivåer i kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> BRA.

	A <sub>1-3,21-29</sub>	A <sub>1-3,49</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	B <sub>4,21-29</sub>	B <sub>4,49</sub>	B <sub>6</sub>	Biogent	Karbonatisering	B,C <sub>avfallsfor.</sub>
REF	328	0	50.2	74.5	42.1	0	613	-59.9	-4.53	40
FB	181	12	50.2	59.8	25.4	2.99	187	-59.9	-4.53	40