

# BUILD Rapport 2021:24

## Klimaeffektiv renovering

Balancen mellem energibesparelse og  
materialepåvirkninger i bygningsrenovering





# KLIMAEFFEKTIV RENOVERING

Balancen mellem energibesparelse og  
materialepåvirkninger i bygningsrenovering

Kai Kanafani  
Alberte Mai Lund  
Amdi Schjødt Worm  
Johannes Due Jensen  
Harpa Birgisdóttir  
Jørgen Rose

BUILD Rapport 2021:24  
Institut for Byggeri, By og Miljø, Aalborg Universitet  
2021

<b>TITEL</b>	Klimaeffektiv renovering
<b>UNDERTITEL</b>	Balancen mellem energibesparelse og materialepåvirkninger i bygningsrenovering
<b>SERIETITEL</b>	BUILD Rapport 2021:2424
<b>FORMAT</b>	Digital
<b>UDGIVELSEÅR</b>	2021
<b>UDGIVET DIGITALT</b>	Oktober 2021
<b>FORFATTER</b>	Kai Kanafani, Alberte Mai Lund, Amdi Schjødt Worm, Johannes Due Jensen, Harpa Birgisdóttir, Jørgen Rose
<b>SIDETAL</b>	112
<b>LITTERATURHENVISNINGER</b>	Side 92
<b>EMNEORD</b>	Renovering, energibesparelse, livscyklusvurdering, LCA, isolering, vinduer, solceller, bæredygtighed
<b>ISBN</b>	978-87-563-2008-5
<b>ISSN</b>	2597-3118
<b>OMSLAGSILLUSTRATION</b>	Agnes Garnow
<b>UDGIVER</b>	Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV E-post <a href="mailto:build@build.aau.dk">build@build.aau.dk</a> <a href="http://www.anvisninger.dk">www.anvisninger.dk</a>

Denne publikation er omfattet af ophavsretsloven

# INDHOLD

<b>FORORD</b>	<b>6</b>
<b>1 INDLEDNING</b>	<b>8</b>
<b>2 METODE (GENEREL)</b>	<b>12</b>
2.1 Livscyklusvurdering (LCA)	12
2.2 Klimaeffektivitet	15
2.3 Overblik over analyser	17
<b>3 EFTERISOLERING</b>	<b>22</b>
3.1 Metode	22
3.2 Resultater og diskussion	30
3.3 Usikkerhedsanalyse	51
3.4 Konklusion	56
<b>4 UDSKIFTNING AF VINDUER</b>	<b>60</b>
4.1 Metode	60
4.2 Resultater og diskussion	65
4.3 Usikkerhedsanalyse	69
4.4 Konklusion	73
<b>5 OPSÆTNING AF SOLCELLER</b>	<b>76</b>
5.1 Metode	76
5.2 Resultater og diskussion	82
5.3 Usikkerhedsanalyse	85
5.4 Konklusion	86
<b>6 KONKLUSION</b>	<b>89</b>
<b>7 REFERENCER</b>	<b>92</b>
<b>BILAG</b>	<b>94</b>
Bilag 1. Modeldokumentation for efterisolering	94
Bilag 2. Detaljerede resultater for efterisolering	102
Bilag 3. Modeldokumentation for vinduesudskiftning	103
Bilag 4. Detaljerede resultater for vinduesudskiftning	104
Bilag 5. Dokumentation af cases	110
Bilag 6. Emissionsfaktorer for driftsenergi	111

# FORORD

Over de seneste år er LCA-metoden blevet etableret som en hjørnesteen til vurdering af bygningers bæredygtighed. Byggebranchen har nu mulighed for at beregne bygningers klimapåvirkninger over hele deres livscyklus, som er en forudsætning for at bestemme og nedbringe bygningers samlede klimaaftryk. LCA indgår imidlertid også som krav i den *Frivillige Bæredygtighedsklasse*, som Bolig- og Planstyrelsen lancerede i 2020. Med regeringens *Nationale Strategi for Bæredygtigt Byggeri* fra april 2021 er det blevet besluttet, at der bliver indført bindende CO<sub>2</sub>-grænseværdier for nybyggeri i 2023.

Den eksisterende bygningsmasse rummer imidlertid det største potentiale til at reducere byggeriets klimaaftryk. LCA kan anvendes for at sikre, at energirenoveringer rent faktisk reducerer udledningen af drivhusgasser på den bedst mulige måde. Denne rapport skal derfor lægge fokus på renoveringers klimaeffektivitet ved at belyse balancen mellem energibesparelser og klimapåvirkninger knyttet til de materialer, der anvendes til at effektuere disse besparelser. Nettopåvirkninger beregnes for renoveringstiltagene; efterisolering, vinduesudskiftning og opsætning af solceller.

Byggebranchens parter inden for bygningsisolering, vinduer og solcelleanlæg har bidraget til projektet med nyttige input og diskussioner i form af løbende dialog og en række branchemøder. Det vil jeg gerne takke dem for på vegne af forfatterne.

Rapporten er et resultat af projektet *Balancepunkt mellem materialeforbrug og energibesparelser*. Projektet blev gennemført i et partnerskab mellem Arkitema og BUILD - Institut for byggeri, By og Miljø ved Aalborg Universitet på basis af en bevilling fra Grundejernes Investeringsfond i 2020.

Tine Steen Larsen

Sektionsleder

Sektionen for Bæredygtighed, energi og indeklima  
Institut for Byggeri, By og Miljø, Aalborg Universitet

# INDLEDNING

# 1 INDLEDNING

Forkortelser:

LCA	Livscyklusvurdering (Life Cycle Assessment)
FBK	Den frivillige bæredygtighedsklasse
BR18	Bygningsreglementet 2018
GWP	Klimapåvirkning (Global Warming Potential)
kgCO <sub>2</sub> eq	Enhed for klimapåvirkning (kg CO <sub>2</sub> ækvivalenter)
EPD	Miljøvaredeklaration (Environmental Product Declaration)

Med Klimaloven (Klima- Energi- og Forsyningsministeriet, 2020) har Danmark forpligtet sig at reducere drivhusgasudledningerne med 70 pct. i 2030 i forhold til 1990 og være klimaneutralt i 2050. Lanceringen af den frivillige bæredygtighedsklasse (Bolig- og Planstyrelsen, 2020) og regeringens nationale strategi for bæredygtigt byggeri (Indenrigs- og Boligministeriet, 2021) har lagt en tidsplan for introduktionen af grænseværdier for bygningers klimapåvirkning i bygningsreglementet. Et hjørnesteen i klimaloven er omstilling af den danske energiforsyning til vedvarende energikilder. For at dette kan ske med rimelige omkostninger, skal energibehovet af den eksisterende bygningsmasse nedbringes løbende. Opvarmning af bygninger står for cirka en tredjedel af energiforbruget i Danmark og der findes et betydeligt besparelsespotentiale især i ældre byggeri fra før 1960'erne. Ved en renovering af bygningsmassen efter BR18-krav til ombygninger og en samtidig konvertering til vedvarende energi, ville den årlige CO<sub>2</sub>-udledning kunne reduceres med 44 pct. (Kragh & Aggerholm, 2021). For at indfri den eksisterende bygningsmasses bidrag til CO<sub>2</sub>-besparelse har Europakommissionen lanceret initiativet *En Renoveringsbølge for Europa* (Europakommissionen, 2020), som skal fremme flere og dybere energirenoveringer, livscyklustilgangen og konvertering til vedvarende energiformer.

Hvis energieffektivisering skal føre til en faktisk CO<sub>2</sub>-reduktion, må renoveringer betragtes i et livscyklusperspektiv, hvor også påvirkninger fra de materialer, som anvendes for at frembringe energibesparelsen, regnes med. En renovering er derfor klimaeffektiv, når der opnås en nettobesparelse af klimapåvirkning, det vil sige, at energibesparelsen skaber en større reduktion af klimapåvirkning end den, der forårsages af materialerne.

I dag er der kun et mindre budget af fossile brændsler tilbage, som må udledes til atmosfæren uden at den globale opvarmning overstiger målsætningerne i Parisaftalen (De Forenede Nationer, 2015). Da den danske energiforsyning over de kommende år stadig har en andel fossile energikilder og et deraf følgende højt klimaaftryk, ville hurtige reduktioner i energibehov have en særlig gavnlig effekt. Derfor må klimaeffektiviteten også ses i et tidsperspektiv, som tilgodeser rettidige besparelser frem for senere.

Formålet med rapporten er derfor at vise, hvornår energirenoveringer kan opnå en nettobesparelse i klimapåvirkning og hvordan man kan tilvejebringe en sådan beregning med det nu tilgængelige datagrundlag. Rapporten indeholder analyser af tre typer renoveringstiltag: Efterisolering, udskiftning af vinduer og opsætning af solceller. Analyserne bygger på offentligt tilgængelige miljødata og metoder inden for energi og livscyklusvurdering (LCA).

I de seneste år er LCA i stigende grad blevet anvendt til at opnå en helhedsorienteret vurdering af bygningers miljøpåvirkninger, ikke mindst med lancering af den frivillige bæredyg-

tighedsklasse og udsigt til CO<sub>2</sub>-grænseværdier. LCA inkluderer produktion af byggematerialer, byggeprocessen, udskiftninger og nedrivning ud over energiforbrug. Metoden er mest afprøvet og defineret til nybyggeri, mens der findes mindre erfaringer med LCA i renovering. Rapporten giver derfor samtidig en status over, hvilke typer klimamæssige rentabilitetsregninger der kan udføres i dag og hvor der er behov for udvikling.



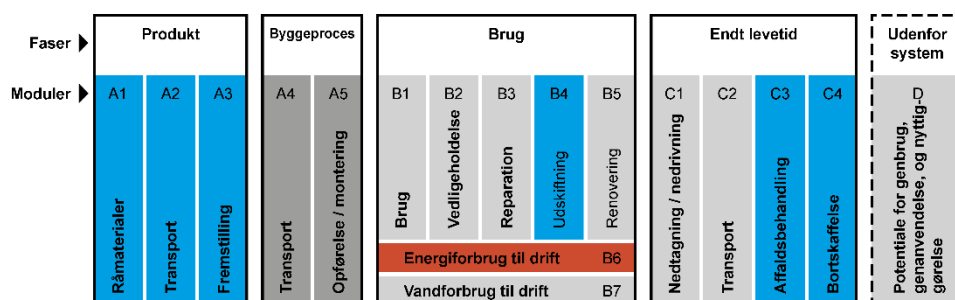
# **METODE (GENEREL)**

## 2 METODE (GENEREL)

### 2.1 Livscyklusvurdering (LCA)

I en LCA betragtes klimapåvirkningen over bygningens livscyklus, som blandt andet indebærer materialers produktion ved etablering af bygningen og affaldsbehandling ved nedrivning ud over bygningens energiforbrug. Rapporten tager udgangspunkt i LCA-metoden i den frivillige bæredygtighedsklasses delkrav om LCA, som selv er baseret på EN 15978 (CEN/TC350, 2011) og tilhørende standarder. Det var dog nødvendigt at afvige metoden i bæredygtighedsklassen nogen steder til at kunne foretage analyserne.

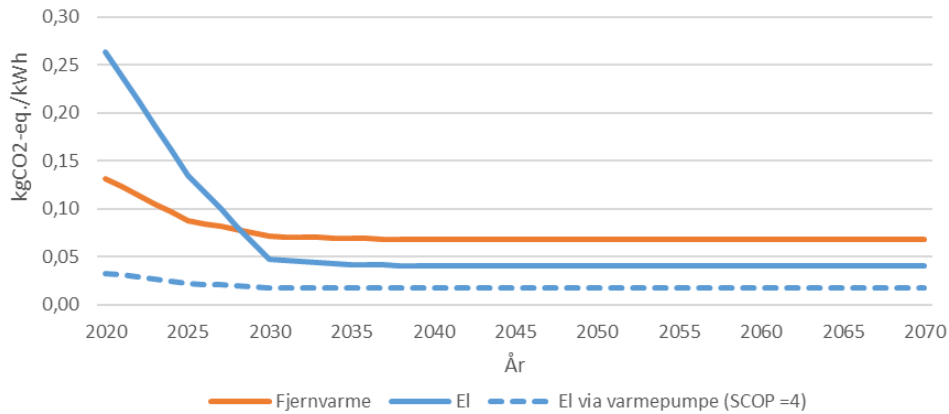
Analysen er baseret på livscyklusmodulerne produkt (A1-3), udskiftninger (B4), affaldsbehandling (C3-4) samt driftsenergi (B6), se Figur 1. Byggeprocessen (A4-5) udelades, da analysen ikke omfatter registreringer af konkrete byggeprojekter. Derudover findes der endnu ikke robuste erfaringsværdier for påvirkninger fra byggeprocessen. Det betyder, at de beregnede materialepåvirkninger og dermed tilbagebetalingstiderne bliver undervurderet i en vis grad.



**Figur 1.** Afgrænsning af livscyklusen i analysen, som omfatter påvirkninger fra materialer (blå) og driftsenergi (rød). Byggeprocessen (mørkegrå), som er med i den frivillige bæredygtighedsklasse, er ikke med her. Livscyklus baseret på EN 15978.

Betragtningsperioden på 50 år anvendes i denne rapport samtidig som ramme for, hvornår en renovering anses for at være rentabelt med hensyn til klimapåvirkning, se afsnit 2.2. Byggevarer regnes for at blive udskiftet (B4), når deres levetid er under 50 år. Levetider bestemmes ud fra et register af faktiske middellevetider (Aagaard, Brandt, Aggerholm, Haugbølle, & Statens Byggeforskningsinstitut, 2013).

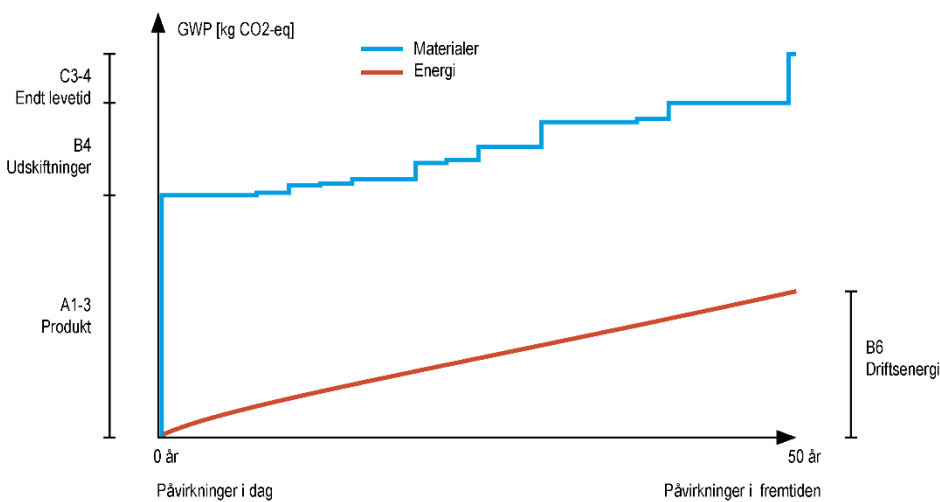
Klimapåvirkninger for bygningens energiforbrug til drift (B6) bestemmes normalt ved energirammeberegning i henhold til BR18 og SBI-rapport 213 (Aggerholm, 2018). Denne metode anvendes i rapporten for vinduer og solceller. Isoleringsstudiet anvender både grad-døgnsmetoden og energirammemetoden. I modsætning til primærenergifaktorer i BR18 anvendes i LCA særlige emissionsfaktorer (COWI, 2020). Emissionsfaktorerne udtrykker den forventede udvikling af dansk energiforsyning over de kommende årtier (Figur 2). Klimapåvirkningen af fjernvarme og el forventes at falde til omkring år 2030, hvor den skal fortsætte på et lavt niveau. Bilag 6 indeholder mere uddybende information om emissionsfaktorerne.



**Figur 2.** Klimapåvirkning af 1 kWh leveret el og fjernvarme til bygningsdrift. Start-år er 2020. Kilde: Baggrundsrapport til Bolig- og Planstyrelsen (COWI, 2020), se Bilag 6 for uddybende information.

Klimapåvirkninger for materialer på den ene og driftsenergi på den anden side giver en typisk profil over betragtningsperioden, se et eksempel i Figur 3. Grafen er en anskuelig visualisering af, hvordan disse to typer påvirkninger udvikler sig henover betragtningsperioden, især med henblik på de rentabilitetsberegninger, som rapporten omhandler.

Bygningens samlede klimapåvirkning for de valgte livscyklusmoduler er summen af begge kurver ved år 50. Den større hældning på den røde kurve for energi afspejler, at de højere emissioner forbundet med energiforsyningen i de første år relativt hurtigt reduceres grundet en øget andel af vedvarende energikilder i energisystemerne, se også Figur 2. Den blå kurve for materialer starter på et niveau svarende til påvirkninger fra materialeproduktion. Hvert trin i den blå kurve svarer til en eller flere udskiftninger, som øger påvirkninger fra materialer successive. Ved enden af perioden stiger materialepåvirkninger typisk igen, da materialerne skal affaldsbehandles.



**Figur 3.** Akkumulerede påvirkninger, skematisk illustration. Den blå kurve viser de materialerrelaterede og den røde de energirelaterede klimapåvirkninger.

Materialepåvirkninger skal som udgangspunkt beregnes med miljødata, som er specifikke for produkter eller produkttyper. Disse data findes i miljøvaredeklarerationer (EPD), som udgives af producenter eller brancheforeninger. I designprocessen, hvor der endnu ikke er valgt konkrete produkter eller hvor der ikke findes EPD for alle byggevarer, anvendes der generiske data. I Danmark anvendes der generiske data fra den tyske database Ökobaudat

(BMI, 2020). I LCA skal der anvendes de miljødata, som er mest repræsentative for de anvendte byggevarer. Derfor vælges ofte generiske data i designprocessen og mere produkt-specifikke data ved dokumentation af det færdige projekt.

I analysen inkluderes alle tilgængelige miljødata for isolering, vinduer og solceller, herunder EPD'er og generiske data. EPD-data anvendt i projektet er begrænset til de byggevarer, som anvendes i et vist omfang til byggeri i Danmark.

Omfattende renoveringer betragtes som påbegyndelse af en ny livscyklus med 50 års betragtningsperiode, men med en differentieret tilgang for eksisterende og nye materialer. Definitionen i henhold til FBK indebærer, at der ved omfattende renoveringer starter en ny livscyklus for ny tilførte materialer. De eksisterende materialer videreføres i den nye livscyklus med en restlevetid, som skal vurderes konkret for projektet. Fælles for eksisterende og nye materialer er, at der regnes med en udskiftning, når deres levetid er slut. Energiforbruget (fase B6) skal afspejle et eventuelt ændret niveau, som ligeledes indgår i livscyklusen over 50 år.

I denne rapport har det været nødvendigt at lave nogle tilpasninger af denne LCA-metode for renoveringer, navnlig med hensyn til, hvilke materialer og dele af livscyklusen der indgår i de sammenlignende analyser. I scenarier for isoleringsstudiet (Tabel 1) sammenlignes der et udgangspunkt, hvor bygningen ikke renoveres, med en renoveringsvariant. Den forskel, som er interessant at belyde her, udgøres alene af energibesparelsen og de tilførte materialer ved renovering. En regulær opførelse af klimapåvirkning over 50 år via LCA vil normalt også omfatte affaldsbehandlingen og eventuelle udskiftninger af den eksisterende beklædning, som skal fjernes forud nogle isoleringstiltag, eksempelvis isolering af skråtag udefra. Da affaldsbehandlingen og udskiftning af de eksisterende dele forekommer både i udgangspunktet og varianten, ville forskellen udlignes i sammenligningen, hvorfor disse påvirkninger udelades på begge sider af ligningen.

Det kan diskuteres, hvorvidt den nye beklædning skal medregnes som del af efterisoleringen (variant). I LCA medtages normal alle byggeaktiviteter og materialestrømme i en renovering for at afspejle projektets klimapåvirkninger mest akkurat. Man kan dog argumentere for, at den nye beklædning regnes som nødvendigt vedligehold af bygningen, som står i modsætning til som efterisolering, som er en opgradering. Når beklædningen er slidt og skal erstattes uanset ønsket om en opgradering (scenarie 2), forekommer denne proces i begge varianter og kan udelades. Beslutning om en ny facade- eller tagbeklædning kan også ske af andre grunde, selvom den eksisterende beklædning endnu ikke er helt slidt (scenarie 1). Det kan være ønsket om en arkitektonisk opgradering, en for dyr vedligehold eller beslutning om en større, sammenhængende renovering. Her ville den nye beklædning regnes som en opgradering og bør inkluderes i LCA. Da begge scenarier kan være berettiget, viser rapporten resultater både med og uden ny beklædning i isoleringsstudiet.

**Table 1.** Scenarier for efterisolering. Her sammenlignes et eksisterende udgangspunkt uden renovering med en renoveringsvariant. Tabellen viser, hvilke livscyklusfaser der er medtaget i beregningen. Livscyklusfaser, som er ens og dermed ikke nødvendige i sammenligningen, er gennemstreget.

		Udgangspunkt	Variant
<b>Scenarie 1</b>	Eksisterende beklædninger erstattes ikke som udgangspunkt	Eksisterende energiforbrug (B6 før)	Nyt energiforbrug (B6 efter)
		–	Ny isolering (A1-3, C3-4)
		–	Ny beklædning (A1-3, C3-4)
		<del>Eventuel nødvendig udskiftning af beklædning (B4)</del>	<del>Eventuel nødvendig udskiftning af beklædning efter renoveringen (B4)</del>
		<del>Eksisterende beklædning (C3-4)</del>	<del>Eksisterende beklædning (C3-4)</del>
<b>Scenarie 2</b>	Eksisterende beklædninger erstattes i begge varianter	Eksisterende energiforbrug (B6 før)	Nyt energiforbrug (B6 efter)
		–	Ny isolering (A1-3, C3-4)
		<del>Ny beklædning (A1-3, C3-4)</del>	<del>Ny beklædning (A1-3, C3-4)</del>
		<del>Eventuel nødvendig udskiftning af beklædning efter renoveringen (B4)</del>	<del>Eventuel nødvendig udskiftning af beklædning efter renoveringen (B4)</del>
		<del>Eksisterende beklædning (C3-4)</del>	<del>Eksisterende beklædning (C3-4)</del>

I modsætning til isoleringsstudiet sammenligner vinduesstudiet to varianter af nye vinduer (Table 2). Det antages, at vinduet er slidt og skal udskiftes, hvorfor der kun medtages det scenarie. Da udskiftningen sker i begge varianter, udelades affaldsbehandlingen af de eksisterende vinduer.

Solcellestudiet tager udgangspunkt i, at bygningen ikke har solcelleanlæg i forvejen. Udgangspunktet er derfor ingen bygningsintegreret produktion af el.

**Table 2.** Scenarie for vinduesudskiftning. Her sammenlignes to renoveringsvarianter med hinanden, som begge har et lavere energiforbrug end udgangspunktet med ældre termoruder. Tabellen viser, hvilke livscyklusfaser der er medtaget i beregningen. Livscyklusfaser, som er ens og dermed ikke nødvendige i sammenligningen af varianterne, er gennemstreget.

		Variant 1	Variant 2
<b>Scenarie 1</b>	Eksisterende vinduer erstattes i begge varianter	Nyt energiforbrug (B6)	Nyt energiforbrug (B6)
		Nye 3-lags vinduer på hele facaden (A1-3, C3-4)	Nye vinduer med varierende udformning og fordeling i facaden (A1-3, C3-4)
		<del>Eventuel nødvendig udskiftning af ruder og ramme/karm efter renoveringen (B4)</del>	<del>Eventuel nødvendig udskiftning af ruder og ramme/karm efter renoveringen (B4)</del>
		<del>Eksisterende vinduer (C3-4)</del>	<del>Eksisterende vinduer (C3-4)</del>

## 2.2 Klimaeffektivitet

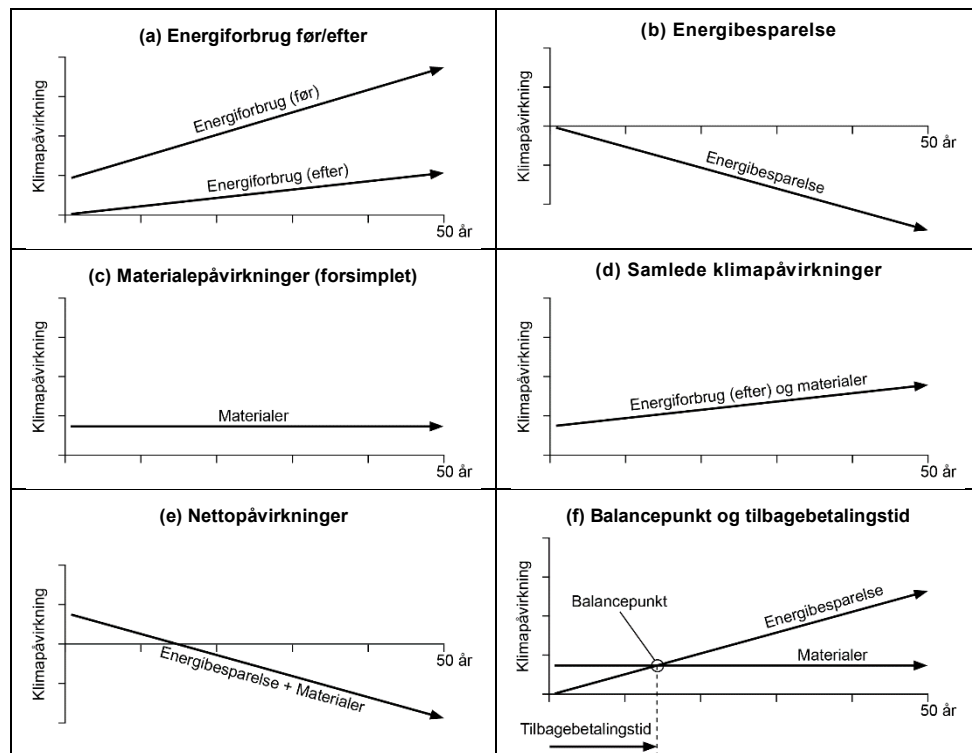
Begrebet klimaeffektivitet anvendes ofte synonymt med lav klimapåvirkning – på samme måde som energieffektivisering bruges til at beskrive en reduktion af energiforbrug. Imidlertid peger begrebet effektivitet særligt på et forhold, nemlig mellem input og output. I energieffektivisering er input mængden af tilført energi, hvor output er bygningens anvendelse eller funktion. Normalt har energieffektivisering til formål at reducere energibehovet under bibeholdelsen af den samme funktion. Nogen gange skal funktionen forbedres, eksempelvis ved

opgradering af indeklima. I begrebet klimaeffektivitet skifter fokus fra energimængden til klimapåvirkning. Udover at resultatet måles i CO<sub>2</sub>-ækvivalenter, udvides betragtningen fra energiforbrug i driftsfasen til at omfatte bygningens livscyklus, herunder klimapåvirkning fra materialer. Når denne rapport sætter fokus på klimaeffektiviteten, er det for at belyse forholdet eller balancen mellem energibesparelser og materialebrug i renoveringer.

I dag sikres den løbende energieffektivisering af eksisterende bygningers energikrav til ombygninger og ændret anvendelse i BR18 (Transport- og Boligministeriet, 2019). Krav til ombygning er forbeholdt privatøkonomisk rentabilitet, medmindre bygningsdelen udskiftes. Energikrav kan enten overholdes ved at efterleve krav til de berørte komponenter eller ved at overholde renoveringsklasser. Komponentkravene indeholder varmetabskoefficienterne for de berørte bygningsdele jævnfør BR18, § 279 og §§ 257-258. Bygningsintegreret vedvarende energiproduktion som solceller kan supplere energieffektivisering af eksisterende bygninger, for eksempel i de tilfælde, hvor muligheden for at opnå energibesparelser kan være begrænset eller bekosteligt. Vedvarende energi kan også hjælpe med at efterleve BR18-energikravene, hvis ombygningen ellers vil øge energiforbrug, eksempelvis på grund af nye facadeåbninger eller når efterisolering ville forringe mulige bevaringsværdier.

LCA ser på energirenoveringer som helhed, som både omfatter belastninger fra materialebrug (investering) og gevinster fra energibesparelser (profit). Denne tilgang er kendt fra rentabilitetsberegning af energibesparelser, som eksempelvis anvendes i Energimærkningsordningen (Klima- Energi- og Forsyningsministeriet, 2019). Til forskel for økonomi og energi ligger fokussen her på klimapåvirkning.

Det er vigtigt at definere nogle begreber for de enkelte beregningstrin og for forskellige typer resultater i vurdering af renoveringers klimaeffektivitet, se overblikket i Figur 4. Fundamentet i alle former for beregninger er energiforbruget før og efter renoveringen (a) samt klimapåvirkningen fra materialeforbruget (c). På denne basis kan der beregnes de *samlede klimapåvirkninger* (d), som er resultatet af en regulær livscyklusvurdering. Når det handler om det klimamæssige besparelspotentiale, skal energibesparelser og materialer modregnes (e). En negativt nettopåvirkning betyder en de facto besparelse i forhold til udgangspunktet og projektet anses for at være klimamæssigt rentabelt. Er nettopåvirkningen positiv, så udgør projektet en belastning og er ikke klimamæssigt rentabelt. Klimapåvirkningen efter 50 år fortæller imidlertid ikke, hvornår den samlede energibesparelse begynder at udligne påvirkninger fra materialebrug, det vil sige, hvornår der opnås en balance mellem energi og materialer. Dette tidspunkt skal kaldes *balancepunktet* (f). Den *klimamæssige tilbagebetalingstid*, herefter kaldt tilbagebetalingstid, er indikator for, hvor hurtigt der opstår klimamæssige netto-besparelser.



**Figur 4.** Hovedbegreber i vurdering af renoveringers klimateffektivitet. Udgangspunktet er beregning af klimapåvirkning for energibesparelse (a, b) og materialebrug (c) til renoveringen. Den regulære LCA-metode for renoveringer efter FBK (d) viser klimapåvirkningen af bygningen fra tidspunktet af renoveringen og 50 år frem. Derimod angiver nettopåvirkninger (e) det klimamæssige forbedringspotentiale i en renovering og beregnes som sum af energibesparelsen og materialerne. For at opnår balancepunktet (f) er det nødvendigt at tegne energibesparelsen som positivt tal. Tidsrummet frem til balancepunktet svarer til tilbagebetalingstiden, før en renovering faktisk forbedrer bygningens klimapåvirkning.

Ved materialer med kortere levetider end betragtningsperioden og deraf resulterende udskiftninger, kan nettobalancen svinge mellem rentable og ikke rentable perioder. Når der opstår flere balancepunkter i løbet af betragtningsperioden som følge af udskiftninger, tildeles der én tilbagebetalingstid til hver cyklus. Det gælder eksempelvis vinduesruder og solceller. Det skal også bemærkes, at den almindelige LCA-metode anvender et statisk scenarie for materialepåvirkninger. Det betyder, at fremtidige materialepåvirkninger forbundet med udskiftninger og affaldsbehandling beregnes med forudsætninger fra i dag. Det betyder sandsynligvis en overvurdering af disse påvirkninger, da den kommende udvikling af teknologi og energisystemer kan medføre reducerede materialepåvirkninger. En sådan dynamisk LCA-tilgang kunne bidrage til mere retvisende fremtidsscenerier, især med henblik på vinduer og solcelleanlæg, som udskiftes i kortere cyklusser.

Det skal understreges, at klimamæssig rentabilitet ikke kan eller ønskes opnået i alle renoveringer. Det gælder for eksempel bygninger, som allerede er energieffektive eller for renoveringer, hvis formål ikke primært er klimateffektivisering. Selv om nogle projekter eller tiltag vil have en rentabilitet først efter mere end 50 år eller slet ikke kan opnå nettobesparelser, er det stadig relevant at udføre byggearbejder så klimateffektivt som muligt for at undgå unødvendige klimapåvirkninger i fremtiden.

## 2.3 Overblik over analyser

Rapporten rummer analyser af tre forskellige renoveringstiltag: Efterisolering, vinduesudskiftning og opsætning af solceller. Princippet for vurdering af nettopåvirkninger gælder for alle tiltag, men metoden er tilpasset i detaljerne, da beregningsforudsætningerne ikke helt er

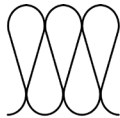

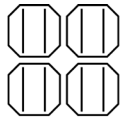

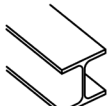
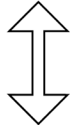

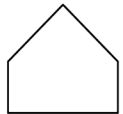
ens. Som illustreret i Figur 5, indgår der forskellige elementer i balancen mellem energi og materialer. Isolering og vinduer har begge et varmetab gennem materialerne, men vinduer medfører derudover et varmetilskud. I beregningen af materialepåvirkninger medtages for efterisolering både selve isoleringen og øvrige materialer for at efterisolere klimaskærmen, herunder udvendig tag- og facadebeklædning, gulve og underkonstruktioner. Ved vinduer er rammen, karm og ruden medtaget. For solceller modregnes deres elproduktion med materialepåvirkninger fra panelet og, for de tilfælde hvor det er inkluderet i datasættene, både panelet, inverteren og stativ til opsætning.

Scenarier for beregning af nettopåvirkninger svarer til en situation før og efter renovering. For isolering antages der tre forskellige udgangspunkter for hver bygningsdels eksisterende isolans, som svarer til historiske krav i bygningsreglementet. Disse kombineres med situationen efter renoveringen, som ligeledes opnår tre forskellige højere niveauer af isolans.

I analysen af vinduer tages udgangspunkt i ældre termovinduer fra 1990'erne, der er modne til udskiftning. I udgangspunktet antages disse udskiftet til 3-lags vinduer, men i de forskellige scenarier undersøges det, om det ud fra et klimamæssigt perspektiv er mere rentabelt at anvende 2-lags vinduer eller kombinationer af 2-lags- og 3-lags vinduer.

Udgangspunktet for opsætning af solceller er, at der ikke er installeret solcellepaneler før. De nye paneler kan være henholdsvis monokrystallinske, polykrystallinske eller tyndfilm-solceller.

Løsninger for efterisolering beregnes både i en komponentanalyse og case-analyse. Vinduer betragtes udelukkende som del af en bygning, mens solceller analyseres uafhængigt af en konkret bygning. Eksempelbygninger er et enfamilieshus, en rækkehusbebyggelse og en etageejendom, opført i henholdsvis 1957, 1958 og 1980.

		 Isolering	 Vinduer	 Solceller
Balance	 Energi	Varmetab	Varmetab Varmetilskud	Energiproduktion
	 Materialer	Isolering, supple- rende materialer, beklædning	Ramme, karm, rude	Panel (inverter, stativ)
Sammenligning	Udgangspunkt	Eksisterende isoleringsniveauer BR77, BR61 og før BR-energikrav	Udskiftning med ny 3-lags vindue	Ingen solceller
	 Variant	3 niveauer af efterisolering	Nyt vindue med varierende egenskaber	Nye solceller
Skala	 Komponent	1m <sup>2</sup> bygningsdel (graddøgns- metode)	—	1m <sup>2</sup> solcellepanel
	 Bygning	Case-analyse (energiramme- metode)	Variation af ramme/karm, glaslag, orientering (energiramme- metode)	—

Figur 5. Analyserne i hovedtræk



# EFTERISOLERING

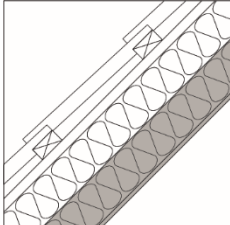
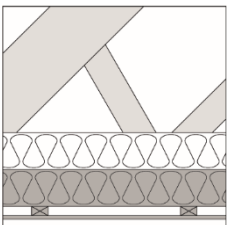
# 3 EFTERISOLERING

## 3.1 Metode

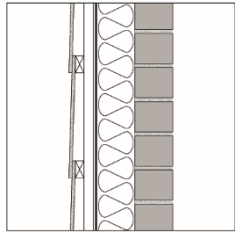
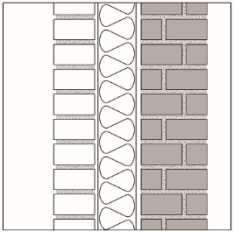
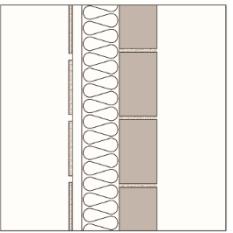
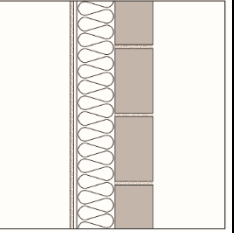
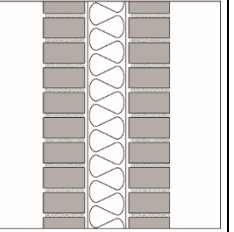
### 3.1.1 Generel

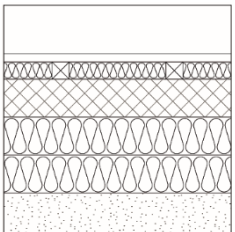
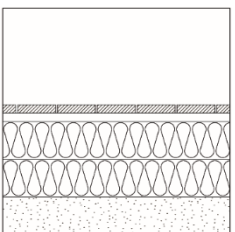
Analysen undersøger klimamæssige tilbagebetalingstider for efterisolering af tage, ydervægge og terrændæk. Der tages udgangspunkt i forskellige niveauer for eksisterende isoleringsforhold, som kombineres med forskellige grader af ny, samlet isoleringsmængde. Analyserne er delt op i de to skalaer komponent og bygning med hver deres metodiske tilgang. Komponentstudiet undersøger 10 isoleringstiltag for et udsnit af 1 m<sup>2</sup> af klimaskærm (Tabel 3). Klimaskærmens eksisterende isoleringsniveauer afspejler et udsnit af boligbyggeri opført før 1980'erne. Isoleringstiltagene og deres isoleringsniveauer, som kombineres med disse eksisterende isoleringsniveauer, afspejler en bred vifte af mulige renoveringsløsninger.

**Tabel 3:** Isoleringstiltag og -form for tage (a), ydervægge (b) og terrændæk (c). Isoleringsslaget indeholder isoleringen og givetvis supplerende materialer. Isoleringstiltag kan udføres i en eller flere Isoleringsformer (granulat, fleksibel, stabil). Materialer er opdelt i isoleringslag og beklædning. De grå flader i ikonerne indkærer uændrede komponenter.

		(a) Tage			
		T1 Skråtag	T2 Loft	T3 <sub>1</sub> Fladtag (varmt tag)	T3 <sub>2</sub> Fladtag (koldt tag)
Isoleringslag	Granulat	 Isolering mellem tagspær, givetvis påføringspær	 Vandret isolering i uopvarmet loftsrum	—	Indblæst løsfyld i nyt bjælkelag på eksisterende tagpap (ventileret)
	Fleksibel			—	Isoleringsmätte i nyt bjælkelag på eksisterende tagpap (ventileret)
	Stabil			Trykfast isolering på eksisterende tagpap	—
Beklædning		Tagsten, lægter, undertagsmembran	—	2 lag tagpap	2 lag tagpap, krydsfinerplade

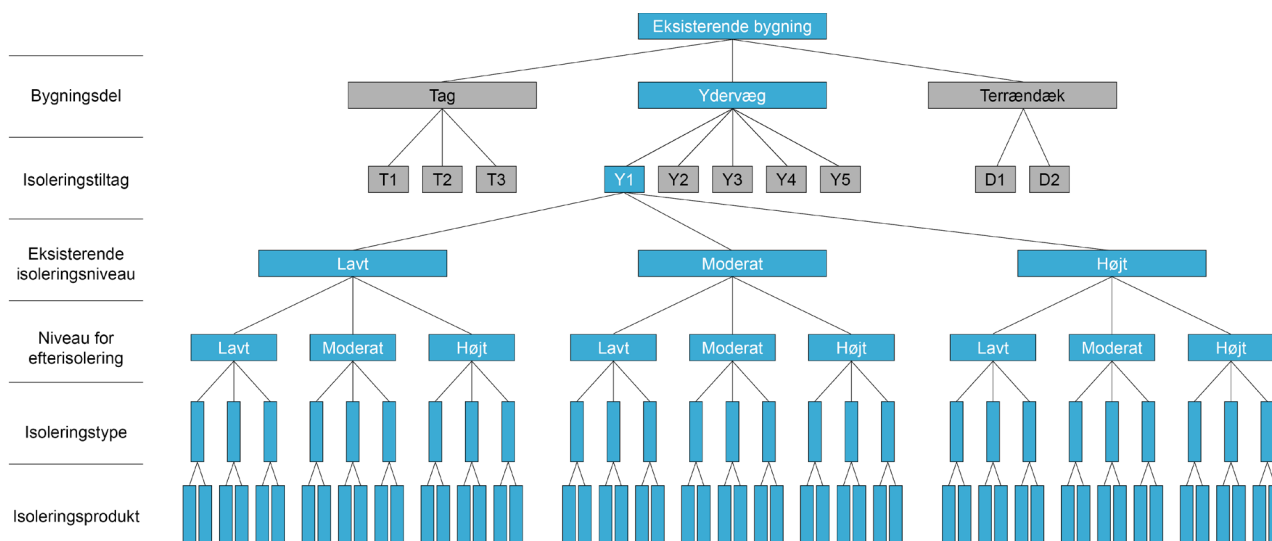
Fortsat Tabel 3.

		<b>(b) Ydervægge</b>				
		<b>Y1 Ventilert</b>	<b>Y2 Formur</b>	<b>Y3 Selvbærende</b>	<b>Y4 ETICS</b>	<b>Y5 Hulmur</b>
						
<b>Isoleringslag</b>	Granulat	Isolering mellem træstolper				Indblæst isolering
	Fleksibel					-
Stabil	Isoleringsblokke til skalmur	Stabil isoleringsplade, klemt på vægge med stærke trælist	Stabil isoleringsplade som underlag til pudsning	-		
<b>Beklædning</b>	Fibercementplader, afstandslister, vindspærre, fastgørelsesmidler	Teglsten, kalkcementmørtel, murbinder	Fibercementplader, afstandslister, fastgørelsesmidler	Tyndpuds, glasfibervæv, fastgørelsesmidler	-	

		<b>(c) Terrændæk</b>	
		<b>D1 Tungt</b>	<b>D2 Let</b>
			
<b>Isoleringslag</b>	Stabil	Trykfast isolering under betondæk, afsluttet med brædegulv på strøer	Trykfast isolering under gulvspånplade, afsluttet med brædegulv
<b>Beklædning</b>		Gulvbrædder, armeret beton 100 mm, dampspærre, strøer med isolering	Gulvbrædder, gulvspånplade, underlag/underpap, dampspærre

Figur 6 viser, hvilke parametre der varierer i komponentstudiet som trin i et flowdiagram. Øverst er de tre undersøgte komponenter tage, ydervægge og terrændæk med en variation af eksisterende U-værdier. Alle disse niveauer kombineres med forskellige niveauer af efterisolering på det næste trin. Disse parametre kobles til et udvalg af forskellige isoleringstyper. Herefter knyttes isoleringstyperne til isoleringsprodukter, som er tilgængelige på det danske

marked. Produkterne repræsenteres af EPD og generiske miljødata. Nogle isoleringsprodukter kan desuden være delt op med hensyn til varmeledningsevne.



**Figur 6.** Skematisk oversigt over variation af parametre isoleringsstudiet. Her vises udsnit for isoleringstiltag Y1 med blå markering som eksempel. Antallet af isoleringstyper og –produkter er angivet som illustration og vil variere for de specifikke isoleringstiltag.

Case-analysen viser derimod kombinationer af isoleringstiltag i en renovering. Samtidig illustreres indflydelsen af bygningstypologien på tilbagebetalingstiden. Der benyttes samme datagrundlag og parametervariation som i komponentanalysen, dog under anvendelse af energirammemetoden i stedet for graddøgnmetoden. Bygningseksemplerne er nærmere beskrevet i Bilag 5.

Resultat afsnittet fokuserer på en mere overordnet betragtning af de mange parameterkombinationer, mens de detaljerede resultater findes i Bilag 2. Tabel 4 giver en oversigt over de forskellige typer resultater. Delresultater for isoleringstiltag og -typer afviger kun i detaljeringsgrad, det vil sige på hvilket niveau graferne sammenfatter resultater. Delresultater for isoleringsprodukter viser alle individuelle datapunkter, men ikke sammenfattende grafer. Case-analysen anvender kun et udvalg af isoleringsniveau, isoleringstype og detaljeringsgrad ud over metodevalg for energiberegning.

**Tabel 4.** Metodisk afgrænsning af de fire delresultater for efterisolering. Identiske egenskaber er indikeret med samme gråtone.

Afgrænsning ↓	Isoleringstiltag Afsnit 3.2.1	Isoleringstyper Afsnit 0	Isoleringsprodukter Bilag 2	Case-analyse Afsnit 3.2.3
Metode til energiberegning	Graddøgn	Graddøgn	Graddøgn	Energiramme
Detaljeringsgrad	Tiltag (middel / spænd)	Type (middel / spænd)	Produkter (alle resultater)	Tiltag (middel)
Udvalg af isoleringstyper	Kun typiske	Kun typiske	Alle typer	Kun typiske
Isoleringsniveau før renovering (se Tabel 7)	Lavt, moderat, højt	Lavt, moderat, højt	Lavt, moderat, højt	Lavt
Isoleringsniveau efter renovering (se Tabellerne 5-6)	Moderat	Moderat	Lavt, moderat, højt	Moderat
Beklædninger	Med / uden	Med / uden	Med / uden	Med

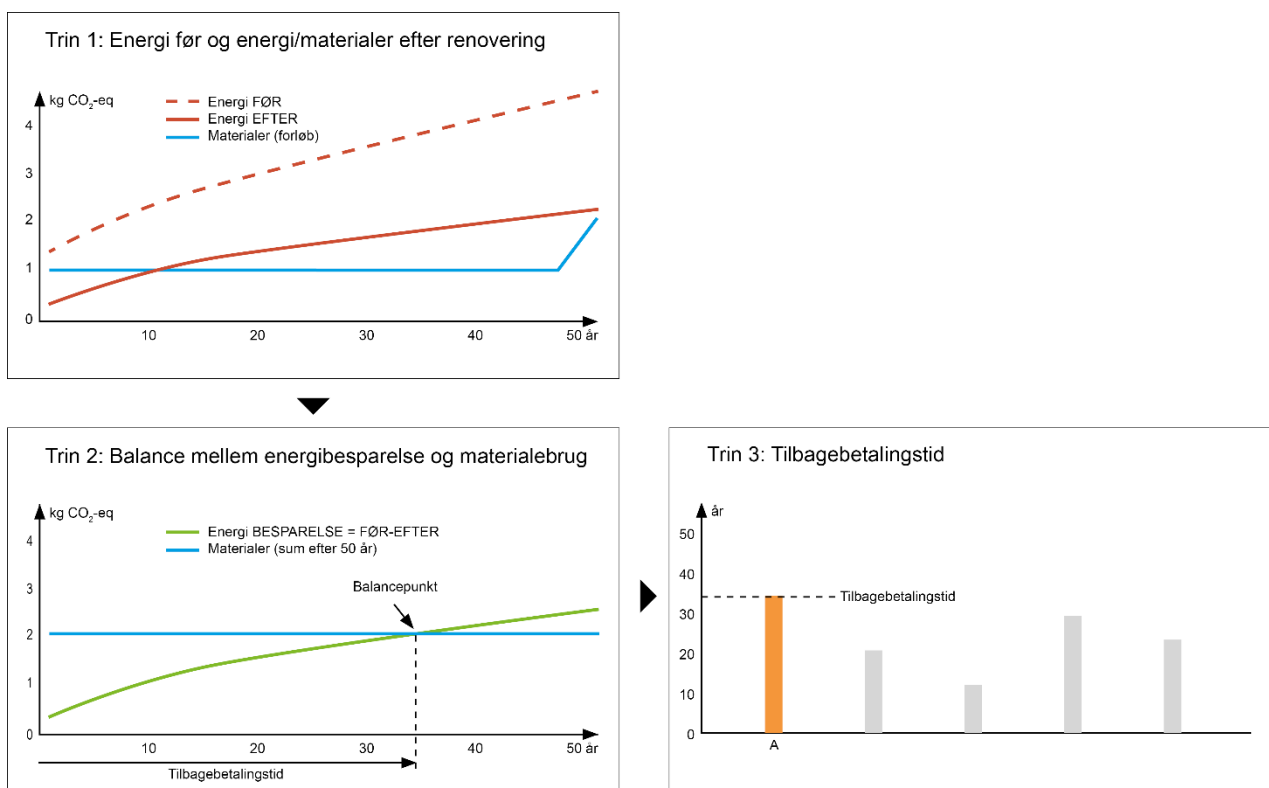
### 3.1.2 Nettopåvirkning og klimamæssig tilbagebetalingstid

Resultater i isoleringsstudiet er baseret på LCA, men er angivet som klimamæssig tilbagebetalingstid (Figur 7). I et første trin beregnes klimapåvirkningen af energibehov før renoveringen og for energibehov og materialer efter renoveringen. De to røde kurver indikerer forskellen mellem energiforbrug før og efter og dermed energibesparelsen. Mens energiforbruget ville forløbe som en lige linje, er kurven for den relaterede klimapåvirkning let aftagende. Det skyldes den stigende andel vedvarende andel i energiforsyningen over de kommende år.

Efterisoleringen medfører imidlertid påvirkninger knyttet til de anvendte materialer, herunder selve isoleringsmaterialet og en eventuel ny beklædning af konstruktionen (blå kurve). I studiet forekommer der ingen udskiftninger. Det skyldes til dels, at levetiden for materialerne i isoleringslaget er mindst 50 år. Derudover medtages ikke udskiftninger af beklædninger, fordi der ville forekomme udskiftninger både i udgangspunktet og det renoverede scenarie, som ville udligne sig i rentabilitetsbetragtningen.

I trin 2 er energiforbruget før og efter slået sammen som en kurve for energibesparelsens klimapåvirkning. Den blå linje angiver materialers klimapåvirkning over 50 år. Forsimplende er materialepåvirkninger fra hele deres livscyklus antaget at være sket i starten. På denne måde opnås der et entydigt skæringspunkt mellem besparelser og belastning, som udgør balancepunktet.

Samtlige materialepåvirkninger er beregningsmæssigt antaget at være sket i første år og ligger på dette niveau uændret i hele perioden. Denne forsimpelse er valgt for at definere et entydigt balancepunkt og dermed tilbagebetalingstid. Som konsekvens fremgår der ikke, hvilken andel af materialepåvirkninger der opstår ved produktion og affaldsbehandling efter endt levetid. Trin 3 viser tilbagebetalingstiden som et årstal, det vil sige hvornår der opnås en nettobesparelse.



Figur 7: Trin-for-trin beregningsmetode for tilbagebetalingstid.

### 3.1.3 Komponentanalysen

Energibesparelsen for 1 m<sup>2</sup> bygningsdel før og efter renovering. Varmebehovet er den mængde energi, som bliver tabt fra rummet gennem konstruktionen. U-værdi og kuldebroer før og efter bestemmes i henhold til DS 418. I beregning af varmetabet indgår alle kuldebroer for den berørte bygningsdel. Da kuldebroers længde afhænger af bygningsgeometrien, er der bestemt en middelværdi ud fra de tre bygningseksempler. Ydervæggens U-værdier før og efter indeholder kuldebroer omkring facadeåbninger jævnfør DS 418. Der anvendes graddøgnsmetoden med 3.765 graddage pr. år og en indetemperatur på 20 °C (Mortensen, Kanafani, Rose, & Hjorth Richter, 2018) efter formlen:

$$\Delta\Phi_{konstruktion} = (U_{før} - U_{efter}) * 90,36 [kWh/m^2/år]$$

$$\Delta\Phi_{kuldebroer} = (\Psi_{før} - \Psi_{efter}) * 90,36 [kWh/m^2/år]$$

hvor energibesparelsen for konstruktionen og kuldebroen ( $\Delta\Phi$ ) er lige med differencen af U-værdi før og efter ganget med en faktor for antal gradtimer.

Komponenterne bliver isoleret svarende til tre nye isoleringsniveauer (Tabel 5) med undtagelse af hulmursisolering (Tabel 6). Niveauerne skal repræsentere et spænd over typiske isoleringsmængder ved renoveringer. BR18 stiller krav til økonomisk rentable energibesparelser ved ombygninger henholdsvis ændret anvendelse. Disse niveauer svarer til de mere ambitionerede niveauer i analysen. Dertil kommer mindre isoleringsmængder, som erfaringsmæssigt finder anvendelse som resultat af bygningsreglementets forbehold for privatøkonomisk rentabilitet. Som undtagelse er der valgt to lempeligere U-værdier til terrændæk. Det skyldes fundamenternes kuldebroer, som skal inkluderes i beregning af terrændækkets U-værdi efter DS418. Da disse kuldebroer er ganske betydende i de valgte eksempelbygninger, kan bygningsreglementets U-værdi ikke opnås med en hensigtsmæssig isoleringsmængde.

**Tabel 5:** Ny U-værdier efter renovering (samlet bygningsdel).

Efterisoleringsniveau	Tag	Ydervægge	Terrændæk
Lavt	0,22 (indenfor spær højde)	0,20	-
Moderat	0,15	0,18	0,17
Højt	0,12	0,15	0,15
BR18 ombygninger (§ 279)	0,12	0,18	0,10
BR18 ændret anvendelse (§ 268)	0,12	0,15	0,10

Hulmursisoleringens U-værdier efter renovering afviger fra øvrige tiltag, da hulrummet og dermed den mulige isoleringstykkelse, er geometrisk fastlagt (Tabel 6). Hulmursisolering tager udgangspunkt i tre størrelser af hulrum. Yderligere er disse henholdsvis uisolering (50 mm) eller fyldt med ældre isolering (75 og 130 mm) for at vise et større spænd af varierende forudsætninger i eksisterende bygninger. Et tomt hulrum giver en meget kort tilbagebetalingstid på under 1 år for efterisolering uanset valg af isoleringsprodukt. Det gælder derimod ikke, hvis hulrummet er fyldt med gammel isolering. For også at vise dette scenarie, antages det for de to større hulrum, at den gamle isolering suges ud af hulmuren ved renovering og erstattes med nyt indblæst isolering.

**Tabel 6.** Hulmursisolering Y5: Ny U-værdi *efter* indblæsning af isoleringsgranulat, som afviger fra de øvrige tiltag. Eksisterende isolering fjernes i givet fald ved udsugning inden efterisolering.

Efterisoleringsniveau	Mellemrum [mm]	U-værdi før renovering [W/m <sup>2</sup> K]	U-værdi efter renovering [W/m <sup>2</sup> K]
Lavt	50	1,48 (tomt hulrum)	0,5
Moderat	75	0,58 (lambda 045)	0,4
Højt	130	0,34 (lambda 045)	0,25

Udgangspunktet *før* renovering er ligeledes opdelt i tre forskellige isoleringsniveauer for klimaskærmen. Det laveste niveau står for de bygninger, som ikke var underlagt nogle isoleringskrav. Det moderate niveau overholder de første isoleringskrav i BR61, som allerede betyder en markant forskel, mens det høje niveau svarer til krav i BR77 (Tabel 7).

**Tabel 7:** U-værdier før renovering i den eksisterende konstruktion.

Tage				
Isoleringsniveau		Lavt	Moderat	Højt
Valgt U-værdi [W/m <sup>2</sup> K]	Skråt tag (isolering af skrå flade)	0,61	0,35	0,19
	Skråt tag (loftisolering)	0,68	0,37	0,19
	Fladt tag (isolering på eks. tagpap) <sup>(1)</sup>	0,60	0,34	0,19
Energikrav, som U-værdi er valgt ud fra		Inden BR energikrav U > 0,4	BR61 U ≤ 0,4 (Tagflade) U ≤ 0,5 (Loftisolering)	BR77 U ≤ 0,2
Eksempler (Enfamiliehus, Rækkehus og etageboliger)		Tagtegl 175 mm spær 50 mm isolering	Tagtegl 175 mm spær 100 mm isolering	Tagtegl 175 mm spær 200 mm isolering
		50 mm isolering 175 mm bjælkelag	100 mm isolering 175 mm bjælkelag	200 mm isolering 175 mm bjælkelag
		Tagpap 50 mm isolering 175 mm bjælkelag	Tagpap 100 mm isolering 175 mm bjælkelag	Tagpap 200 mm isolering 175 mm bjælkelag
Ydervægge				
Isoleringsniveau		Lavt	Moderat	Højt
Valgt U-værdi [W/m <sup>2</sup> K] <sup>(1)</sup>		1,48	0,58	0,34
Linjetabskoefficient ved vinduer/døre [W/mK] <sup>(1)</sup>		0,03		
Energikrav, som U-værdi er valgt ud fra		Inden BR energikrav (tung væg) U > 1,1	BR61 (tung væg) U ≤ 1,1	BR77 (tung væg) U ≤ 0,4
Eksempler	Enfamiliehus Rækkehus	108 mm bagmur, tegl 50 mm hulrum 108 mm formur, tegl	108 mm bagmur, tegl 75 mm isolering 108 mm formur, tegl	100 mm bagmur, gasbeton 130 mm isolering 108 mm formur, tegl
	Etagebolig	360 mm teglmur	120 mm bagplade, beton 50 mm isolering 100 mm forplade, beton	120 mm bagplade, beton 100 mm isolering 100 mm forplade, beton
Terrændæk				
Isoleringsniveau		Lavt	Moderat	Højt
Valgt U-værdi [W/m <sup>2</sup> K] <sup>(1)</sup>		0,59	0,38	0,29
Linjetabskoefficient ved randfundamenter [W/mK]		0,83		
Linjetabskoefficient ved skillevægsgfundamenter [W/mK]		0,09		
Energikrav, som U-værdi er valgt ud fra		Inden BR energikrav U > 0,4	BR61 U ≤ 0,4 (mod jord) U ≤ 0,5 (mod krybekælder)	BR77 U ≤ 0,3
Eksempler (Enfamiliehus, rækkehus, etageboliger)		Trægulv på strøer ingen isolering Betondæk Jord	Trægulv på strøer 50 mm isolering Betondæk Kapillarbrydende lag	Trægulv på strøer 100 mm betondæk 100 mm trykfast Kapillarbrydende lag

(1) Gennemsnit af alle tre bygningscases

### 3.1.4 Case-analysen

I case-analysen beregnes tilbagebetalingstiderne for efterisolering anvendt på konkrete bygningseksempler i stedet for et generisk udsnit af klimaskærmen som i komponentanalysen. Definition af komponenter og variation af parametre er identisk med komponentanalysen, men energibesparelsen beregnet med energirammemetoden Be18 (Aggerholm, 2018).

Case-analysen skal give eksempler på tilbagebetalingstider for forskellige former og grader af efterisolering af typiske boligbyggerier. Derudover bliver komponentanalysen verificeret med den energirammemetoden, som normalt anvendes i projektering af dybe renoveringer. Til sidst giver energirammemetoden mulighed for at teste indflydelsen af varmekilde på resultatet i følsomhedsanalysen. I case-analysen anvendes altid det samme udgangspunkt til alle beregninger og der varieres kun, hvilke af de 10 isoleringstiltag der kombineres. Udgangspunktet for de ikke-varierede komponenter er et lavt eksisterende isoleringsniveau. Modeldokumentationen for Be18 beregningerne findes i Bilag 1.

Bygningseksemplerne omfatter et enfamilieshus fra 1957, en rækkehusbebyggelse fra 1958 og en etageejendom fra 1980. Eksemplerne er primært valgt for at repræsentere et spænd af geometriske egenskaber såsom arealer af klimaskærmskomponenter og længden af kuldebroer og deres indflydelse på resultater. I stedet for at vælge mange flere cases for at afspejle variationen af mulige U-værdier i den eksisterende bygningsmasse, anvendes også her komponentanalysens tre teoretiske isoleringsgrader. Bygningseksemplerne er nærmere dokumenteret i Bilag 5.

### 3.1.5 Miljødata for isoleringsprodukter

Tabellerne 19-20 viser de miljødata for isolering, som er anvendt i dette studie. De undersøgte isoleringsmaterialer er kategoriseret i isoleringstype og isoleringsprodukt. Isoleringstype er den kategori, man oftest betegner som materiale, men som rent faktisk kan indeholde flere materialer. *Isoleringsprodukt* betyder en specifik byggevare, som forhandles på markedet. EPD kan både referere til isoleringstyper, som typisk udgives af brancheforeninger, eller produkter udgivet af isoleringsproducenter. I dette studie er begge muligheder sammenfattet under kategorien EPD. Både EPD'er og generiske data følger den europæiske standard EN 15804 (CEN/TC350, 2014, 2019) for miljøvaredeklarationer.

Der er valgt de isoleringstyper, som generelt anvendes i et vist omfang i dansk byggeri, selvom der findes mange flere. Typerne er anvendt i de isoleringstiltag, hvor det teknisk er muligt. Dette indebærer også utypiske kombinationer, herunder pladeformet isolering mellem tagspær, for at demonstrere en bred variation af anvendelsesmuligheder. Hovedresultaterne er dog baseret på de typiske anvendelser, mens øvrige kombinationer kun fremgår de detaljerede resultater i Bilag 2. De typiske anvendelser fremgår Bilag 1.

Af dette udvalg af isoleringstyper er der medtaget alle tilgængelige tredjepartsverificerede EPD (Bilag 1: Tabel 19) samt generiske data fra Ökobaudat (Bilag 1: Tabel 20). Som en undtagelse inkluderes et opdateret, foreløbigt datasæt for stenuld. Match mellem isoleringsprodukter og EPD samt definition af typisk anvendelse er bestemt i et samarbejde med de berørte isoleringsproducenter. De valgte isoleringsprodukter indeholder ikke belægnings af fx aluminiumsfolie til at forbedre isoleringsevnen.

I isoleringsstudiet er der ikke taget hensyn til øvrige funktionsmæssige begrænsninger som fugt, brand og akustik, som vil gøre sig gældende i byggepraksis.

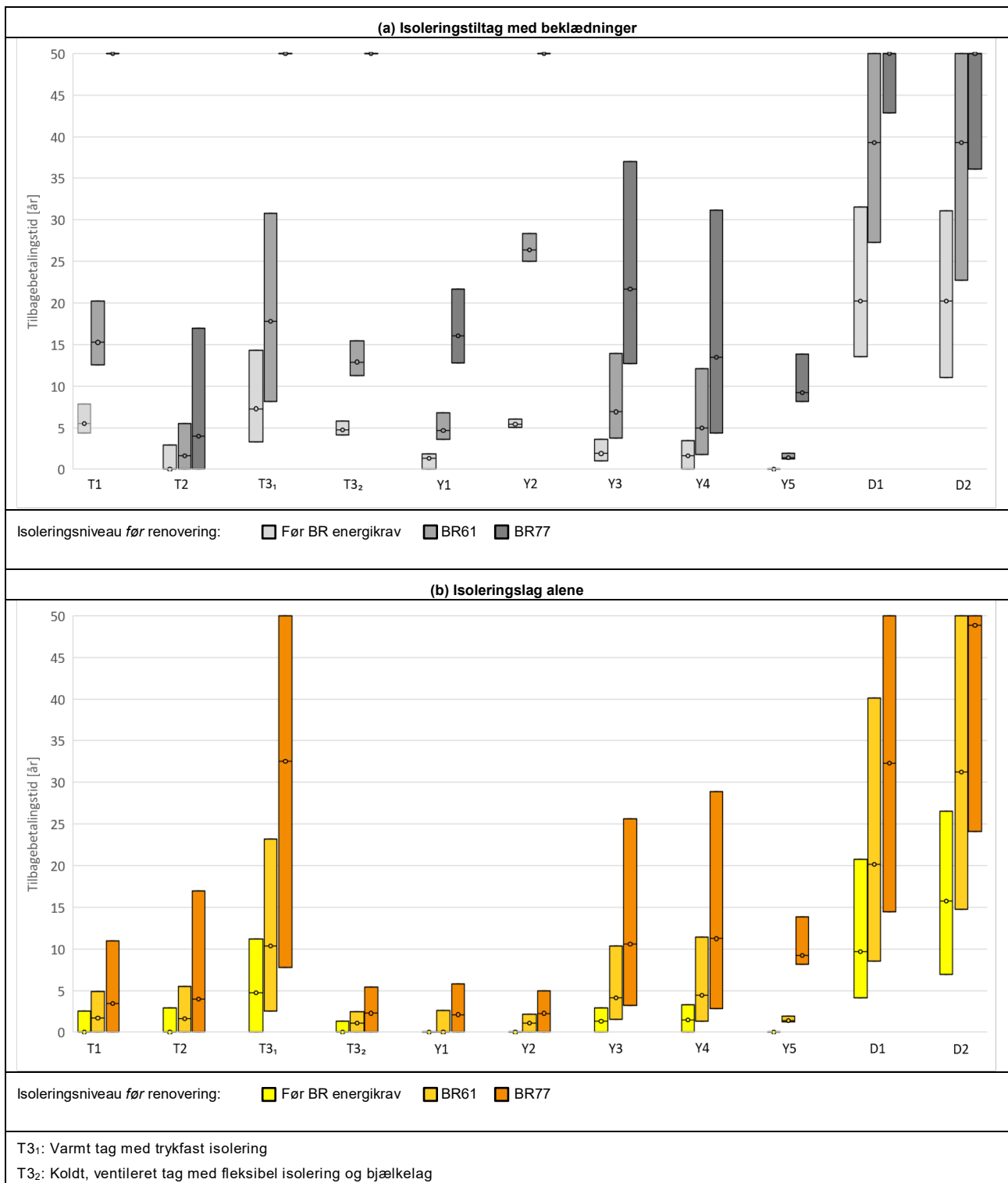
## 3.2 Resultater og diskussion

### 3.2.1 Isoleringstiltag

De sammenfattende resultater for hvert af de 10 undersøgte renoveringstiltag er vist i Figur 8. Her kan man se, at alle tiltag har en delmængde af resultater, som ligger under 25 år, hvis man betragter isoleringslaget alene (b). Det er tydeligt, at spændet af tilbagebetalingstiderne bliver større, jo bedre udgangspunktet af den eksisterende konstruktion er. Det specifikke produktvalg får altså større indflydelse i takt med ringere rentabilitet.

Den øverste graf (a) viser, at resultaterne for tiltag med beklædninger er tydelig påvirket af de yderligere materialepåvirkninger, som skal tjenes hjem over en længere periode. Upåvirket er tiltagene T2 og Y5, som ikke indebærer yderligere beklædning, mens Y3 og Y4 kun er let påvirket. Generelt har alle andre tiltag en god rentabilitet på under 15 år for nogle produkter ved det dårlige udgangspunkt, en moderat til lang tilbagebetalingstid for det moderate udgangspunkt og en lang tilbagebetalingstid eller over 50 år ved det bedste udgangspunkt. For fire tiltag (T1, T3<sub>1</sub>, T3<sub>2</sub> og Y2) ligger tilbagebetalingstiden for efterisolering af et allerede godt isoleringsniveau over 50 år.

Bortset fra loftsisolering, som er rentabel for alle udgangspunkter, er efterisolering af tage kun rentabelt for det lave og moderate udgangspunkt, når man medregner tagbeklædningen. Ydervægsisolering er næsten altid rentabelt, bortset fra isolering af et godt eksisterende isoleringsniveau med en ny formur Y2. Ved terrændæksisolering udgør isoleringslaget allerede en stor andel af klimapåvirkningen. Det gælder især for D2 uden trykfordelende betonplade. D1 med beton har derfor kun lidt længere tilbagebetalingstider. Samlet set findes rentable løsninger inden for terrændæksisolering ved alle udgangspunkter, men også store spænd og ikke-rentable produkter indenfor 50 år.



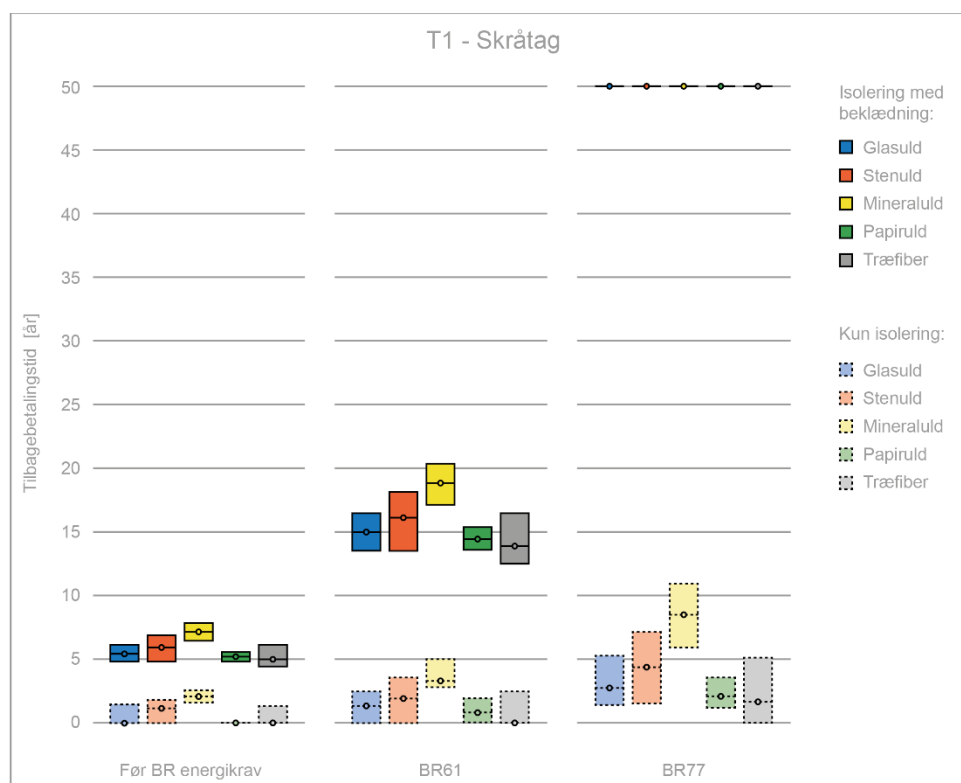
**Figur 8.** Tilbagebetalingstider af alle isoleringstiltag. De enkelte isoleringsprodukter og generiske miljødata vises som middelværdi (streg med cirkel) og henholdsvis højeste og laveste værdi (den øvre og nedre kant af kassen). Isoleringstiltag med beklædninger (a) indeholder alle materialer (a). I den nedre graf (b) medregnes kun materialer fra isoleringslaget, det vil sige isoleringsmaterialet og eventuel understøttende konstruktioner som eksempelvis træskelet. Værdier over 50 år er skåret fra.

## 3.2.2 Isoleringstyper

### T1 – Skråtag

Efterisolering af skråtag udefra er kendetegnet ved en stor andel af tagbeklædning i de samlede resultater (Figur 9). De typiske isoleringsmaterialer, som er medtaget i beregningen, er fleksible måtter og indblæst granulat. Resultater for den samlede pakke af isoleringen med beklædning af tagtegl viser god rentabilitet ved et lavt og moderat udgangspunkt, mens efterisolering af det høje eksisterende isoleringsniveau ikke er rentabelt. Uden tagbelægning er tilbagebetalingstider korte ved alle udgangspunkter.

Tagbeklædningens bidrag til materialepåvirkninger kan influeres i begrænset omfang ved materialevalg, se også afsnit 3.3.1. Ved mulighed for at omlægge og genbruge den eksisterende tagbeklædning, ville der kunne opnås en væsentlig bedre rentabilitet. Træuld har de laveste minimum- og middelværdier, mens stenuld har de højeste. Spændet inden for hver Isoleringstype samt typerne imellem er dog meget lille. Mineraluld, det vil sige de generiske data for en blanding af glas- og stenuld, stikker ud som den højeste. Det tyder på, at de generiske data overvurderer påvirkningerne sammenlignet med EPD'erne og er dermed ikke retvisende til brug i dette tiltag. Det fremgår af resultater på produktniveauet (Bilag 2), at de mindre typiske, hårde isoleringsplader har markant længere tilbagebetalingstider.

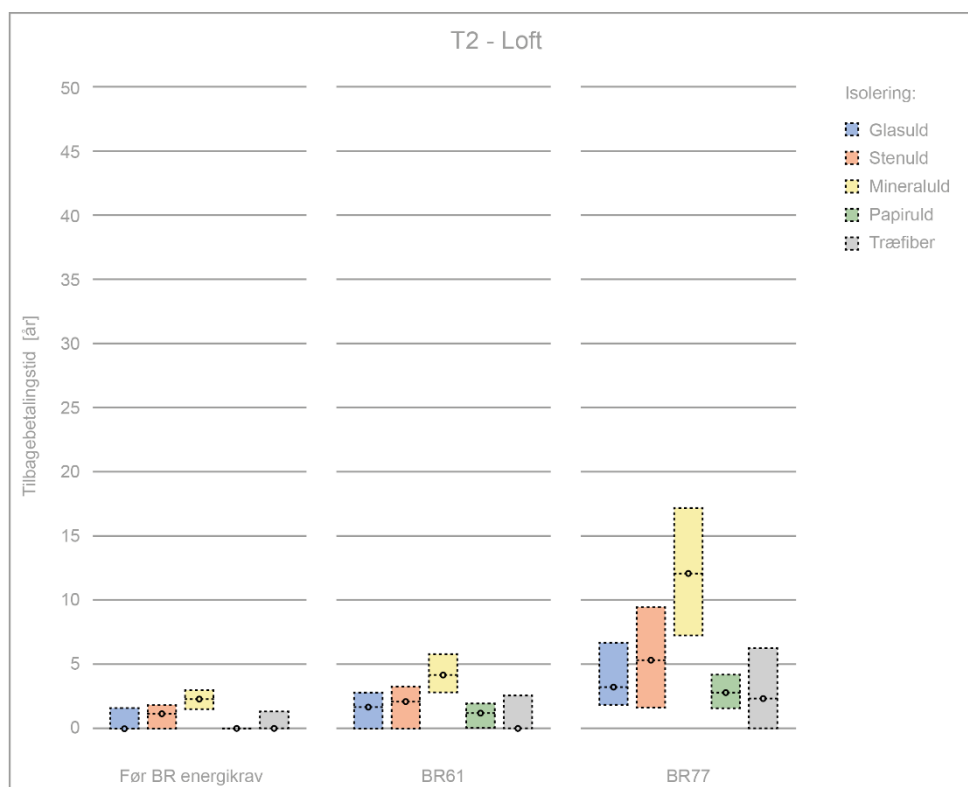


**Figur 9.** Tilbagebetalingstid for tagisolering T1, angivet for isoleringstyper og tre eksisterende isoleringsniveauer før renovering. Resultater er vist for et moderat efterisoleringsniveau, både med beklædning (gennemgående linje) og for isolering alene (stiplet linje). Hvor der indgår flere end ét datasæt i isoleringstypen, vises en kasse for laveste og højeste tilbagebetalingstid samt middelværdi som strek med kreds. Variation af *Mineraluld* svarer til de generiske datasæt for en 50/50% blanding af sten- og glasuld. Der er kun medtaget de isoleringstyper, som er typiske for T1.

### T2 – Loft

Efterisolering af loft (Figur 10) kræver ikke ny tagbeklædning og er rentabel ved alle tre udgangspunkter. Mineraluld baseret på generiske datasæt fra Ökobaudat viser igen de højeste værdier og kan derfor mindre repræsentative for dette tiltag. Forholdet mellem isoleringsty-

perne svarer ellers til skråtagisoleringen T1. De typisk anvendte fleksible isoleringsmaterialer har korte tilbagebetalingstider ved alle udgangspunkter, hvis man ser bort fra det generiske mineraluld.



**Figur 10.** Tilbagebetalingstid for tagisolering T2, angivet for isoleringstyper og tre eksisterende isoleringsniveauer for renovering. Resultater er vist for et moderat efterisoleringsniveau for isolering alene (stiplet linje). Hvor der indgår flere end ét datasæt i isoleringstypen, vises en kasse for laveste og højeste tilbagebetalingstid samt middelværdi som streg med kreds. Variation af *Mineraluld* svarer til de generiske datasæt for en 50/50% blanding af sten- og glasuld. Der er kun medtaget de isoleringstyper, som er typiske for T2.

### T3 – Fladtag

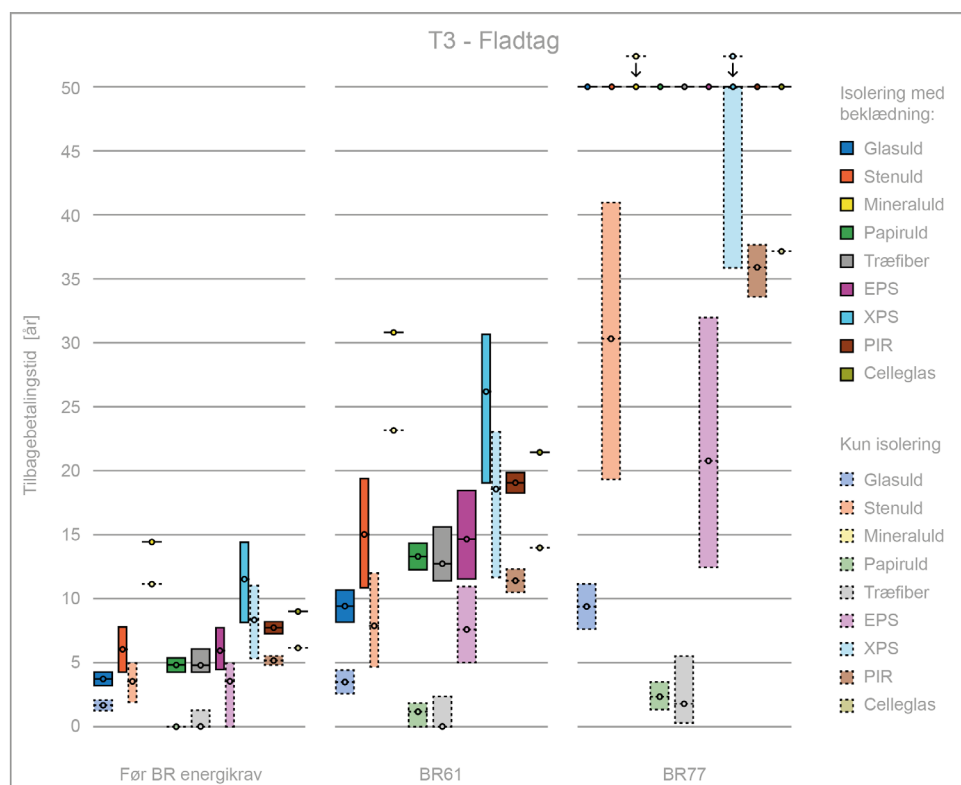
Efterisolering af fladt tag (Figur 11) viser en stor spredning, blandt andet fordi der indgår to former for opbygninger, kolde og varme tage, som indeholder fleksible og henholdsvis hårde isoleringstyper. Der er ingen rentabel løsning ved det høje eksisterende isoleringsniveau. Det skyldes to forhold.

For det første har to lag tagpap en høj klimapåvirkning, som forlænger tilbagebetalingstiden, selvom der ikke regnes udskiftninger med. I en LCA regnes normalt to udskiftninger med, da tagpap har en forventet levetid på 20 år. Dette kommer imidlertid ikke til udtryk i tilbagebetalingstiden, da udskiftninger i de to scenarier, som sammenlignes (med og uden renovering) ville udliges beregningsmæssigt.

For det andet har trykfast isolering til varme tage en væsentlig højere materialepåvirkning end fleksible isoleringsmaterialer, hvorfor der ses et stort spænd mellem disse isoleringsformer. Spændet inden for glasuld skyldes, at der både indgår fleksible måtter for kolde og trykfaste plader for varme tage. Der opnås tilfredsstillende rentabilitet ved det lave og delvist for det moderate eksisterende isoleringsniveau. Den mest rentable løsning er kolde tage med fleksibel isolering i mellemrum, til trods for den ekstra klimabelastning fra det nye bjælkelag.

Isoleringen uden tagbeklædning har overvejende korte tilbagebetalingstider ved det lave og moderate eksisterende isoleringsniveau. Det høje eksisterende isoleringsniveau forlænger tiden for de mest anvendte typer til 15-20 år. Generelt ligger fleksibel isolering og den

mest klimateffektive EPS-variant på et lignende, rentabelt niveau, mens øvrig skumisulering og celleglas har længere tilbagebetalingstider. Træfiber og papiruld har generelt den største rentabilitet efterfulgt af glasuld og EPS.



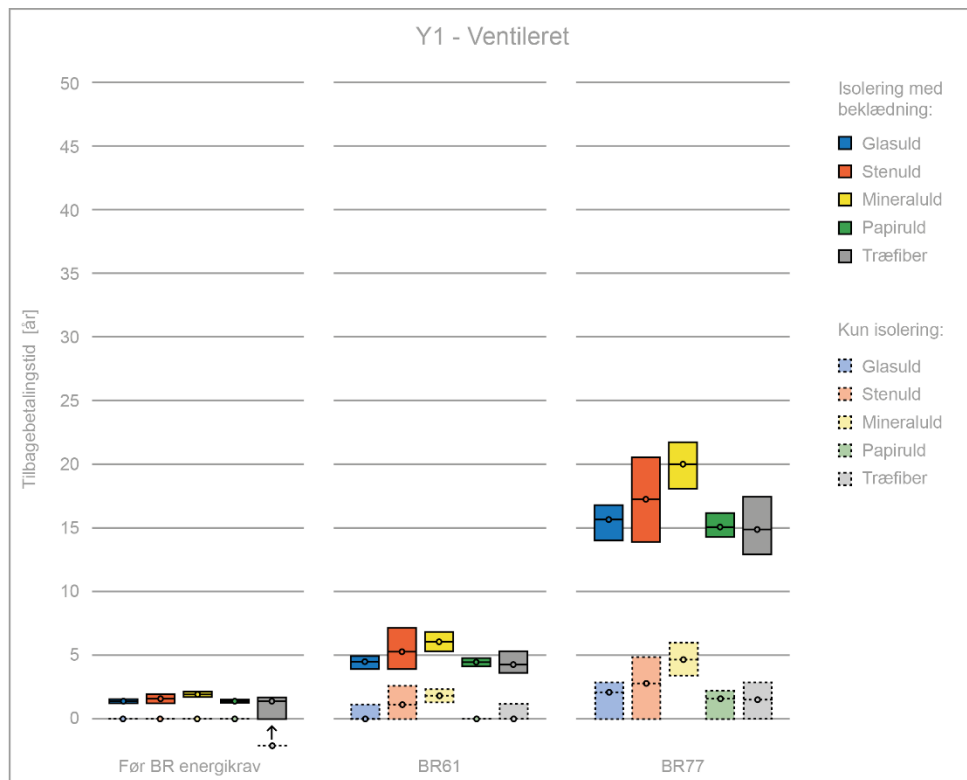
**Figur 11.** Tilbagebetalingstid for tagisolering T3, angivet for isoleringstyper og tre eksisterende isoleringsniveauer før renovering. Resultater er vist for et moderat efterisoleringsniveau, både med beklædning (gennemgående linje) og for isoleringslaget alene (stiplet linje). Hvor der indgår flere end ét datasæt i isoleringstypen, vises en kasse for laveste og højeste tilbagebetalingstid samt middelværdi som streg med kredsløb. Variation af *Mineraluld* svarer til de generiske datasæt for en 50/50% blanding af sten- og glasuld. Der er kun medtaget de isoleringstyper, som er typiske for T3.

## Y1 – Ventilert

Ydervægsisolering med let ventilert facadebeklædning (Figur 12) viser korte tilbagebetalingstider for alle isoleringstyper. Facadebeklædningen af fibercement påvirker kun resultatet i mindre grad. Dog ville det være vigtigt at sikre en lang holdbarhed ved renovering af et højt eksisterende isoleringsniveau, så udskiftningen ikke sker, før renoveringen er betalt tilbage. Valg af let facadebeklædning kan påvirke rentabiliteten væsentligt, da deres klimapåvirkning mellem fx skifter, fibercement eller aluminium varierer markant, se afsnit 3.3.1. Genbrug af facadebeklædning ville gøre tiltaget endnu mere rentabelt, under forudsætning af god holdbarhed.

Isoleringen alene er meget hurtigt tjent hjem i løbet af mindre end 5 år, hvis man ser bort fra de generiske data for mineraluld. En væsentlig forudsætning herfor er valg af træskelet som underkonstruktion.

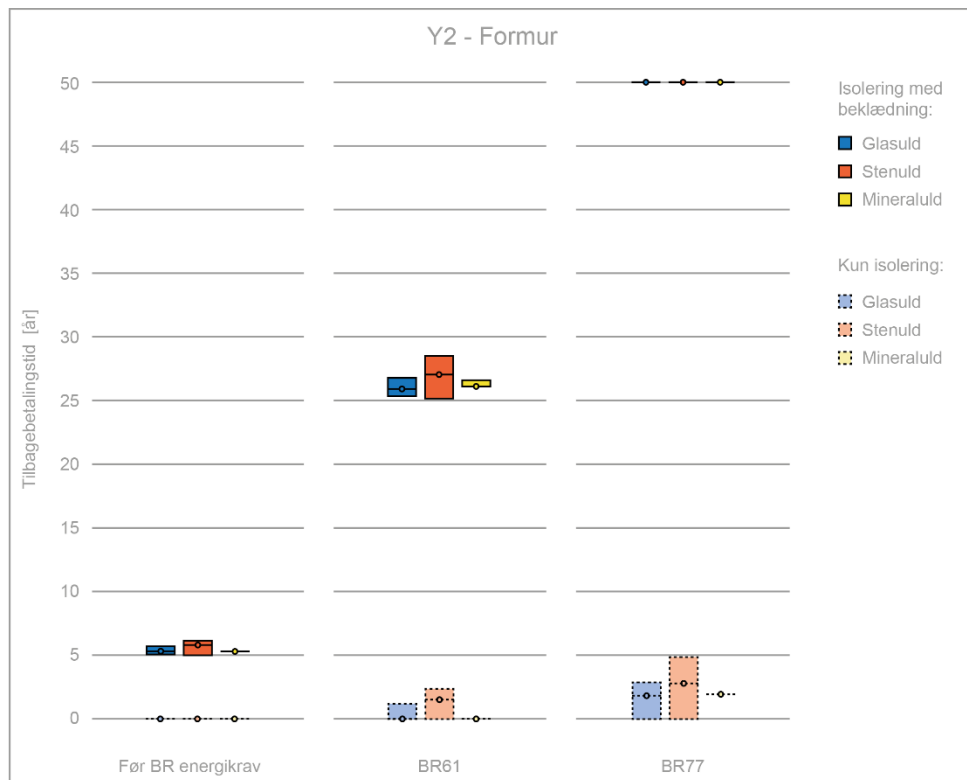
Ifølge Bilag 2 har hårde isoleringstyper et stort spænd i rentabilitet, hvoraf de mest effektive typer ligger i nærheden af de fleksible og indblæste materialer. Skumisuleringen med ekstrem lav lambda kan for eksempel være en klimateffektiv løsning, hvor der kun er plads til et tyndt lag isolering.



**Figur 12.** Tilbagebetalingstid for ydervægisolering Y1, angivet for isoleringstyper og tre eksisterende isoleringsniveauer før renovering. Resultater er vist for et moderat efterisoleringsniveau, både med beklædning (gennemgående linje) og for isolering alene (stiplet linje). Hvor der indgår flere end ét datasæt i isoleringstypen, vises en kasse for laveste og højeste tilbagebetalingstid samt middelværdi som streg med kreds. Variation af *Mineraluld* svarer til de generiske datasæt for en 50/50% blanding af sten- og glasuld. Der er kun medtaget de isoleringstyper, som er typiske for Y1.

## Y2 – Formur

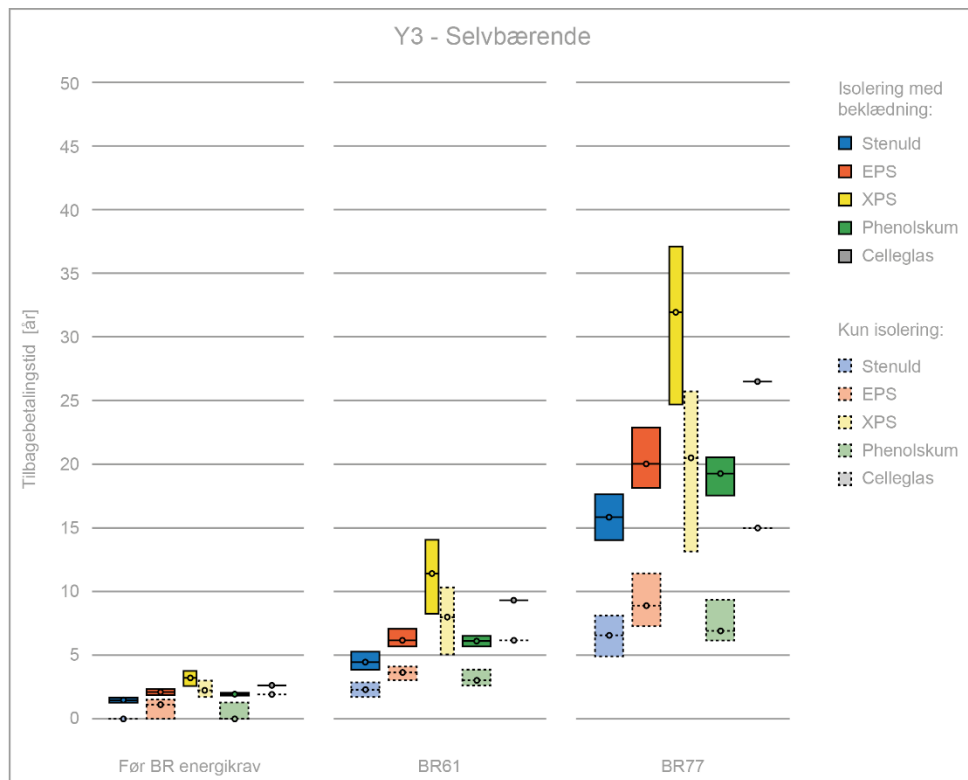
Ved efterisolering med ny formur (Figur 13) er påvirkningerne fra den nye formur dominerende for resultatet. Tilbagebetalingstiden for det dårlige udgangspunkt er kort, men stiger til over 15 år ved det moderate udgangspunkt. Der er ikke rentabilitet til den samlede konstruktion ved det høje eksisterende isoleringsniveau. Som ved Y1 har isoleringen alene også her meget korte tilbagebetalingstider.



**Figur 13.** Tilbagebetalingstider for Y2, angivet for isoleringstyper og tre eksisterende isoleringsniveauer før renovering. Resultater er vist for et moderat efterisoleringsniveau, både med beklædning (gennemgående linje) og for isolering alene (stiplede linje). Hvor der indgår flere end ét datasæt i isoleringstypen, vises en kasse for laveste og højeste tilbagebetalingstid samt middelværdi som streg med kredsløb. Variation af *Mineraluld* svarer til de generiske datasæt for en 50/50% blanding af sten- og glasuld. Der er kun medtaget de isoleringstyper, som er typiske for Y2.

### Y3 – Selvbærende

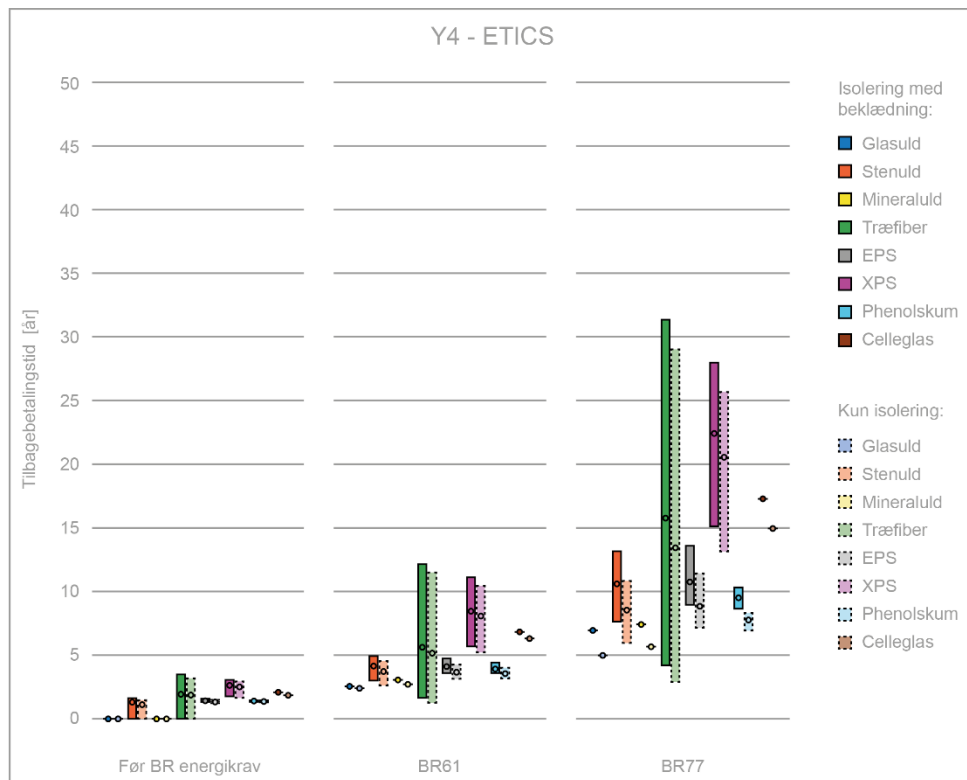
Selvbærende facadeisolering (Figur 14) er en kombination af stabil isolering og trykfordelende trælameller, som bliver presset på isoleringen og udgør på denne måde en underkonstruktion til ophængning af facadebeklædningen. Løsningen reducerer dermed underkonstruktionens materialeforbrug, mens isoleringen er forstærket. Analysen er baseret på en godkendt løsning for stenuld, som er overført til andre pladeformede isoleringstyper, der forventes at kunne yde en lignende funktion. Sammenligningen mellem stenuld og de øvrige typer må derfor anses som mere teoretisk end de øvrige resultater her i studiet. Ses der bort fra XPS, som ligger højest, er spændet mellem EPS, Phenolskum og stenuld ret lille. Datasæt med de korteste tilbagebetalingstider viser, at tiltaget er rentabelt for alle udgangspunkter. Rentabiliteten for de tre nævnte isoleringstyper er på samme niveau som Y1, under forudsætning af en identisk facadebeklædning, her fibercement.



**Figur 14.** Tilbagebetalingstider for ydervægisolering Y3, angivet for isoleringstyper og tre eksisterende isoleringsniveauer før renovering. Resultater er vist for et moderat efterisoleringsniveau, både med beklædning (gennemgående linje) og for isolering alene (støpelinje). Hvor der indgår flere end ét datasæt i isoleringstypen, vises en kasse for laveste og højeste tilbagebetalingstid samt middelværdi som streg med kreds. Variation af *Mineraluld* svarer til de generiske datasæt for en 50/50% blanding af sten- og glasuld. Der er kun medtaget de isoleringstyper, som er typiske for Y3.

#### Y4 – ETICS

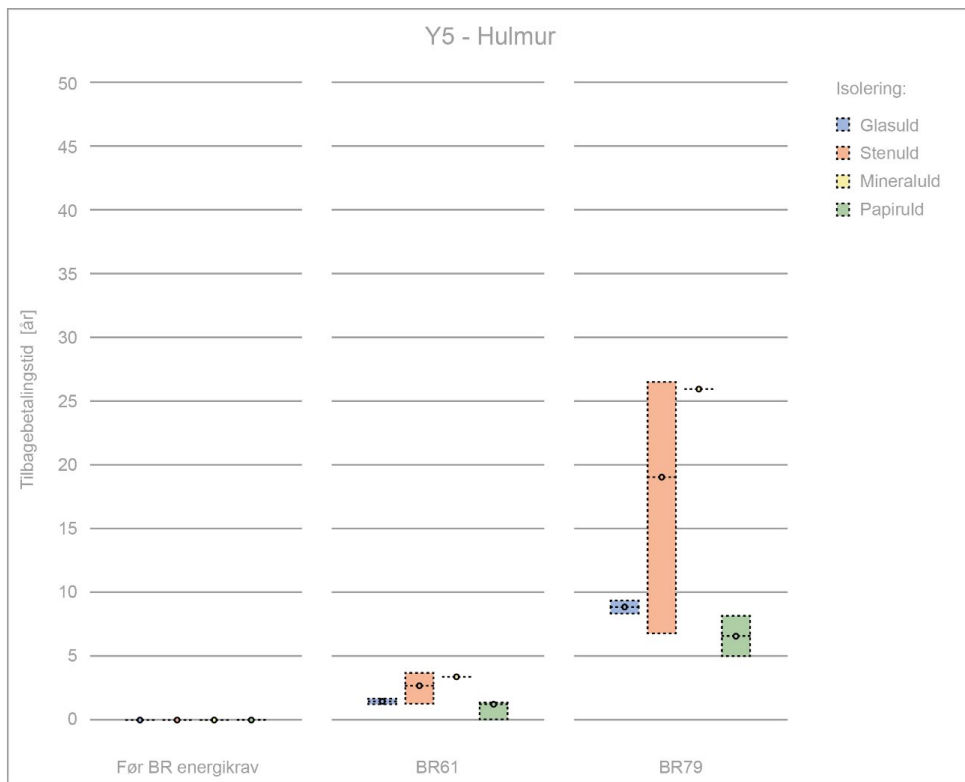
Det tredje system med let facadebeklædning (Figur 15) består af et gennemgående lag af stabil isolering, som direkte pudses over. Indflydelsen af den armerede tyndpuds er meget lav, således at der næsten ikke ses forskel i resultater med og uden beklædning. Isoleringen skal have en vis styrke og bestandighed som undergrund til pudsen. Tilbagebetalingstider for de ofte anvendte isoleringsmaterialer ligger inden for et smalt spænd med god rentabilitet ved alle udgangspunkter. Resultater for træfiber og XPS viser ligeledes god rentabilitet, men inden for et større spænd. De mindre rentable datasæt kommer især til udtryk ved det høje eksisterende isoleringsniveau. Ellers bevæger de øvrige isoleringstyper sig inden for et lille spænd af god rentabilitet.



**Figur 15.** Tilbagebetalingstider for ydervægisolering Y4, angivet for isoleringstyper og tre eksisterende isoleringsniveauer før renovering. Resultater er vist for et moderat efterisoleringsniveau, både med beklædning (gennemgående linje) og for isolering alene (støplet linje). Hvor der indgår flere end ét datasæt i isoleringstypen, vises en kasse for laveste og højeste tilbagebetalingstid samt middelværdi som strek med kreds. Variation af *Mineraluld* svarer til de generiske datasæt for en 50/50% blanding af sten- og glasuld. Der er kun medtaget de isoleringstyper, som er typiske for Y4. Det store spænd for træfiber skyldes datasættet *Træfiber, λ43* med en mere end tre gange så store klimapåvirkning end det tilsvarende produkt fra anden producent *Træfiber, λ40*.

### Y5 – Hulmur

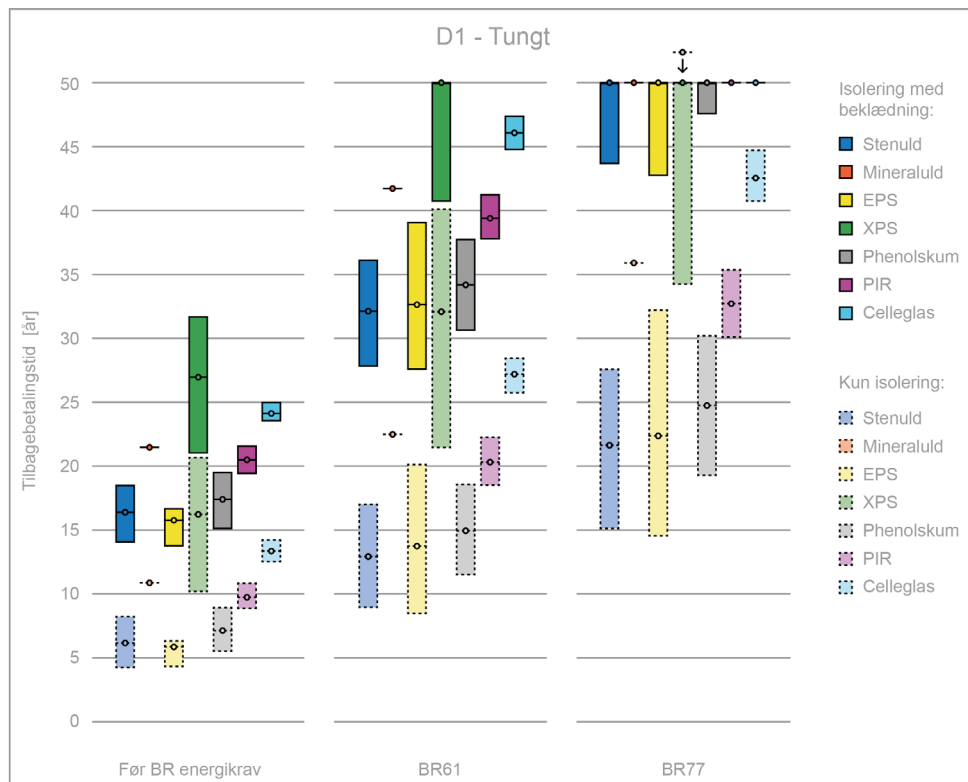
Ved hulmursisoleringen (Figur 16) indgår der ikke facadebeklædning, forudsat at den eksisterende facade er i god stand. Som udgangspunkt før renovering betragtes der tre forskellige dimensioner hulrum, hvoraf to af dem er fyldt med ældre isolering. Efterisoleringen forudsætter så, at hulrummet bliver tømt og fyldt med ny isolering, se forudsætninger i metodeafsnit (Tabel 6). I det smalleste hulrum uden ældre isolering (a) er forskellen før og efter isolering størst, som kommer til udtryk i en meget kort tilbagebetalingstid på under et år. Det samme vil gøre sig gældende for de to større hulrum, hvis de var uisolerede inden renovering. Da de større hulrum dog er valgt at være isoleret før renovering i dette studie, kan man se effekten af ældre isolering på tilbagebetalingen i graferne (b) og (c). Tilbagebetalingstiden forlænges tydeligt, især for 130 mm hulrummet, som indeholder den største mængde ældre isolering, men som samtidig ikke kan isoleres til mere en 130 mm. Det store spænd for stenuld stammer fra to generationer af en eksisterende og kommende EPD med en markant reduceret klimapåvirkning. De generiske data for mineraluld ligger også på den yderste kant, så de kan ikke anses for at være repræsentative til hulmursisolering.



**Figur 16.** Tilbagebetalingstider for hulmursisolering Y5, angivet for isoleringstyper og tre eksisterende isoleringsniveauer før renovering. Resultater er vist for et moderat efterisoleringsniveau for isolering alene (stiplet linje). Hvor der indgår flere end ét datasæt i isoleringstypen, vises en kasse for laveste og højeste tilbagebetalingstid samt middelværdi som streg med kreds. Variation af *Mineraluld* svarer til de generiske datasæt for en 50/50% blanding af sten- og glasuld. Der er kun medtaget de isoleringstyper, som er typiske for Y5.

## D1 – Tungt

Etablering af tungt terrændæk (Figur 17) medfører en betydende klimapåvirkning fra den trykfaste isolering og fra betonlaget. Den samlede konstruktion har derfor forholdsvis lange tilbagebetalingstider ved det dårlige og moderate udgangspunkt. EPS, stenuld og phenolskum har de korteste tilbagebetalingstider og ligger lige inden for rentabiliteten ved det høje eksisterende isoleringsniveau. Isoleringen betragtet for sig, det vil sige uden betonplade, er overvejende rentabelt. Rentabiliteten af terrændæksisolering skal dog ses i forhold til en lang levetid af konstruktionen.

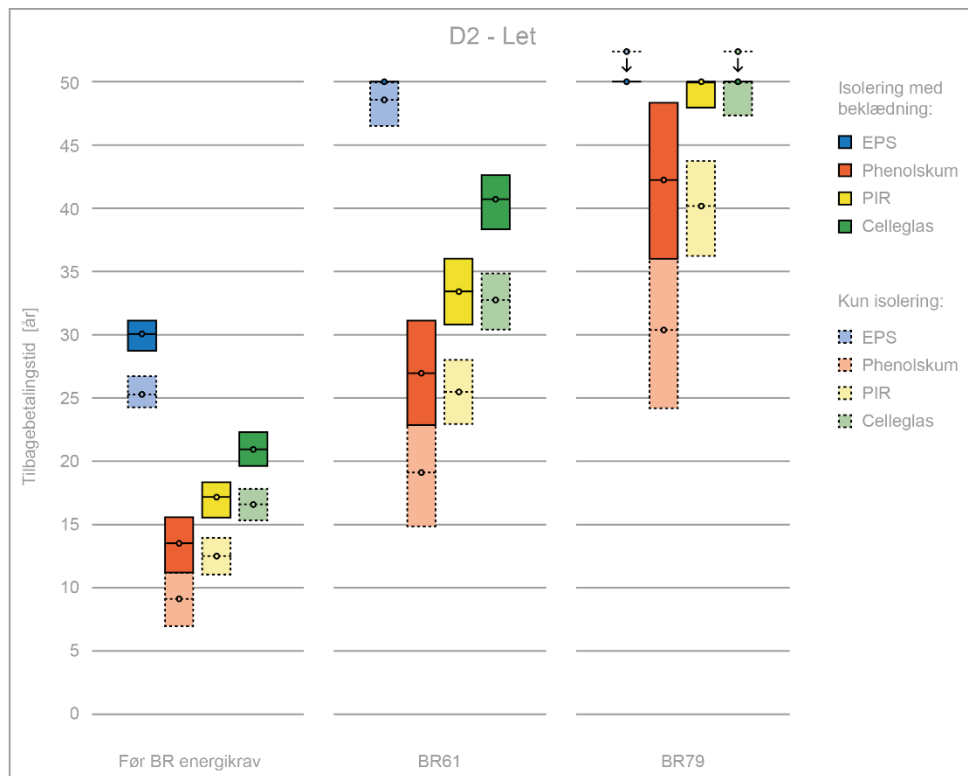


**Figur 17.** Tilbagebetalingstider for nytableret tungt terrændæk i eksisterende bygning D1, angivet for isoleringstyper og tre eksisterende isoleringsniveauer før renovering. Resultater er vist for et moderat efterisoleringsniveau, både med gulvkonstruktion med betondæk (gennemgående linje) og for isolering alene (stiplet linje). Hvor der indgår flere end ét datasæt i isoleringstypen, vises en kasse for laveste og højeste tilbagebetalingstid samt middelværdi som strek med kreds. Variation af *Mineraluld* svarer til de generiske datasæt for en 50/50% blanding af sten- og glasuld. Der er kun medtaget de isoleringstyper, som er typiske for D1.

## D2 – Let

Resultater for det lette terrændæk (Figur 18) har kortere tilbagebetalingstider end den tunge konstruktion D1. Phenolskum er den mest rentable isoleringstype, som også gør konstruktionen rentabel ved det høje eksisterende isoleringsniveau.

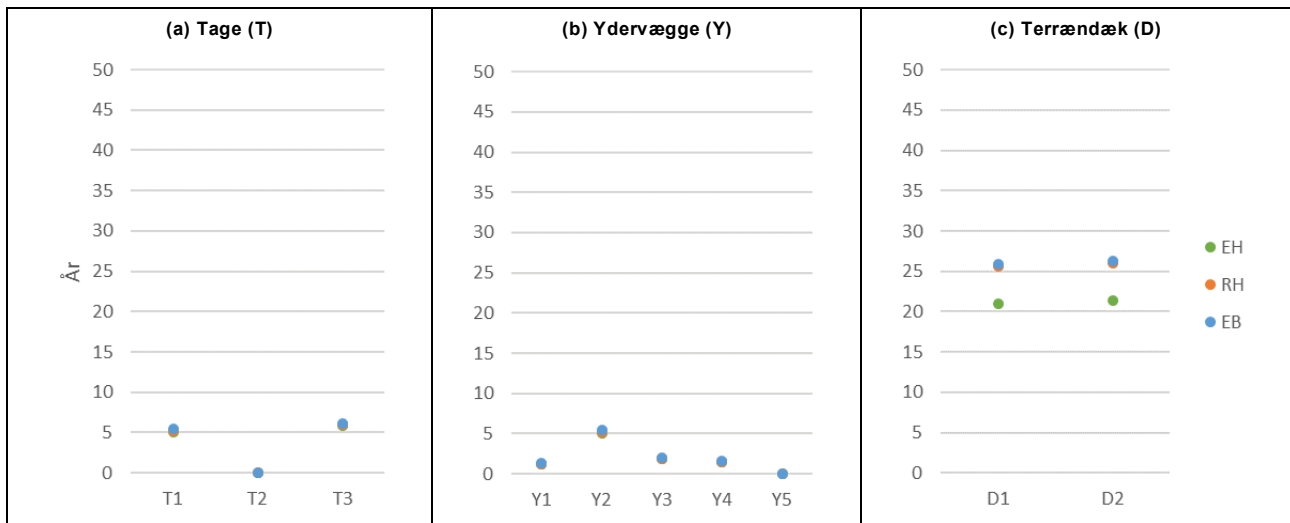
Da isoleringen udgør den overvejende andel af klimapåvirkningen i D2, er der ikke en stor forskel i resultater for isoleringen alene betragtet. Tilbagebetalingstiderne er lidt kortere og næsten alle typer er rentable for alle udgangspunkter.



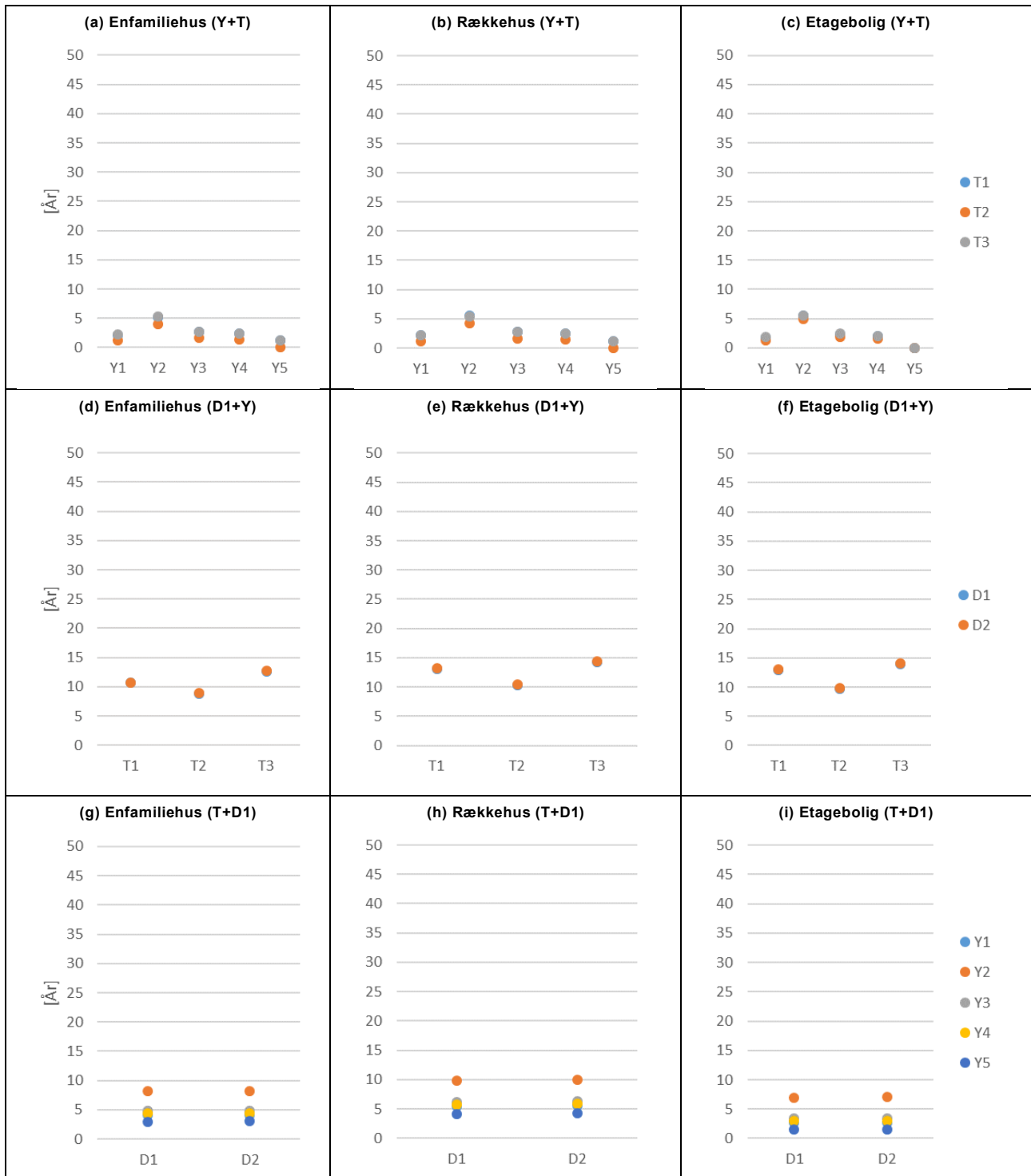
**Figur 18.** Tilbagebetalingstider for nyetableret let terrændæk i eksisterende bygning D2, angivet for isoleringstyper og tre eksisterende isoleringsniveauer før renovering. Resultater er vist for et moderat efterisoleringsniveau, både med gulvkonstruktion (gennemgående linje) og for isolering alene (stiplet linje). Hvor der indgår flere end ét datasæt i isoleringstypen, vises en kasse for laveste og højeste tilbagebetalingstid samt middelværdi som strek med kreds. Variation af *Mineraluld* svarer til de generiske datasæt for en 50/50% blanding af sten- og glasuld. Der er kun medtaget de isoleringstyper, som er typiske for D2.

### 3.2.3 Case-analyse

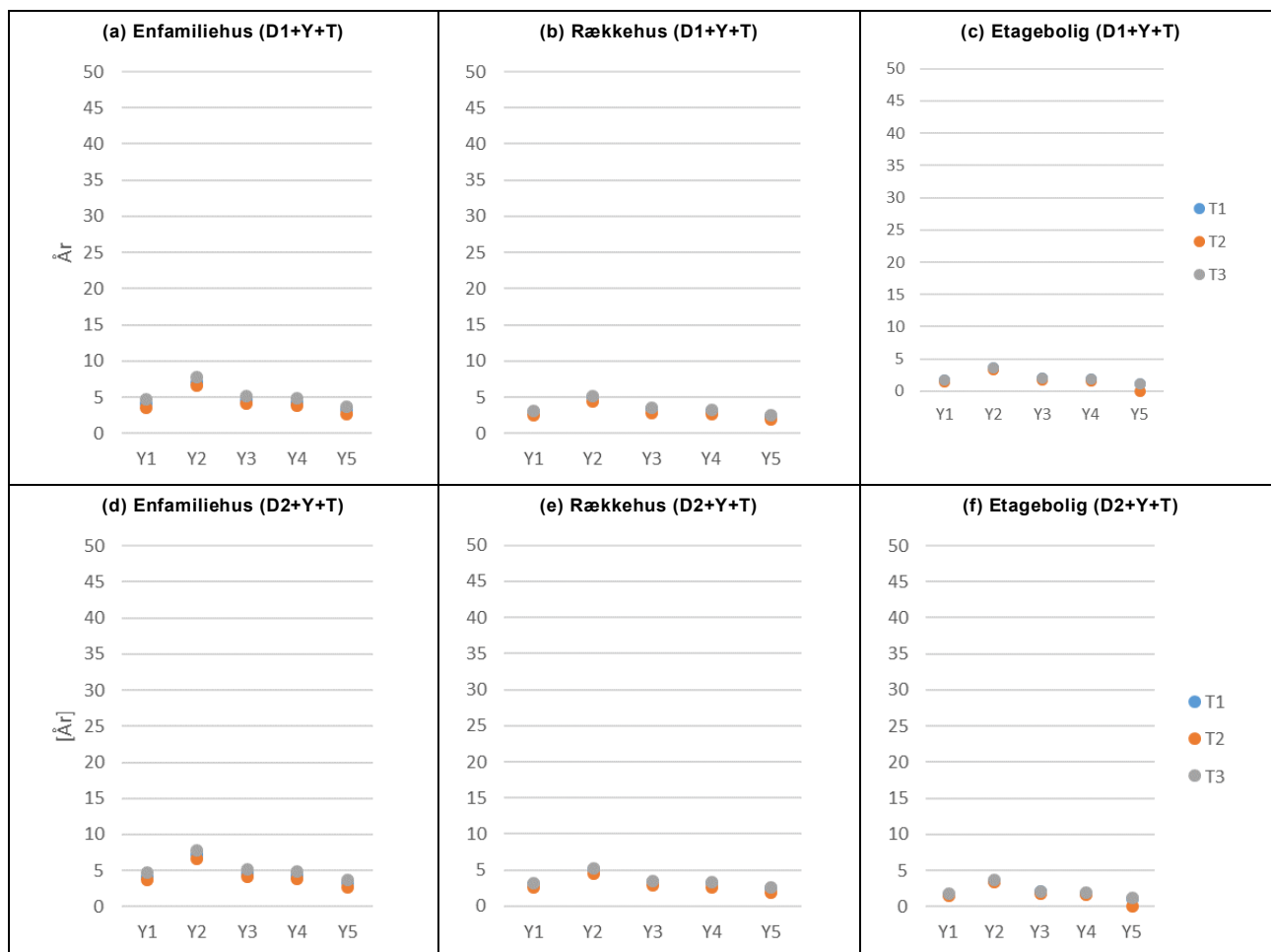
Resultaterne i case-analysen er delt op i antal isoleringstiltag, der kombineres i en renovering. Tilbagebetalingstider for ét enkelt isoleringstiltag af gangen (Figur 19) følger den samme tendens som for komponentstudiet ved alle tre bygningstypologier, men ligger på et samlet set lavere niveau. Bygningstypologien påvirker generelt ikke resultatet, bortset fra de to varianter for isolering af terrændæk (c). Den svage indflydelse af bygningstypologien forplantes dermed også i resultaterne for kombinationer af to og tre tiltag i en tænkt renovering, se Figur 20-21. Det kan konkluderes, at bygningstypen kun spiller en underordnet rolle for rentabiliteten af efterisolering. Det skal dog bemærkes, at den potentielt sparede klimapåvirkning i absolutte tal stadig er stærkt afhængigt af bygningens skala og geometri. Det gælder både klimapåvirkningen pr. etagemeter og bygningens totale klimapåvirkning. Dette forhold kommer dog ikke til udtryk i rentabilitetsbetragtningen.



**Figur 19.** Tilbagebetalingstider for ét isoleringstiltag anvendt i eksempelbygningerne. Tiltagene vises i tre grafer for hver komponent. Udgangspunkt er før BR energikrav og moderat niveau for efterisolering. Der anvendes middelværdier af isoleringstyper, som er typiske for disse tiltag. Energiberegning baseret på energiramme.



**Figur 20.** Tilbagebetalingstider for to isoleringstiltag anvendt i eksempelbygningerne. Kombinationer af de i alt 10 varianter af tiltag vises i ni grafer. Udgangspunkt er for BR energikrav og moderat niveau for efterisolering. Der anvendes middelværdier af isoleringstyper, som er typiske for disse tiltag. Energeberegning baseret på energirammeberegning.



**Figur 21.** Tilbagebetalingstider for tre isoleringstiltag anvendt i eksempelbygningerne. Kombinationer af de i alt 10 varianter af tiltag vises i seks grafer. Udgangspunkt er før BR energikrav og moderat niveau for efterisolering. Der anvendes middelværdier af isoleringstyper, som er typiske for disse tiltag. Energiberegning baseret på energirammeberegning.

### 3.2.4 BR-energikrav

De detaljerede resultater i Bilag 2 giver også en indikation for rentabiliteten af bygningsreglementets isoleringskrav til eksisterende byggeri, som kan ses i Tabel 5. For ydervægge har efterisoleringsniveauet kun en mindre indflydelse på rentabiliteten og BR-krav til ombygning og ændret anvendelse ligger på et klimamæssigt rentabelt niveau, med undtagelse af facadeisolering med ny formur Y2.































For tagisolering T1 og 3 er efterisolering ved et højt eksisterende isoleringsniveau næsten aldrig rentabelt. Det demonstrerer, at et minimumniveau af isolering er nødvendigt for at afbalancere materialepåvirkninger af beklædninger med en tilsvarende energibesparelse. Bemærk for tiltagene T1 og 3, at det lave efterisoleringsniveau for BR77 scenariet er udgået, da isoleringsmængderne ville være for ringe til at retfærdiggøre en renovering. BR-kravene til tage og lofter er ens for ombygninger og ændret anvendelse og svarer til det høje efterisoleringsniveau. Da tagkonstruktionen normalt ikke udskiftes, gælder kravet dog kun forudsat økonomisk rentabilitet. BR muliggør derfor ikke-rentable renoveringer i det tilfælde, hvor taget allerede er velisoleret og efterisoleres med et lavt efterisoleringsniveau.

Ved terrændæk er det moderate efterisoleringsniveau mere rentabelt end det høje, som svarer til bygningsreglementets krævede U-værdi. Det gælder både for tunge og lette opbygninger.

### 3.2.5 Generiske og specifikke miljødata (EPD)

Generiske data bruges ofte som erstatning af specifikke data. Jo bedre de generiske data repræsenterer EPD'erne, jo bedre prognoser for et projekts klimapåvirkning kan man lave. I de fleste tilfælde overvurderer de generiske data påvirkningerne, se Tabel 8. Det gælder de fleste fiberbaserede materialer samt EPS, XPS og Phenolskum. For disse isoleringstyper ville klimapåvirkningen normalt falde, når de generiske data erstattes med specifikke i løbet af projektet. Forholdet mellem specifikke og generiske data skal dog ses som et øjebliksbillede, da begge dele bliver opdateret løbende. Da de generiske data i sidste ende er baseret på den teknologiske udvikling på samme vis som EPD'er gør, er det ofte et spørgsmål om tid, hvornår de generiske data tilnærmer sig de specifikke igen. Afvigelser mellem generiske og specifikke data vil udlignes til en vis grad i LCA for bygninger, hvor der indgår mange byggevarer. Et af formålene med denne rapport er dog, at disse forskelle kommer i højere grad til udtryk i LCA, der fokuserer på mindre enheder som bygningsdele. Her bør man vælge miljødata med omhu og eventuelt bruge et spænd af flere kilder, hvis produktet endnu ikke er bestemt. Se også afsnit 3.1.5 for en sammenligning af de anvendte miljødatas klimapåvirkning.

**Table 8.** Datatypernes indflydelse på tilbagebetalingstid. Farver indikerer, om EPD henholdsvis generiske data giver en kortere (grøn) eller længere (rød). Sammenligning gælder kun inden for hver isoleringstype (tabelrække) og ikke på tværs af isoleringstyperne. Tilbagebetalingstid kan sidestilles med klimapåvirkning, da resultater er beregnet med identiske U-værdier.

Isolering	EPD	Generisk	Datasæt	Anvendelse
Glasuld			$\lambda$ 37 (a), $\lambda$ 30 (a), $\lambda$ 38 (a), $\lambda$ 39, $\lambda$ 37 (b), $\lambda$ 30 (b), $\lambda$ 38 (b), $\lambda$ 37 (c), $\lambda$ 32	T1-T3, Y1-Y4
Glasuld, granulat			$\lambda$ 42 (a), $\lambda$ 34 (a), $\lambda$ 42 (b), $\lambda$ 33, $\lambda$ 34 (b)	T1-T3, Y1, Y5
Stenuld			$\lambda$ 37 (a), $\lambda$ 34 (a), $\lambda$ 37 (b), $\lambda$ 36 (a), $\lambda$ 39, $\lambda$ 37 (d), $\lambda$ 32, $\lambda$ 37 (e), $\lambda$ 33 (a), $\lambda$ 36 (b), $\lambda$ 34 (b), $\lambda$ 38 (b), $\lambda$ 36 (c), $\lambda$ 34 (c), $\lambda$ 33 (b), $\lambda$ 36 (d)	T1-T3, Y1-Y3
			$\lambda$ 37 (c), $\lambda$ 36 (d)	Y4
Stenuld, granulat			$\lambda$ 37 (a), $\lambda$ 38, $\lambda$ 41 (a), $\lambda$ 37 (b), $\lambda$ 36, $\lambda$ 41 (b), $\lambda$ 37 (c)	T1-T3, Y1
Papiruld			$\lambda$ 37	T1-T3, Y1, Y5
Træfiber			$\lambda$ 37, $\lambda$ 43, $\lambda$ 40	T1-T3, Y1, Y4
			$\lambda$ 38 (a), $\lambda$ 36, $\lambda$ 38 (b)	T1-T3, Y1
Træfiber, granulat			$\lambda$ 38 (a), $\lambda$ 38 (b), $\lambda$ 38 (c), $\lambda$ 38 (d), $\lambda$ 38 (e)	T1-T3, Y1
EPS			$\lambda$ 38, $\lambda$ 41, $\lambda$ 33 (a), $\lambda$ 31, $\lambda$ 33 (b)	T1-T3, Y1-Y4, D1-D2
XPS			$\lambda$ 39, $\lambda$ 34	T1-T3, Y1-Y4, D1-D2
Phenolskum			$\lambda$ 20 (a), $\lambda$ 20 (b), $\lambda$ 20 (c), $\lambda$ 20 (d), $\lambda$ 20 (e)	T1-T3, Y1-Y4, D1-D2
PIR			$\lambda$ 26	T1-T3, Y1-Y4, D1-D2
Celleglas			$\lambda$ 36	T1-T3, Y1-Y4, D1-D2
Tilbagebetalingstid:  Kortest  Længst				

### 3.2.6 Varmeledningsevne (lambda-værdi)

For nogle typer isolering er der et udvalg af forskellige lambda-værdier til samme anvendelse, som afspejles i valg af produkter og dermed datasæt i analysen. Generelt er der sket en historisk teknologiudvikling, hvor isoleringsevne for isolering er successive blevet forbedret. I dag findes der et spænd af lambda-værdier inden for nogle produkter, eftersom produkter med højere lambda er billigere. Dermed kan der opnås økonomisk fordelagtige isoleringsløsninger, hvor der er plads nok i konstruktionen. I tilfælde af begrænsede pladsforhold eller hvor der ikke ønskes en forøgelse af konstruktionens dimension, kan der vælges produktvarianter med lav lambda. Lav lambda vælges også, hvis der skal opnås et særligt højt isoleringsniveau.

Varianter af isoleringstyper med forskellige lambda-værdier viser en forskel i tilbagebetalingstiden, men ikke efter et entydigt mønster, se Tabel 9. Inden for mineraluld har produkter med høj lambda kortere tilbagebetalingstider end med lav lambda. Det vil sige, at det kan betale sig at bruge en ringere isoleringsevne forudsat, at der er plads nok i konstruktionen og at der ikke følger yderligere materialepåvirkninger, som modarbejder effekten fx påføring på spær. Den samme tendens gælder for XPS, hvorimod EPS viser den omvendte effekt. Her kan det betale sig at anvende produktvarianten med lav lambda.

Glas- og stenuld i form af granulat har overvejende længere tilbagebetalingstider end måtter/plader med høj lambda, i nogle tilfælde endda de længste tilbagebetalingstider (stenuld T1, T3 og Y1). Omvendt er granulat mere rentabelt inden for træfiberisolering.

**Table 9.** Lambda-værdiens indflydelse på tilbagebetalingstid for EPD. Farven indikerer, hvilken produktvariant der har den korteste (grøn), mellemlange (gul) eller længste (rød) tilbagebetalingstid. Produktvarianter er måtter/plader med høj/lav lambda og granulat. Tilbagebetalingstid kan sidestilles med klimapåvirkning, da resultater er beregnet med identiske U-værdier. Sammenligning gælder kun inden for den enkelte EPD (tabelrække).

Isoleringsstype	Anvendelse	Producent	Høj lambda	Lav lambda	Granulat
Glasuld	T1, T3, Y1	1	λ37 (a)	λ30 (a)	λ34 (a)
		2	λ37 (c)	λ32	λ33
	Y2	1	λ37 (b)	λ30 (b)	
		2	λ37 (c)	λ32	
	T2	1	λ37 (a)	λ30 (a)	λ42 (a)
		2	λ37 (c)	λ32	λ42 (b)
Stenuld	T1, T3, Y1	3	λ37 (a)	λ34 (a)	λ37 (a)
		4	λ36 (a)	λ34 (a)	λ36 (a)
	Y2	3	λ37 (d)	λ32	
		4	λ34 (b)	λ33 (b)	
	T2	3	λ37 (a)	λ34 (a)	λ41 (a)
		4	λ36 (a)	λ34 (a)	λ41 (a)
Træfiber	T1-T3, Y1	7	λ38 (a)		λ38 (a), λ38 (b), λ38 (c)
		8	λ36, λ38 (b)		λ38 (d), λ38 (e)
EPS	T1-T3, Y1-Y4, D1-D2		λ38, λ41, λ33 (a)	λ31, λ33 (b)	
XPS	T1-T3, Y1-Y4, D1		λ39	λ34	

Tilbagebetalingstid: Kortest Mellemlang Længst

### 3.2.7 Nettopåvirkninger versus tilbagebetalingstid

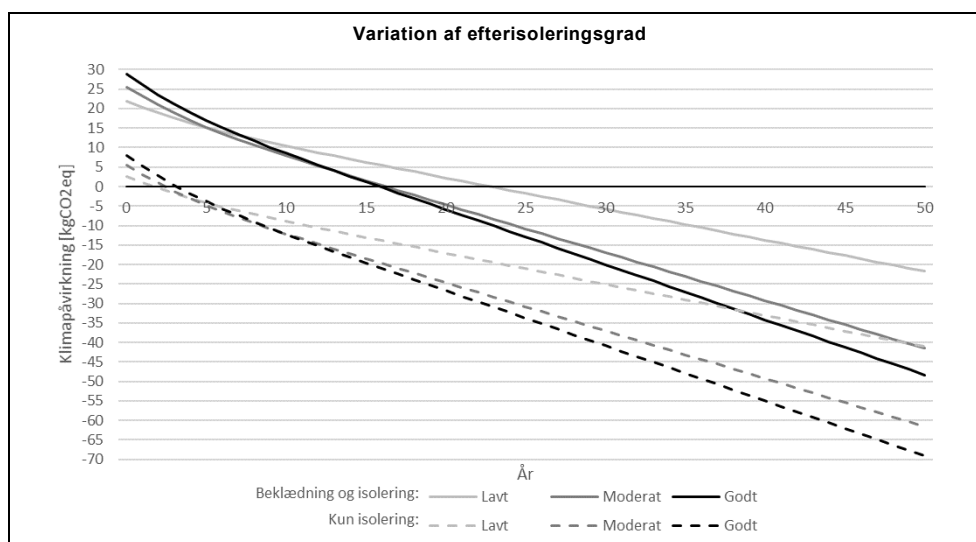
Resultater i afsnit 3.2 er udelukkende baseret på et moderat efterisoleringsniveau for at begrænse omfanget af resultater. Resultater for alle tre efterisoleringsniveauer fremgår Bilag 2. Når man betragter isoleringslaget alene, så stiger tilbagebetalingstiden med efterisoleringsgraden. Når man derimod inkluderer isoleringslaget og beklædning, så viser nogle resultater den modsatte tendens, nemlig at tilbagebetalingstiden falder med stigende efterisoleringsgrad.

Årsagen kan forklares ved at holde sig for øje, hvordan klimapåvirkningen ophobes over betragtningsperioden (Figur 22). Grafen viser skråtagsisolering T1 med glasuld og indeholder alle tre efterisoleringsniveauer, baseret på et moderat eksisterende isoleringsniveau (BR61). Kurverne udgør nettopåvirkninger over 50 år, det vil sige summen af materialepåvirkninger minus energibesparelsen. Det øverste sæt kurver er med og det nederste uden beklædning.

Alle kurver ender med en negativ klimapåvirkning, det vil sige at tagets eksisterende klimapåvirkning falder, og anses derfor som klimamæssigt rentable. De højeste efterisoleringsniveauer har samtidig den højeste påvirkning i starten og ender med den laveste efter 50 år i begge sæt kurver. Energiforbedringens reduktion i klimapåvirkning overstiger altså materialepåvirkningerne. Tilbagebetalingstider, det vil sige balancepunktet mellem materialepåvirkninger og energibesparelse, er kurvernes krydspunkt med x-aksens nulpunkt.

Kurvernes startniveau svarer til materialernes påvirkninger, som reduceres successive med hvert af de følgende år. Denne reduktion foregår dog hurtigere for de høje efterisoleringsniveauer på grund af den større energibesparelse. Som konsekvens krydser kurverne og de høje efterisoleringsniveauer ender med de laveste klimapåvirkninger.

Denne mekanisme påvirker rentabiliteten. Uden beklædning er balancepunktet opnået så tidligt, at rækkefølgen fra starten stadig består. Det omvendte er tilfældet for resultater med beklædning, som først møder x-aksen, hvor det høje isoleringsniveau allerede er kommet længst nede i påvirkningerne og dermed opnå den korteste tilbagebetalingstid. Én løsning kan have en kortere tilbagebetalingstid end en anden, men stadig have en højere nettopåvirkning – og omvendt.

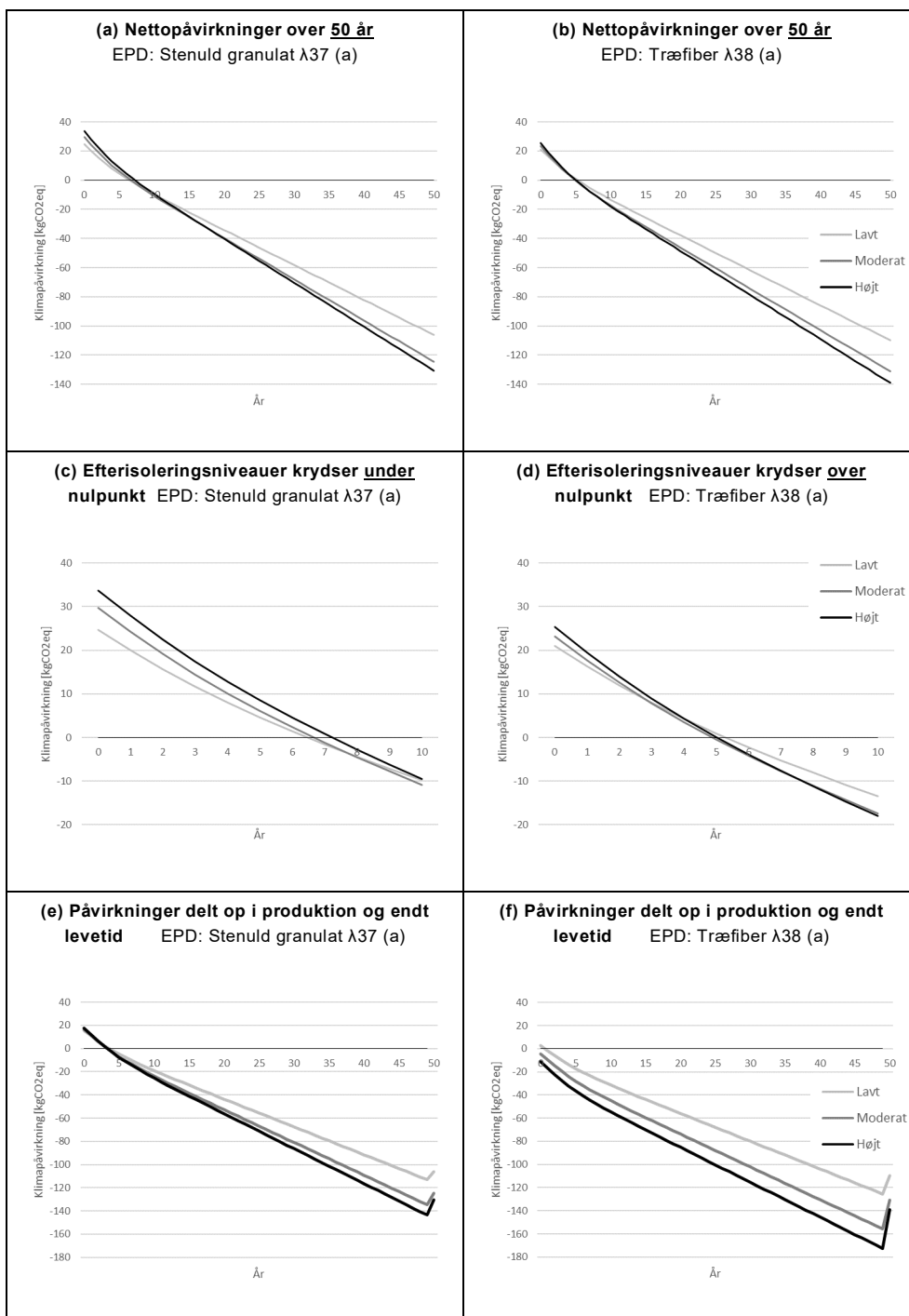


**Figur 22.** Udvikling af klimapåvirkning for varierende efterisoleringsgrader. De tre øverste kurver er med beklædning, de tre nederste uden. Kurverne udgør summen af materialepåvirkninger fratrukket den løbende energibesparelse. Eksemplet er tagisolering T1 med udgangspunkt i moderat eksisterende isolering (BR61). Datasæt for isolering er *Glasuld 130 (a)*, beklædningsmaterialet er tagtegl.

I det andet eksempel (Figur 23) er det valg af isolering, som bestemmer rækkefølgen, om det lave efterisoleringsniveau er mest eller mindst rentabelt. Efter samme princip som beskrevet før reducerer et højt isoleringsniveau påvirkningerne mest på den lange bane, så kurverne for de tre isoleringsniveauer bytter plads (a, b).

Det kan ske med forskellige hastigheder, så balancepunktet opnås henholdsvis efter (c) eller før (d) kurverne. Som i det oven beskrevne eksempel er tendensen forskellig, alt efter om der regnes i nettopåvirkninger eller tilbagebetalingstid.

Til sidst skal det understreges, at isoleringsstudiet forenkler beregning af materialepåvirkninger ved at sammenfatte faserne produktion (A1-3) og affaldsbehandling (C3-4) ved år 0. Denne forenkling muliggør beregningen af tilbagebetalingstiden, men påvirker også resultater, da materialepåvirkninger i virkeligheden vil ske på forskellige tidspunkter (e, f). Materialer, som er energitunge i produktion, eksempelvis mineralfibre, metal og keramik, udleder drivhusgasser allerede i dag og kan ikke undgås. Derimod udleder materialer baseret på kulstof, herunder træ, cellulose og plast, størstedelen af drivhusgasser først ved endt levetid i fremtiden. Begge livscyklusprofiler påvirkes af de faktiske levetider, som ikke kan forudsiges med sikkerhed.



**Figur 23.** Udvikling af nettopåvirkninger og deres indflydelse på tilbagebetalingstid. Sammenligning af to isoleringsprodukter og variation af henholdsvis lavt, moderat og højt efterisoleringsgrad (vises som gråtoner). Resultaterne stammer fra tagisolering T1 med lavt eksisterende isoleringsniveau før BR energikrav.

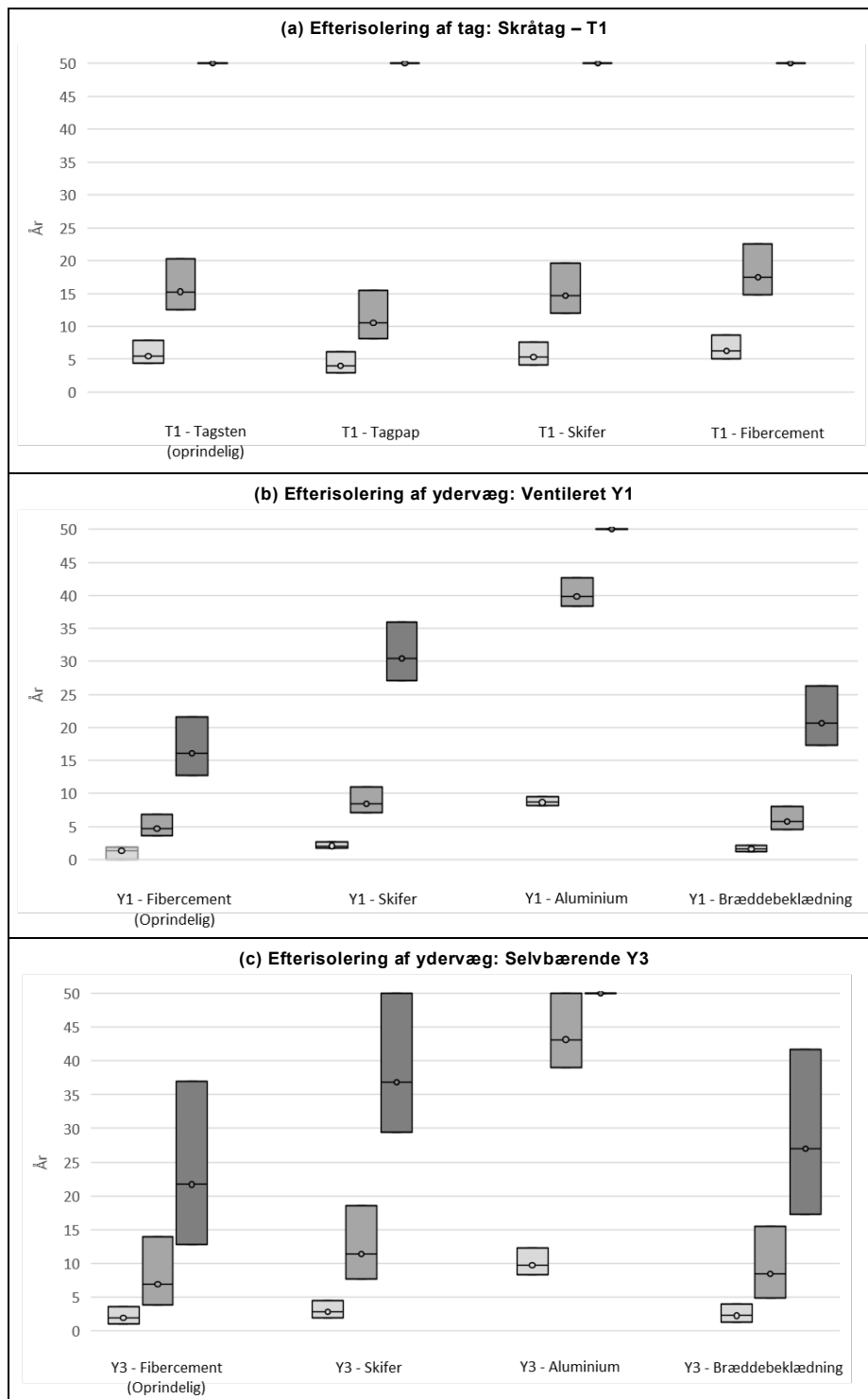
Det kan konkluderes, at der ikke er en entydig tendens for isoleringsgradens indflydelse på tilbagebetalingstiden. I nogle tilfælde vil rentabiliteten stige med isoleringstykkelser, mens det i andre tilfælde gør løsningen mindre rentabelt. Det skyldes, at hastigheden for at opnå balancepunktet påvirkes af energibesparelsen i forhold til materialepåvirkninger fra isolering og beklædning.

### 3.3 Usikkerhedsanalyse

Formålet med afsnittet er at vise, hvor følsomt resultatet er over for variation af udgangsparemetre. Resultaterne præsenteret i afsnit 3.2 og Bilag 2 tydeliggør allerede resultatets afhængighed af miljødata og isoleringstype, som er givet i spænd og middelværdier. Følsomhedsanalysen skal variere yderligere parametre i form af stikprøver for at indikere deres indflydelse på resultaterne. Parametrene inkluderer materialevalg for facade- og tagbeklædninger, indikator for miljøpåvirkning, indetemperatur og varmekilde.

#### 3.3.1 Materialevalg til beklædninger

Resultaterne har vist, at beklædninger med høj klimapåvirkning kan påvirke rentabiliteten i højere grad end isoleringen selv. For nogle isoleringstiltag kan der vælges andre beklædningsmaterialer end dem, som indgår i resultaterne i afsnit 3.2 og Bilag 1. Det gælder efterisolering af skråtag T1, ventileret facadebeklædning Y1 og selvbærende isolering Y3. Figur 24 viser alternative beklædningsmaterialer. Alle alternative beklædninger er beregnet med generiske miljødata fra Ökobaudat, se dokumentation i Bilag 1.



Isoleringsniveau før renovering:  Før BR energikrav  BR61  BR77

**Figur 24.** Tilbagebetalingstider for varianter af beklædning for T1, Y1 og Y3. Beregnet med udgangspunkt i før BR energikrav, BR61, BR77 og med moderat niveau for efterisolering. Metode følger komponentanalysen af isoleringstil-tag.

Alternative tagbeklædninger for T1 (Figur 24a) ligger på et lignende niveau som tagsten. Grunden til, at tagpappen ligger bedst i denne sammenligning er, at udskiftninger ikke spiller ind i betragtningen. Normalt resulterer de to nødvendige udskiftninger af tagpappen en tredobling af klimapåvirkningen i en regulær LCA. I rentabilitetsbetragtningen bortfalder belastninger fra udskiftninger, da de både forekommer i udgangspunktet som i renoveringsvarianten (Tabel 1).

De tre alternative facadematerialer for Y1 (Figur 24b) er skifer på trælist, beklædning med aluminiumpaneler på en underkonstruktion af aluminium og en bræddebeklædning på trælist. Alle tre beklædninger indeholder en gipsplade som vindspærre. Den største forskel udgør løsninger med aluminium, som ved det høje eksisterende isoleringsniveau viser sig ikke at være rentabelt. Da der i de oprindelige beregninger er valgt beklædning med fibercement, som viser den bedste rentabilitet i Figur 26b, er resultatet af tilbagebetalingstid for Y1 snarere overvurderet, eftersom den vil blive væsentlig dårligere ved tre øvrige beklædningstyper.

Selvbærende isoleringssystemer Y3 (Figur 24c) kan varieres med lignende, lette beklædninger som Y1, men uden vindspærre. Underkonstruktioner udføres af træ med undtagelse af beklædning med aluminium, som monteres på underkonstruktion i samme materiale. Indflydelse af aluminium er ligeledes stort her, men kommer til udtryk i endnu længere tilbagebetalingstid, da systemet er mindre rentabelt i forvejen. Også her ligger den valgte fibercement i den mest klimaeffektive ende, hvorfor man skal regne med mindre rentabilitet ved andre facadematerialer.

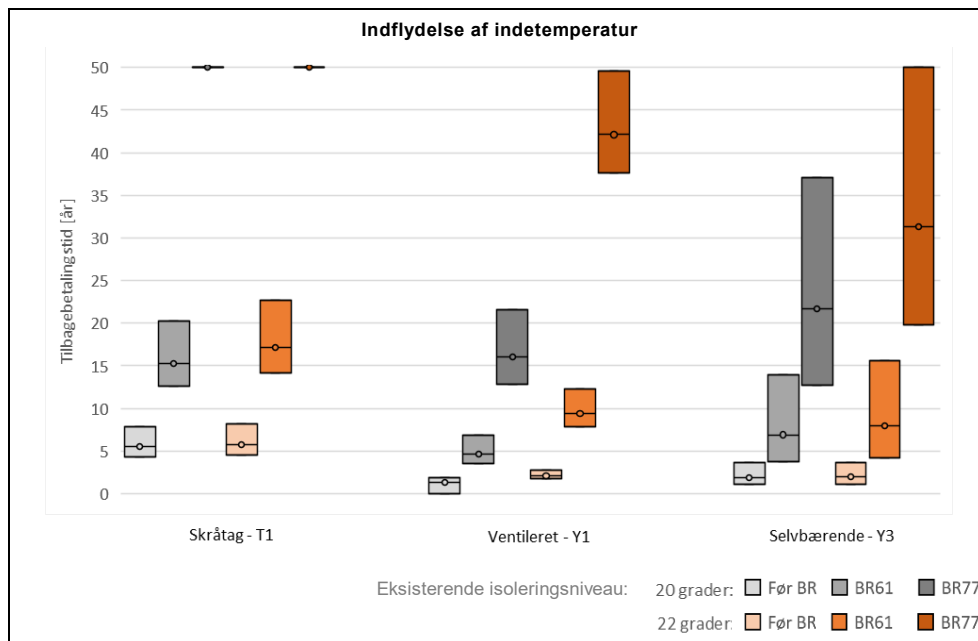
### 3.3.2 Indetemperatur

Bygningens energibehov til rumopvarmning blev beregnet med standardantagelserne i SBI-rapport 213 (Aggerholm, 2018). Når den forventede faktiske forbrug skal estimeres praksis, bør forudsætningerne tilpasses de konkrete forhold bedst muligt, herunder ved hjælp af det målte energiforbrug (Mortensen et al., 2018). En væsentlig faktor er indetemperaturen i opvarmningssæsonen, som ofte overstiger 20 °C, især i velisolerede bygninger. Dette forklares med den rebound-effekten, hvor energiforbruget ofte er større end forventet, jo bedre bygningens energistandard er (Gram-Hansen & Rhiger Hansen, 2019). Konkret beregnes variation af indetemperatur ved at tilpasse antal gradtimer efter reovering:

$$\Phi_{konstruktion} = U_{før} * 90,36 - U_{efter} * 101 [kWh/m^2/år]$$

$$\Phi_{kuldebroer} = \Psi_{før} * 90,36 - \Psi_{efter} * 101 [kWh/m^2/år]$$

En stikprøve for tre isoleringstiltag (Figur 25) viser, at en stigning af indetemperaturen fra 20 til 22 °C efter reoveringen medfører længere tilbagebetalingstider. Det skyldes det øgede energibehov efter reovering på grund af temperaturstigningen, som modvirker energibesparelsen. Effekten bliver større, jo længere tilbagebetalingstiden er.



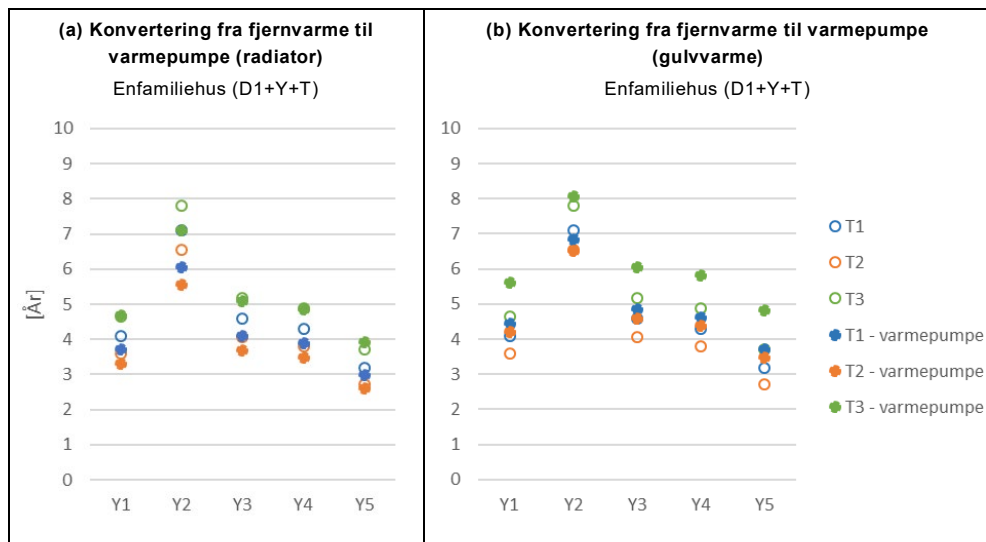
**Figur 25.** Variation af indetemperatur efter renovering. Vise variant med uændret indetemperatur på 20 °C (grå) og stigning fra 20 til 22 °C (orange). Eksempler for isoleringstiltag T1, Y1 og Y3 med både isoleringslag og beklædning. Beregnet med udgangspunkt i før BR energikrav, BR61, BR77 og med moderat niveau for efterisolering. Metode følger komponentanalysen af isoleringstiltag.

Det kan konkluderes, at en forøgelse af indetemperatur med 2 °C har en tydelig effekt, som især gør sig gældende i mindre rentable tiltag. Det skal bemærkes, at indetemperaturen både før og efter renovering kan afvige fra 20 °C og afhænger forhold som udformningen af renoveringen, bygningens drift og øvrige egenskaber samt beboerne. Det anbefales derfor at undersøge disse forhold grundigt inden planlægningen af renoveringen.

### 3.3.3 Varmekilde

Bygningens varmforsyning påvirker klimapåvirkning fra drift (B6) på to måder. Den ene faktor er produktion og transport af energi frem til bygningen. Den anden er virkningsgraden af varmeinstallationen i bygningen. I en stikprøve undersøges indflydelsen af varmforsyning ved at sammenligne et scenarie, hvor direkte fjernvarme bibeholdes med en konvertering til luft-til-vand varmepumpe (SCOP=4). Beregningen er udført som energirammeberegning. Stikprøven indeholder efterisolering af alle tre bygningsdele tage, ydervægge og terrændæk, men i forskellige kombinationer af isoleringstiltag.

Både fjernvarme og el forventes at nå den laveste klimapåvirkning omkring år 2030, se Figur 2. Klimapåvirkning for el ender dog på et lavere niveau en fjernvarme, især når man også medregner varmepumpens energieffektivitet. I en stikprøve ses derfor, at konvertering til varmepumpe er meget rentabel (Figur 26). Skift til gulvvarme (b) i det nye terrændæk forlænger tilbagebetalingstiden kun uvæsentligt, men vil stadig give den største reduktion i klimapåvirkning på den lange bane.



**Figur 26.** Tilbagebetalingstid for konvertering fra fjernvarme (cirkel) til eldrevet luft-til-vand varmepumpe (punkt). Variant (a) beholder eksisterende radiatorer, variant (b) har gulvvarme og lav fremløbstemperatur. Materialepåvirkninger i (b) inkluderer varmepumpe. Gulvvarmeslanger indgår kun i variant (b). Resultater viser varianter af en kombination af efterisolering af tage, ydervægge og terrændæk (kun D1) af casen enfamiliehus. Udgangspunkt er lavt eksisterende isoleringsniveau og moderat efterisoleringsniveau. Energibesparelse beregnet med energirammeberegning. Varmepumpe har en SCOP på 4,37 / 3,42 for henholdsvis høj / lav temperatur.

Det kan konkluderes, at skift fra fjernvarme til luft-til-vand varmepumpe i dag reducerer tilbagebetalingstiden for efterisolering. Efterisoleringens tilbagebetalingstider i denne rapport ville derfor tydeligt påvirkes af konvertering til varmepumpe.

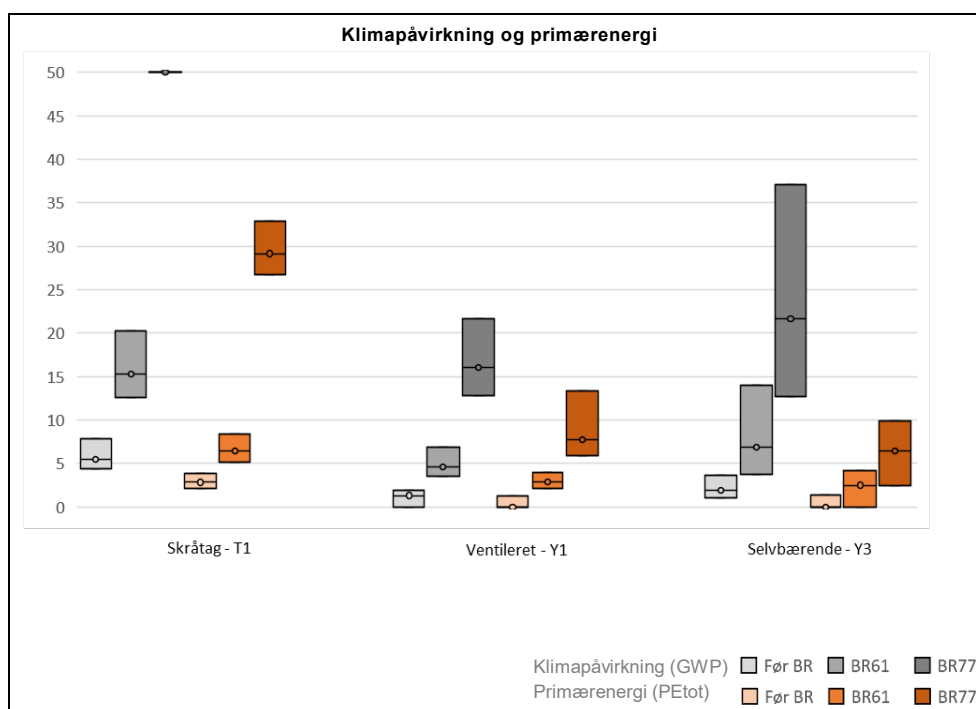
Denne stikprøve er ikke egnet til at vurdere, hvilken varmeforsyning der er mest klimaefektivt i renoveringer, da dette kræver en selvstændig rentabilitetsberegning af den specifikke løsning.

### 3.3.4 Miljøindikator (primærenergi)

Nærværende rapport fokuserer på klimapåvirkning som eneste måde, hvorved byggeri påvirker miljøet. Denne afgrænsning udspringer en generel dominans af klimahensyn i politiske aftaler samt i virkemidler som den frivillige bæredygtighedsklasse og de planlagte CO<sub>2</sub>-grænser i Danmark. En sådan begrænsning ligger ikke forankret i LCA-metoden, som normalt indebærer en vurdering af, hvilke indikatorer inden for ressourceforbrug, miljøpåvirkning og affaldsproduktionen der er mest relevant at bruge i en specifik livscyklusvurdering. Eksempelvis indeholder EPD'er en lang række indikatorer i henhold til standarden EN 15804 (CEN/TC350, 2014, 2019). Valg af eller håndtering af flere indikatorer kræver yderligere metodeudvikling og harmonisering af vægtning blandt indikatorerne. Samtidig har klimapåvirkningen, eller carbon footprinting i international kontekst, etableret sig som en populær målestok for vurdering af bygningers miljøaftryk generelt. Denne forenkling kan ses som nødvendigt, men midlertidigt trin hen imod en mere helhedsorienteret miljøvurdering af bygningers livscyklus. Bland mulige alternative indikatorer er der i denne usikkerhedsanalyse valgt primærenergi som et af de mere håndgribelige eksempler. Primærenergi forstås som den energi, som blev brugt eller indlejret i processer og materialer, regnet ud fra energikilden. Total primærenergi betyder summen af både fornybare og fossile kilder.

Figur 27 viser tilbagebetalingstiderne for tre udvalgte tiltag, både beregnet på basis af klimapåvirkning og fra primærenergi. Det viser, at rentabiliteten er bedre, når man anvender indikatoren for primærenergi. Eksemplet illustrer, at konklusioner kan afvige afhængigt af, hvilke indikatorer man anvender i de her viste rentabilitetsberegninger baseret på LCA.

Forskel mellem klimapåvirkning og primærenergi for de anvendte datasæt kan ses i Bilag 1 (Tabellerne 19-20, henholdsvis Figur 48). Et af de markante træk ved primærenergi er, at materialer med høj brændeværdi som træuld ligger på et lignende niveau som materialer med energitunge processer som sten- og glasuld eller materialer af råolie som skumplast. Sammenligning mellem klimapåvirkning og primærenergi kan også vise kendetegn af produktudvikling. Stenuldsproducent 3 har reduceret klimapåvirkningen af isolering ifølge de nye, foreløbige data markant, sammenlignet med det gældende datasæt. Det samme gælder ikke for forbrug af primærenergi, som er steget let efter omstilling af produktionen. Primærenergiforbrug er en relevant størrelse relevant for samfundet, da energi, ikke mindst fra vedvarende kilder, er en knap og dyrebar ressource, som har mange anvendelser ud over bygningsisolering. Det må konkluderes, at primærenergi og klimapåvirkning kun er to eksempel blandt flere andre miljøindikatorer, som giver et mere nuanceret billede af bygningers indflydelse på miljøet.



**Figur 27.** Sammenligning af tilbagebetalingstider beregnet på basis af henholdsvis klimapåvirkning (grå) og primærenergi (orange). Primærenergi er den totale mængde energi inklusive vedvarende og fossile kilder.

### 3.4 Konklusion

Målet med rentabilitetsbetragtningen er at opnå en klimamæssig nettogevinst med efterisolering. Den klimamæssige tilbagebetalingstid viser, hvornår energibesparelsen vil udligne materialepåvirkningerne. Der blev undersøgt kombinationer af isoleringstyper- og produkter i 10 efterisoleringstiltag. Endvidere er den eksisterende og den nye isolering delt op i tre niveauer.

Det kan konkluderes, at isoleringstiltagene normalt vil kunne udligne materialepåvirkningerne med energibesparelsen indenfor 50 år og dermed være klimamæssigt rentable. En stor spredning af tilbagebetalingstiden indikerer dog, at rentabilitet kan svinge i bygninger med forskellige energimæssige udgangspunkt og at der er plads til optimering af efterisoleringens udformning. Optimering kan indebære valg af isoleringstiltag, -type, -niveau og -produkt.

Bygningsreglementets komponentkrav til energibesparelse ved ombygning og ændret anvendelse ligger på et klimamæssigt rentabelt niveau for tage og ydervægge. Det gælder ikke for de stramme BR-krav til terrændæk, som ikke ville være betalt tilbage indenfor 50 år.

Isoleringsmaterialerne alene uden at medregne klimapåvirkning af eventuel nødvendige materialer til beklædning er stort set altid klimamæssigt rentable. Denne betragtning gælder eksempelvis, når den eksisterende tag- eller facadebeklædning henholdsvis gulvbelægning er renoveringsmoden og skal udskiftes. Men selv når beklædningsmaterialerne inkluderes, findes der rentable konstellationer for alle isoleringstiltag. Ikke-rentable tiltag findes dér, hvor forskellen mellem den eksisterende og den nye isolans ikke er stort nok til at kunne opnå balancepunktet inden for 50 år.

Valg af isoleringstype påvirker også rentabiliteten. Generelt er isoleringstyperne mere rentable, hvor deres typiske anvendelse ligger. Isolering af mellemrum er derfor mest rentabelt med fleksible isoleringstyper og granulat end isoleringsplader. Når isoleringen skal være stabil eller trykfast, kan det både være fiber- eller skumbaseret isolering, som er mest rentabel, afhængigt af det konkrete tiltag.

Isoleringsprodukterne viser også en generelt spredning i rentabilitet, set inden for isoleringstyperne. Ud over forskel blandt producenter er der fundet sammenhæng med en række underparametre af isolering. Eksempelvis har isoleringens lambda-værdien indflydelse på rentabiliteten. Sammenhængen kan dog føre til spredning i modsatte retninger afhængigt af isoleringstype. Det samme mønster gælder for forholdet mellem generiske data og specifikke EPD'er. Det betyder, at brug af generiske data som erstatning for EPD'er kan både give for optimistiske eller pessimistiske estimater. Effekten bliver større i beregninger for en enkel bygningsdel, hvor forskellen har en relativ større effekt på resultatet og afvigelsen ikke fortyndes af andre bygningsdele.

Ifølge case-analysen afhænger rentabiliteten af isoleringstiltagene ikke bygningstypen. Usikkerhedsanalysen demonstrerer, at valg af beklædningsmateriale og stigning af indetemperatur efter renovering har en mærkbar indflydelse på resultatet. Skulle beklædningsmaterialet ikke være fastlagt på beregningens tidspunkt, kan der med fordel bruges et spænd af sandsynlige løsninger. Indetemperaturen er en af de forudsætninger, som spiller ind i forskellen mellem energibehov, som er beregnet med standardforudsætninger, og det faktiske forbrug. For at undgå et for lavt energiforbrug bør forudsætningerne, herunder indetemperatur, kalibreres tilsvarende til det målte forbrug i bygningen. Størrelsesordenen af en mulig rebound-effekt er dog vanskeligt at forudsige i konkrete projekter. Under alle omstændigheder vil en forøgelse af indetemperaturen efter renoveringen forlænge tilbagebetalingstiden.

Endelig har den valgte systemafgrænsning til LCA indflydelse på resultater. Når byggeprocessens moduler A4-5 inkluderes, ville efterisoleringens klimapåvirkning øges og rentabiliteten reduceres.

Et kendetegn ved rentabilitetsberegninger er, at forskelle i balancen mellem belastninger og gevinster skaleres op med tilbagebetalingstiden. Da udsving forstørres med længden af tilbagebetalingstiden, er rentable løsninger også mere følsomme over for usikkerhed i indgangsparametrene.

Den eksisterende bygningsmasse udgør en stor del af den samlede klimapåvirkning, men også et stort potentiale på at nedbringe Danmarks klimaaftryk. Derfor er klimaeffektiv renovering i dag en måde at reducere udledning af drivhusgaser på. Jo kortere den klimamæssige tilbagebetalingstid for renoveringen er, jo hurtigere kan der opnås en reel reduktion. Med henblik på tilgængelighed af EPD'er for de fleste isoleringstyper er forudsætningerne for rådgivere til at udføre rentabilitetsberegninger i projektering til stede. Det kræver dog opmærksomhed på valg af udgangsparametre, som kan være følsomme over for udsving i resultatet.

Klimapåvirkning er blot én indikator af bygningers miljøpåvirkning. Eksemplet med primærenergiforbrug illustrerer, at både tilbagebetalingstider og produktsammenligninger kan vise forskellige resultater, alt efter hvilken indikator man anvender.

The background of the page is filled with a pattern of thin, dark blue, wavy lines that create a sense of movement and depth. These lines are arranged in concentric, slightly irregular curves that flow across the entire page.

4

# UDSKIFTNING AF VINDUER

## 4 UDSKIFTNING AF VINDUER

### 4.1 Metode

#### 4.1.1 Generel

Studiet undersøger forskelle i nettopåvirkninger for typiske løsninger. De undersøgte variabler er materialevalg for ramme/karm, antal ruder, tilgængelige miljødata / EPD for vinduer leveret til Danmark samt variation i orientering i bygningen og den valgte energiforsyning. Profilmaterialer inkluderer træ, træ/alu og aluminium, som kombineres med både 2- og 3-lags ruder. De anvendte miljødata udgør de tilgængelige data, som er relateret til produkter fra danske og udenlandske producenter, som leverer til Danmark.

Analysen er baseret på energirammeberegninger med programmet BR18 af de tre bygningsscases (se 0). I beregningen er isoleringsniveauet af klimaskærmen sat til oprindelig tilstand på niveau med BR77 (Tabel 7) og moderat niveau af efterisolering for de scenarier hvor vinduesudskiftningen sker sammen med en efterisolering. (Tabel 5).

For 2-lags vinduet er der benyttet en U-værdi på 1,3 W/m<sup>2</sup>K og g-værdi på 0,73. For 3-lags vinduet er der benyttet en U-værdi på 0,9 W/m<sup>2</sup>K og g-værdi på 0,53, se dokumentation af inddata for energirammeberegningen af de tre cases i 0.

Analysen betragter en periode over 50 år. Det resulterer i udskiftninger af ruder efter 25 år og udskiftning af et helt vindue efter 40 år, hvis ramme/karm er af træ. For træ/alu og alu udskiftes ramme/kram ikke da levetiden for disse regnes til mindst 50 år.

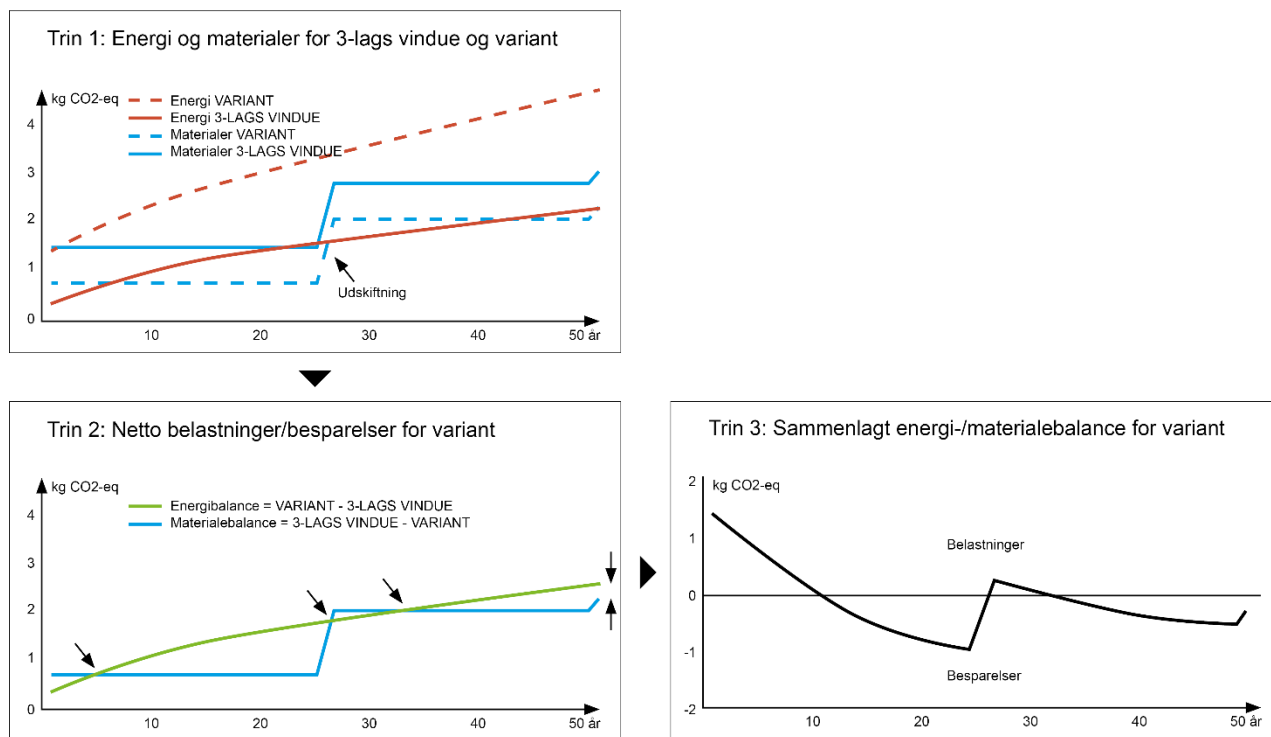
#### 4.1.2 Nettobalance

I analysen af vinduesudskiftning beregnes først klimapåvirkninger for energi og materialer separat for at opnå nettobalancen, se Figur 28. I modsætning til isoleringsstudiet antages her (Tabel 2), at det er besluttet at vinduerne skal udskiftes. Med de nuværende krav om A-mærkede vinduer vil det for langt de fleste fabrikaters vedkommende betyde, at der skal udskiftes til 3-lags vinduer. Undersøgelses formål er derfor, at undersøge den klimamæssige betydning af alternativer til 3-lags vinduer både med hensyn til materialevalg og orientering. I et første trin beregnes derfor klimapåvirkningen relateret til energiforbrug og materialer for begge varianter. De to røde kurver viser den forskel der opnås i beregnet energibehov for alternative løsninger til 3-lags løsningen. Da der indgår 2-lags vinduer i de forskellige scenarier, vil der generelt være et forøget energibehov til bygningens drift over den 50 årige betragtningsperiode. De røde kurver viser således den akkumulerede forøgede klimapåvirkning for driften i forhold til udgangspunktet med 3-lags vinduer. Forøgelsen i klimapåvirkningen fra driften skal imidlertid sammenholdes med klimapåvirkningen fra de anvendte materialer i profiler og ruder (blå kurver). Det inkluderer eventuelle udskiftninger af ruder og eventuelt hele vinduet i løbet af 50 år. I dette eksempel har udgangspunktet (3-lags vinduer gennemgående line) lavere påvirkninger fra en bedre energibalancel, men højere påvirkninger fra materialerne.

Dette forhold illustreres nærmere i trin 2. Grafen viser resultater for varianten i forhold til udgangsløsningen. Den grønne kurve viser forøgelsen af den energirelaterede påvirkning - det vil sige forskellen mellem den optrukne røde og den stiplede røde kurve fra trin 1 i Figur 28. Dermed er det muligt at aflæse, om der i løbet af betragtningsperioden (50 år) opnås en samlet besparelse af klimapåvirkning ved at kompensere den forøgede påvirkning fra driften (de grønne kurve) med lavede påvirkning fra materialerne (den blå kurve). I dette eksempel er der flere skæringspunkter og der opnås skiftevis nettobesparelser og –

belastninger over 50 år. Idet den blå kurve afspejler den reducerede klimapåvirkning fra materialerne ved at anvende 2-lags vinduer frem for 3-lags vinduer og den grønne kurve afspejler forøgelsen i klimapåvirkningen fra driften, ses det, at der efter 50år ikke opnås klimamæssig rentabilitet. Den grønne kurve (forøgelse i energirelateret påvirkning) ligger over den blå kurve (reduceret påvirkning fra materialer).

Dette kan udtrykkes endnu simplere i grafen ved trin 3, hvor de to foregående kurver er opsummeret. De udsnit af kurven, som ligger over nullinjen illustrerer perioder med en netto-belastning, mens de perioder hvor kurven er under nullinjen indikerer nettobesparelser.



Figur 28. Princip for beregning af nettopåvirkninger for vinduesudskiftning.

### 4.1.3 Miljødata for vinduer

Data for vinduernes klimapåvirkning stammer fra EPD'er og fra den generiske database Ökobaudat (se Tabellerne 10-12). Der er anvendt både generelle branche EPD'er, specifikke produkt-EPD'er og produkt-EPD'er med data repræsenterende flere produkter.

Tablet 10. Miljødata for vinduer med ramme og karm af træ

TRÆ/TRÆ	EPD 1	EPD 2	EPD 3	Ökobaudat / LCAByg (Ökobaudat 2020 II)
EPD-type	Specifik	Specifik	Branche	Generisk
EPD nummer	NEPD-2384-1126-EN	NEPD-2532-1275-NO		Glas: fa9f6670-3170-4597-92ab-a2fdec7f1451 Ramme: 318f08e0-1b04-49eb-ab16-531482cd75da Karm: 318f08e0-1b04-49eb-ab16-531482cd75da

Faser	A1-3, B4, C3-4	A1-3, B4, C3-4	A1-3	A1-3, B4, C3-4
Omfang af materialer	Ramme/karm: træ (26%) Glasrude (67%) Andet (7%)	Ramme/karm: træ (30%) Glasrude (63%) Beslag (4%) Andet (3%)	Ramme/karm: træ (25%) Glasrude (67%) Andet (8%)	Ramme/karm: træ (32%) Glasrude (60%) EPDM-tætning (6%) Beslag (3%)
Vægtangivelse	Absolut og relativ fordeling mellem komponenter samt totalvægt.	Absolut og relativ fordeling mellem komponenter samt totalvægt.	Relativ fordeling mellem komponenter.	Absolut og relativ fordeling mellem komponenter samt totalvægt.
Totalvægt [kg/m <sup>2</sup> ]	35,6	36,1	-	30,3
Glastykkelse	-	-	-	4 mm
Antal lag glas	3	3	3	3
Produktionsland	Norge	Norge	Danmark / Polen	-
Vinduesstørrelse [m <sup>2</sup> ]	1,23 m x 1,48 m	1,23 m x 1,48 m	1 (nedskaleret 1,23mx1,48m)	1 m <sup>2</sup>
Levetid	40 år	40 år	-	50 år
Udskiftninger	1 vinduesskift	1 vinduesskift	1 vinduesskift	1 vinduesskift
Oplyst genbrugsgrad	25% aluminium 18% glas	-	-	-
<p>Tilpasninger:</p> <p>EPD 1: Klimapåvirkninger er skaleret ned til 1 m<sup>2</sup>.</p> <p>EPD 2: Der er angivet klimapåvirkning for 0,5 udskiftning i EPD'en. Denne værdi er ganget med 2 for at medtage 1 udskiftning. Klimapåvirkninger er skaleret ned til 1 m<sup>2</sup>.</p> <p>EPD 3: Klimapåvirkninger i fase B4 og C3-C4 er tilføjet fra Ökobaudat.</p>				

**Tabel 11.** Miljødata for vinduer med ramme og karm af træ/alu

TRÆ/ALU	EPD 4	EPD 5	EPD 6	Ökobaudat / LCByg (Ökobaudat 2020 II)
EPD-type	Specifik	Specifik	Branche	Generisk
EPD nummer	NEPD-2385-1126-EN	NEPD-2532-1275-NO		Glas: fa9f6670-3170-4597-92ab-a2fdec7f1451 Ramme: c1cacd2c-d98d-4795-84db-b567d25bb1ed Karm: dfa64bbb-dc8d-497b-9557-300416b8448f
Faser	A1-3, B4, C3-4	A1-3, C3-4	A1-3	A1-3, B4, C3-4
Omfang af materialer	Ramme/karm: træ (25%) Glasrude (65%) Aluminium (4%) Andet (7%)	Ramme/karm: træ (28%) Glasrude (60%) Aluminium (6%) Beslag og skruer (4%) Andet (2%)	Ramme/karm: træ (20%) Glasrude (62%) Aluminium (6%) Plast (7%) Beslag og skruer (3%) Andet (2%)	Ramme/karm: træ (30%) Glasrude (56%) Aluminium (6%) EPDM-tætning (5%) Beslag (3%)
Vægtangivelse	Absolut og relativ fordeling mellem komponenter samt totalvægt.	Absolut og relativ fordeling mellem komponenter samt totalvægt.	Relativ fordeling mellem komponenter.	Absolut og relativ fordeling mellem komponenter samt totalvægt.
Totalvægt [kg/m <sup>2</sup> ]	36,9	37,8		32,8
Glasykkelse	-	-	-	4 mm
Antal lag glas	3	3	3	3
Produktionsland	Norge	Norge	Danmark / Polen	-
Vinduesstørrelse	1,23 m x 1,48 m	1,23 m x 1,48 m	1 (nedskaleret 1,23mx1,48m)	1 m <sup>2</sup>
Levetid	60 år	60 år	50 år	50 år
Udskiftninger	1 rudeskift (30 år)	1 rudeskift (30 år)	1 rudeskift (25 år)	1 rudeskift (25 år)
Oplyst genbrugsgrad	25% aluminium 18% glas	-	-	-
<p>Tilpasninger:</p> <p>EPD 4: I fase B4 er medtaget klimapåvirkning angivet i fase B2 i EPD'en, som antages at omfatte klimapåvirkningen for både vedligehold og udskiftning i løbet af levetiden dvs. B2+B4. Klimapåvirkninger er skaleret ned til 1 m<sup>2</sup>.</p> <p>EPD 5: Værdien for fase B4 er fastlagt som samme andel af klimapåvirkningen i fase A1-A3, som oplyst i EPD 4. Klimapåvirkninger er skaleret ned til 1 m<sup>2</sup>.</p> <p>EPD 6: Klimapåvirkninger i fase B4 og C3-C4 er tilføjet fra Ökobaudat.</p>				

**Tabel 12.** Miljødata for vinduer/facadesystem med ramme og karm af aluminium

ALU/ALU	EPD 7	EPD 8	EPD 9	Ökobaudat / LCByg (Ökobaudat 2020 II)	EPD 10
EPD-type	Specifik (flere produkter)	Specifik (flere produkter)	Branche		2-lags og 3-lags ruder (gældende for alle ramme-karm typer) – Branche EPD
EPD nummer	MD-18001-EN_rev1	MD-20036-EN		Glas: fa9f6670-3170-4597-92ab-a2fdec7f1451 Ramme: c1cacd2c-d98d-4795-84db-b567d25bb1ed Karm: dfa64bbb-dc8d-497b-9557-300416b8448f	M-EPD-MIG-GB-002029
Faser	A1-3	A1-3, B4, C3-4	A1-3	A1-3, B4, C3-4	A1-3, C3-4
Omfang af materialer	Profil: alu (20%) Glasrude (76%) Andet (4%)	Profil: alu (20%) Glasrude (76%) Andet (4%)	Profil: alu (18%) Glasrude (70%) Plast (7%) Beslag og skruer (5%) Andet (1%)	Profil: alu (24%) Glasrude (73%) EPDM-tætning (3%)	Glas og spacer
Vægtangivelse	Relativ fordeling mellem komponenter fælles for flere produkter samt totalvægt for hvert produkt.	Relativ fordeling mellem komponenter fælles for flere produkter samt totalvægt for hvert produkt.	Relativ fordeling mellem komponenter.	Absolut og relativ fordeling mellem komponenter samt totalvægt.	
Totalvægt [kg/m <sup>2</sup> ]	40,4	37,7		24,9	
Glastykkelse	6-18-4-18-4	6-15-4-15-8	-	4 mm	2-lags:4-12-4 3-lags: 4-12-4-12-4
Antal lag glas	3	3	3	3	2 og 3
Produktionsland	Danmark	Danmark	Danmark	-	
Vinduesstørrelse [m <sup>2</sup> ]	1 (nedskaleret 3x3 m)	1 (nedskaleret 2,45mx2,3m)	1 (nedskaleret 1,23mx1,48m)	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>
Levetid	-	50	-	50 år	
Udskiftninger	1 rudeskift (25 år)	1 rudeskift (25 år)	1 rudeskift (25 år)	1 rudeskift (25 år)	
Oplyst genbrugsgrad	70% aluminium	25% glas 95% aluminium	-	-	
EPD nr.					
<p>Tilpasninger:</p> <p>EPD 7: Vindueskomponenter er angivet i interval. Der er valgt en fordeling, som ligner fordelingen for en standard alufacade i Ökobaudat. Der er benyttet samme fordeling i EPD 7 og EPD 8. Klimapåvirkninger i fase A1-A3 er korrigeret til en glastykkelse på 4 mm. Korrektionen er foretaget proportionalt ift. vægt. Klimapåvirkninger i fase B4 og C3-C4 er tilføjet fra EPD 8 efter korrektion for glastykkelse på 4 mm.</p> <p>EPD 8: Vindueskomponenter er angivet i interval. Der er valgt en fordeling, som ligner fordelingen for en standard alufacade i Ökobaudat. Der er benyttet samme fordeling i EPD 7 og EPD 8. Klimapåvirkninger i fase A1-A3, B4 og C3-C4 er korrigeret til en glastykkelse på 4 mm. Korrektionen er foretaget proportionalt ift. vægt.</p> <p>EPD 9: Klimapåvirkninger i fase B4 og C3-4 er tilføjet fra Ökobaudat.</p>					

De valgte EPD'er oplyser ikke alle produkttegenskaber på en fuldstændig eller konsistent måde, som ellers er en forudsætning for at kunne gennemføre de sammenlignende analyser. Det gælder eksempelvis variation af, hvilket omfang af mindre mængder såsom beslag, plastic, maling, lim, fuger og emballage der medtages i miljødataene. Denne variation vurderes dog at være af mindre betydning, da rudeglas og rammeprofiler udgør de langt største påvirkninger. Andre mangler i datamaterialet er blevet rettet op ved hjælp af forskellige tilpasninger. De væsentlige tilpasningerne gennemgås efterfølgende. I øvrigt er samtlige tilpasninger også angivet specifikt for hver EPD i ovenstående tabeller.

Nogle EPD'er indeholder ikke klimapåvirkningen for alle faser. Branche EPD'er er suppleret med generiske data fra Ökobaudat og specifikke EPD'er er suppleret med data fra en sammenlignelig EPD.

Varianten med generiske data fra Ökobaudat er modelleret således, at mængder tager udgangspunkt i oplysninger om fordeling af mængder fra EPD'erne.

Eventuelt afvigende glastykkelsen er korrigeret til 4 mm ved skalering baseret på vægtforhold for de EPD'er, hvor glastykkelsen er angivet. EPD'er hvor glastykkelsen ikke er angivet, er ikke korrigeret for glastykkelse, men er kontrolleret ud fra glassets vægt.

Da samtlige EPD'er kun indeholder data for vinduer med 3-lags ruder, var det nødvendigt at skalere klimapåvirkningen forholdsmæssigt til 2-lags vinduer. Dette er sket ved hjælp af en EPD, som både indeholder data for 2- og 3-lags glas. Klimapåvirkningen for de resterende vindueskomponenter er bibeholdt ud fra en konservativ antagelse, at mængden for de resterende vindueskomponenter er nogenlunde identisk for 2- og 3-lags-vinduer.

## 4.2 Resultater og diskussion

Resultaterne angiver nettobalancen mellem materialer og drift ved at sammenligne en given variant med udgangspunktet, som er et nyt 3-lags vindue installeret i hele bygningen. Der vises et uddrag af resultater, som illustrerer de vigtigste tendenser. Samtlige grafer findes i Bilag 4.

Det skal understreges, at resultaterne er *forskellen* i klimapåvirkning mellem en given variant og 3-lags vinduer i alle facader, vurderet for en udskiftning af alle vinduer i én af de tre bygningseksempler. Det giver mulighed for at vurdere, om rene 2-lags eller blandede 2-/3-lags-løsninger kan være klimamæssigt rentable alternativer.

Graferne er sorteret efter de tre bygningseksempler. Først vises resultater af beregninger med udgangspunkt i den oprindelige tilstand af bygningen svarende til "lavt" niveau fra isoleringsstudiet. Derefter med en efterisoleret klimaskærm svarende til det moderate niveau af efterisolering fra afsnit om isolering. Disse grafer er ligeledes delt op i en serie af tre for hver type ramme/karm materiale og inden for materialet ses de forskellige kilder for miljødata/EPD'er.

Der er en række karakteristiske tendenser i alle resultater. Efter 25 år stiger belastningen markant på grund af rudeudskiftningen. Derudover stiger alle kurver med en aftagende hældning efter de første år, hvorefter kurven overgår til en lige linje. Det skyldes den forventede andel af vedvarende energi i fjernvarmeforsyningen på gennemsnitsbasis i Danmark. Denne stiger relativt hurtigt de første fem år og ligger næsten stabilt resten af perioden frem til 2050 (COWI-rapport).

Endvidere er klimabalancen generelt bedre, når 3-lags vinduer er placeret mod nord og 2-lags vinduer mod øvrige verdenshjørner, sammenholdt med en ren 2-lags løsning i alle vinduer. Det skyldes at der ved den kombinerede løsning samlet set opnås et bedre forhold mellem vinduernes samlede energieffektivitet og materialepåvirkning sammenlignet med en "ren" 2-lags løsning. Når 3-lags vinduer anvendes mod nord, hvor vinduets U-værdi er afgø-

rende for energibalancen og 2-lags vinduer anvendes mod øvrige orienteringer, hvor g-værdien i højere grad har betydning for energibalancen, kan der ved en kombineret løsning opnås en mere optimal sammenhæng mellem bygningens varmebehov og klimapåvirkningen fra produktion, udskiftning og bortskaffelse af materialerne. Det "optimale" forhold vil naturligvis variere fra bygning til bygning afhængig af vinduesarealets fordeling mellem de forskellige orienteringer og forholdet mellem andel af 3-lags- og 2-lags vinduer. Samtidig er det afgørende at den forøgede tilførsel af passiv solvarme som 2-lags vinduerne giver mulighed for, ikke samtidig medfører overophedning. For den konkrete etagebolig-case, har det vist sig muligt at bortventilere overskydende solvarme om sommeren. Er det ikke muligt, kan det være nødvendigt at anvende glas med lavere g-værdi. Det vil have negativ indflydelse på løsningens klimamæssige rentabilitet.

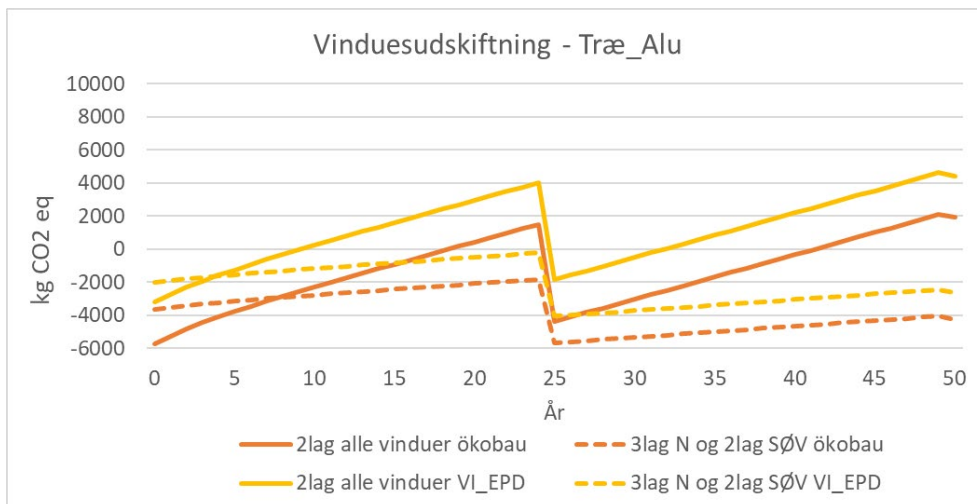
Hvis udgangspunktet er, at der sammen med vinduesudskiftningen også sker efterisolering af klimaskærmen viser resultaterne, at 2-lags løsningen og den kombinerede 3-lags og 2-lags løsning opnår ringere rentabilitet end udgangspunktet (den "rene" 3-lags løsning). Det skyldes, at det ved samtidig efterisolering ikke er muligt i samme grad at udnytte den forøgede passive solvarme som 2 lags ruderne giver mulighed for. Det medfører en direkte negativ indflydelse på bygningens energibehov og dermed også den samlede klimapåvirkning for disse scenarier. Som eneste bygningseksempel er det ved etageboligen i kombination af 2-/3-lags vinduer og en i forvejen eller samtidig efterisolering ikke rentabelt med denne løsning kontra den "rene" 3-lags løsning efter 50 år.

**Tabel 13** Oversigt over resultater for case med etagebolig sammenlignet med referencen, som er 3-lags vinduer over hele facaden. *Plus* betyder klimamæssig rentabilitet, én eller to *minus* indikerer, hvor meget klimapåvirkningen er værre end referencen.

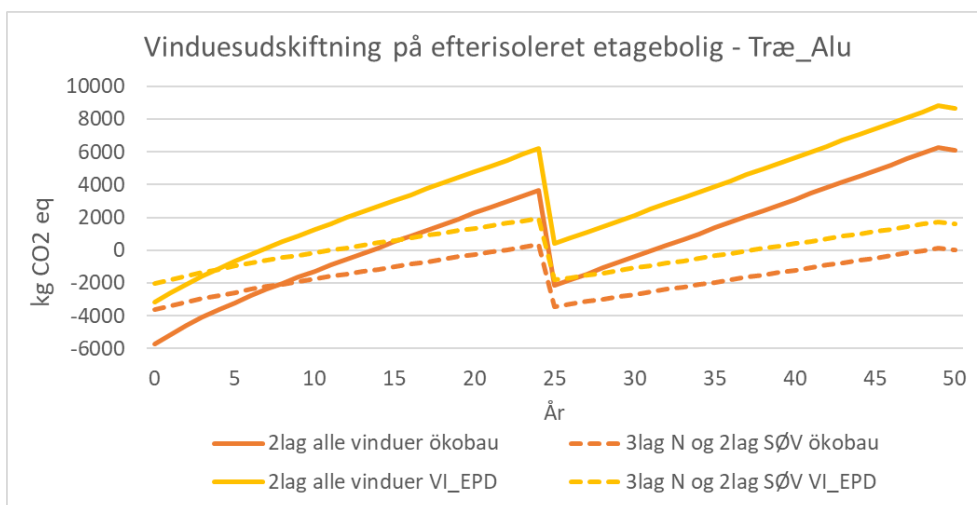
	2-lags vinduer i hele bygningen	3-lags vinduer mod nord og 2-lags vinduer mod syd, øst og vest.
Bygning uden efterisolering	–	+
Bygning med efterisolering	--	–

Tabel 13 samler resultaterne overordnet for etageboligen og viser, at den eneste løsning der sammenlignet med udgangspunktet (den rene 3-lags løsning) opnår bedre klimamæssig rentabilitet er, ved kombination af 3-lags og 2-lags vinduer uden samtidig efterisolering. Resultaterne indikerer også, at en vinduesudskiftning med udgangspunkt i den dårligt isolerede bygning vil være mere klimamæssigt rentabel end en tilsvarende udskiftning i en efterisoleret bygning.

Slutteligt har det vist sig, at vinduer beregnet med generiske miljødata fra Ökobaudat har en generel lavere påvirkning sammenlignet med EPD'erne. Man skal derfor være opmærksom på, at disse generiske data kan undervurdere vinduers klimabelastning i forhold til producenternes EPD'er.



**Figur 29.** Etagebolig: Ændring i klimapåvirkning ved udskiftning af træ/alu vinduer til 2-lags vinduer og kombination af 2-lags- og 3-lags vinduer frem for 3-lags vinduer for hhv. ökobau.dat data og gennemsnitsdata fra Vinduesindustrien.

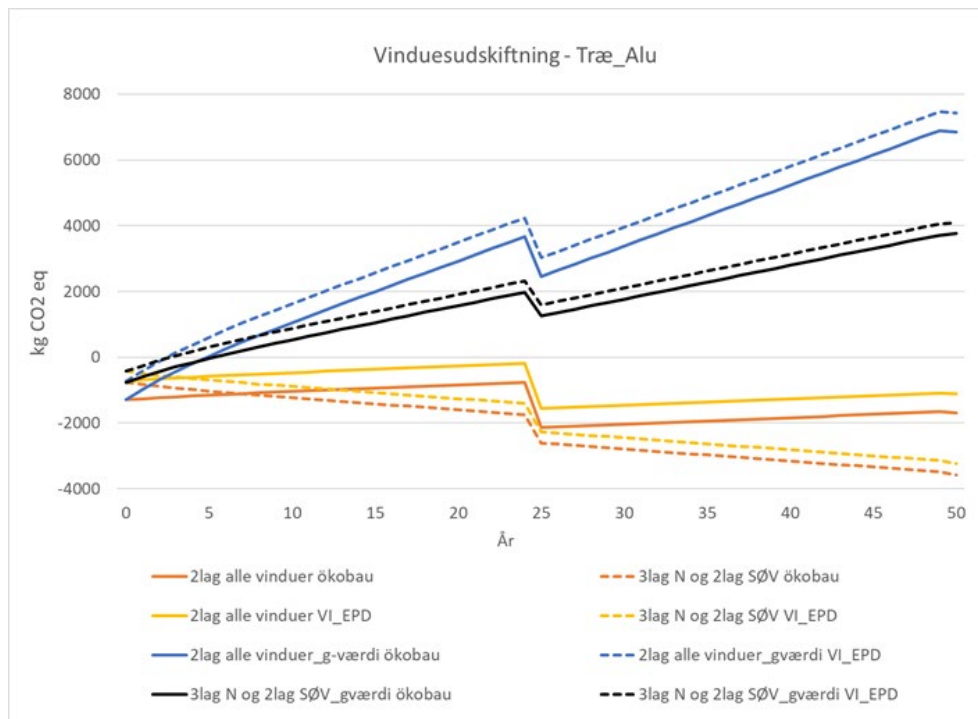


**Figur 30.** Etagebolig: Ændring i klimapåvirkning ved udskiftning af træ/alu vinduer til 2-lags vinduer frem for 3-lags vinduer på en efterisoleret etagebolig for hhv. ökobau.dat data og gennemsnitsdata fra Vinduesindustrien.

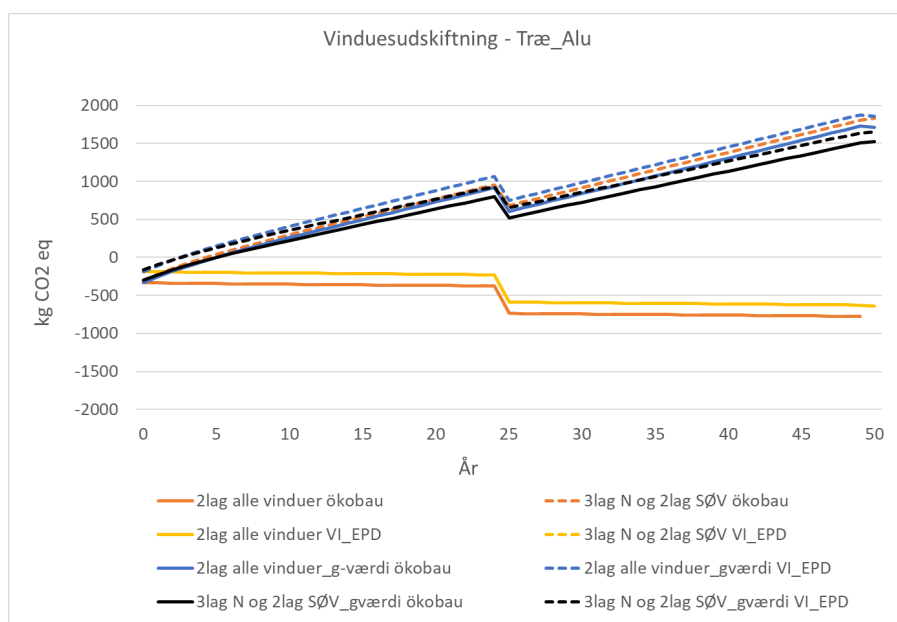
I de mindre huse er den hybride 2-/3-lags løsning (Figur 31-32: Gule og orange kurver) rentabel, både i bygninger med oprindeligt isoleringsniveau og efterisolerede huse. Det skyldes, at der ved kombination af 2-lags og 3-lags vinduer for denne case opnås en mere optimal sammenhæng mellem bidrag fra passiv solvarme og varmebesparelse i opvarmningssæsonen end ved udelukkende at anvende 3-lags vinduer. Det er imidlertid også en forudsætning at den ekstra tilførte passive solvarme gennem 2-lags vinduerne faktisk kan nyttiggøres og ikke skaber overophedning.

I varianten med efterisoleret klimaskærm viser Be18 resultater i enfamilie- og rækkehuse overophedning om sommeren ved brug af 2-lags ruder mod syd, øst og vest. Selvom indeklimaet ikke er genstand i dette studie, er der lavet et forsøg på at vise konsekvenser for at afhjælpe problemet. Én måde at reducere overophedning er at lade ruderne slippe mindre solenergi ind i huse ved at sænke g-værdien. G-værdien angiver den procentdel af solens varmestråler der løber gennem vinduet og ind i det bagvedliggende rum. De grønne kurver illustrerer konsekvenserne, hvor 2-lags vinduers g-værdi er blevet ændret på niveau med de anvendte 3-lags vinduer. Det har imidlertid den konsekvens at 2-lags vinduers fordele i energibalancen, nemlig en højere solindstråling i opvarmningssæsonen ikke opnås. Det giver 2-lags løsninger med reduceret g-værdi en væsentlig dårligere nettobalance. Dette sammenhæng viser tydelig sammenhængen mellem indeklima og miljø. Det er derfor en fordel

ved at sørge for, at solvarmen og -lyset gennem vinduer udnyttes bedst muligt, når det er kold og mørkt, men kan afskærmes eller filtreres, når der er risiko for overophedning og blænding. Her er det afgørende at pointere, at dette studie alene omfatter renovering, hvor der sammenlignet med nybyggeri normalt er større varmebehov i bygningen. Det betyder at der i renoveringsprojekter ofte kan nyttiggøres mere passiv solvarme, hvilket tydeligt har indflydelse på den klimamæssig rentabilitet af de enkelte løsninger.



**Figur 31.** Rækkehus: Ændring i klimapåvirkning ved udskiftning af træ/alu vinduer til 2-lags vinduer og kombination af 2-lags- og 3-lags vinduer frem for 3-lags vinduer for hhv. Ökobaudat data og gennemsnitsdata fra Vinduesindustrien. Betydningen af ændret g-værdi til eliminering af overophedning er vist som variationer benævnt "\_gværdi".



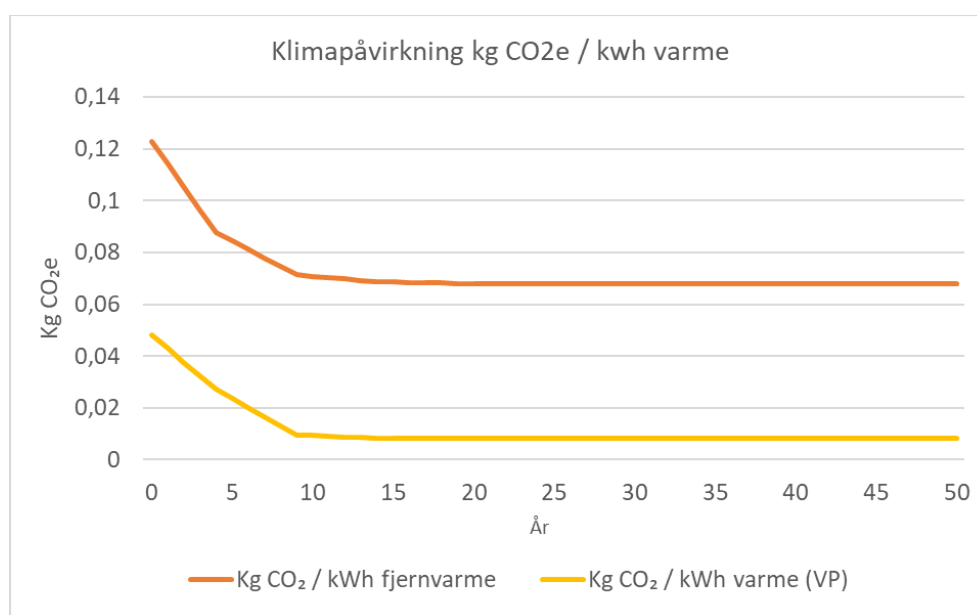
**Figur 32.** Enfamiliehus: Ændring i klimapåvirkning ved udskiftning af træ/alu vinduer til 2-lags vinduer og kombination af 2-lags- og 3-lags vinduer frem for 3-lags vinduer for hhv. ökobau.dat data og gennemsnitsdata fra Vinduesindustrien. Betydningen af ændret g-værdi til eliminering af overophedning er vist som variationer benævnt "\_gværdi".

## 4.3 Usikkerhedsanalyse

### 4.3.1 Varmekilde

I projektets analyser er der taget udgangspunkt i fjernvarme som forsyningsform. Forsyningsformen har stor indflydelse på den klimamæssige tilbagebetalingstid idet materialepåvirkningen netop sammenholdes med den tilhørende besparelse / forøgelse i klimapåvirkning fra driften af bygningen når den klimamæssige tilbagebetalingstid beregnes.

På Figur 33 er klimapåvirkningen pr. kWh varme vist for hhv. fjernvarme og varme produceret med varmepumpe. Figuren tager udgangspunkt i energistyrelsens fremskrivningsmodel for el og fjernvarme (COWI 2020) der også anvendes i FBK og DGNB. Konvertering fra el til varme via varmepumpen tager afsæt i anlægget anvendt i den konkrete case, hvor der opnås en Års-COP på varmeproduktion til rumvarme på 4,5. Det vil sige at der produceres 4,5 kWh varme pr. forbrugt kWh strøm.

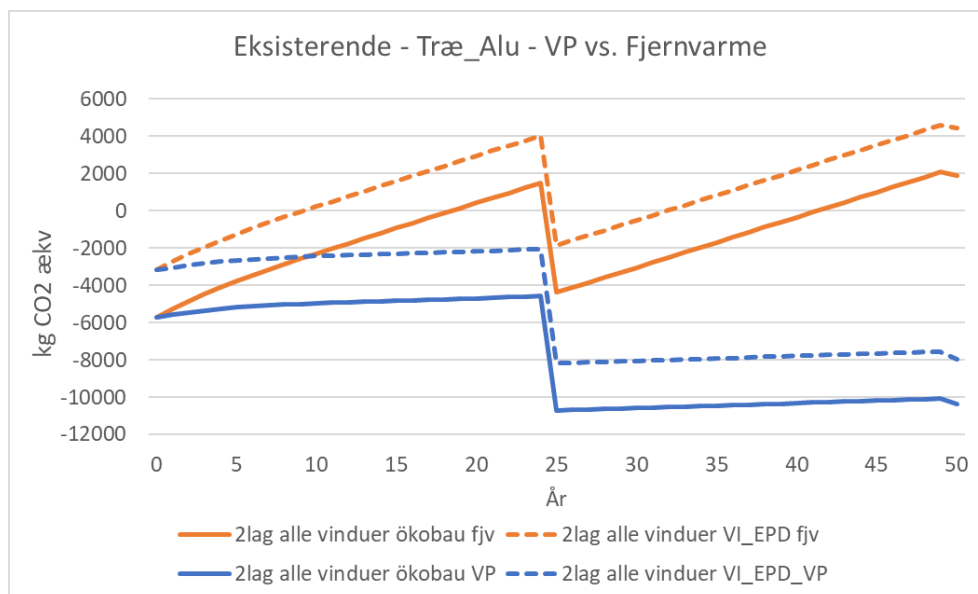


Figur 33 Klimapåvirkning pr. kWh varme for hhv. fjernvarme og varme produceret via varmepumpe

Forskellen mellem den driftsmæssige klimapåvirkning fra varme fra hhv. fjernvarme og varmepumpe har som nævnt betydning for den klimamæssige rentabilitet ved at anvende 2-lags vinduer frem for 3-lags vinduer. Denne forskel er præsenteret på Figur 34. De orange linjer repræsenterer forskellen i klimapåvirkning ved valg af 2-lags vinduer frem for 3-lags vinduer med fjernvarme som forsyningsform og med den optrukne streg for generiske data og den stiplede for Vinduesindustriens Branche-datasæt og begge for den eksisterende etagebolig. Da der efter 50 år opnås et resultat over "0" – hhv. ca. 2000 og 4000 kgCO<sub>2</sub>eq betyder det, at det ikke vil være en klimamæssig fordel at anvende 2lags vinduer frem for 3lags vinduer.

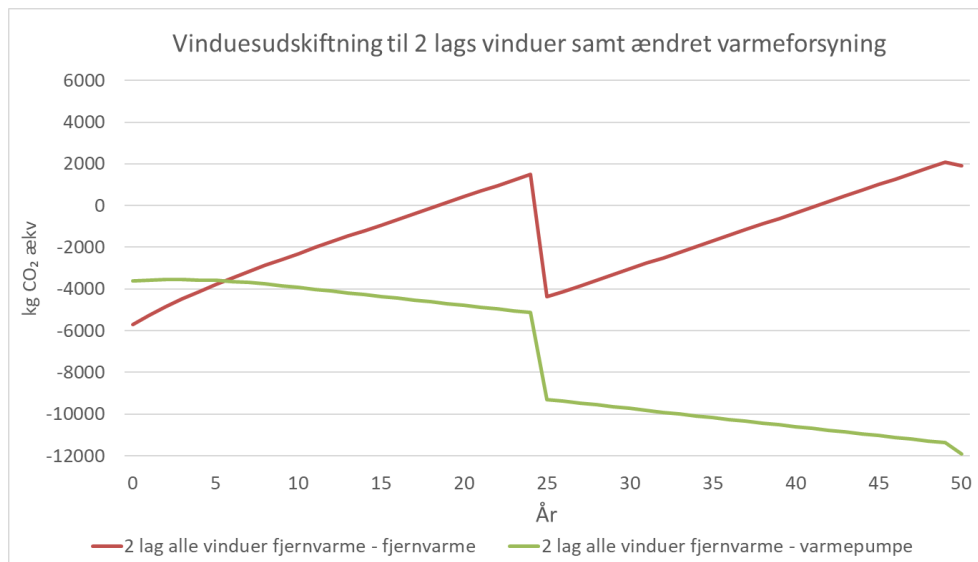
Tilsvarende er der optegnet kurver med varmepumpe som forsyning. Resultaterne efter 50 år er her markant under "0" hvilket betyder, at det med varmepumpe som forsyning vil være en klimamæssig fordel at anvende 2-lags vinduer frem for 3-lags vinduer. Det skyldes at forøgelsen i varmebehov ved 2-lags vinduer frem for 3-lags vinduer medfører langt mindre forøgelse i klimapåvirkning ved anvendelse af varmepumpe end ved fjernvarme. Den sparede klimapåvirkning fra materialer ved 2-lags vinduer frem for 3lags vinduer er således langt større, henholdsvis cirka 8.000 og 10.000 kgCO<sub>2</sub>eq (Figur 34) end den mer-påvirkning det forøgede varmebehov medfører.

Betydningen af at ændre forsyningsform er kun illustreret for denne ene variant (eksisterende etagebolig med træ/alu vinduer ændring fra 3-lags- til 2-lags vinduer). Tendensen vil dog være den samme for alle øvrige varianter i analysen og i analysen af det klimamæssigt optimale valg af vinduer ved fremtidige renoveringsprojekter, bør man derfor i høj grad tage hensyn til den fremtidige varmforsyningsform og dennes klimapåvirkning på kWh varme.



**Figur 34** Klimamæssig rentabilitet af 2-lags vinduer i forhold til 3-lags vinduer med varmforsyning via fjernvarme og varmepumpe

I resultaterne vist i Figur 34 tages der for fjernvarmescenariet udgangspunkt i, at den eksisterende fjernvarmeinstallation bibeholdes. På samme måde tages der for varmepumpe-scenariet udgangspunkt i, at der i forvejen sker opvarmning via et varmepumpe-system. Hvis der samtidig med udskiftning af vinduer også sker en konvertering fra fjernvarme til varmepumpe, er resultaterne som vist i Figur 35. Ved både at anvende 2-lags vinduer i stedet for 3-lags vinduer og samtidig ændre varmforsyningen fra fjernvarme til varmepumpe, sker der både en reduktion i påvirkningen fra materialer og drift. Reduktionen i drift sker på trods af et forøvet varmebehov (2-lags vinduer kontra 3-lags vinduer). Det forøgede varmebehov "kompenseres" så at sige ved at der udledes betydeligt mindre CO<sub>2</sub> pr kWh varme ved anvendelse af varmepumpen kontra fjernvarmen. Forholdet mellem klimapåvirkning fra varme fra fjernvarme og varme produceret via den forudsatte varmepumpe fremgår af Figur 33.



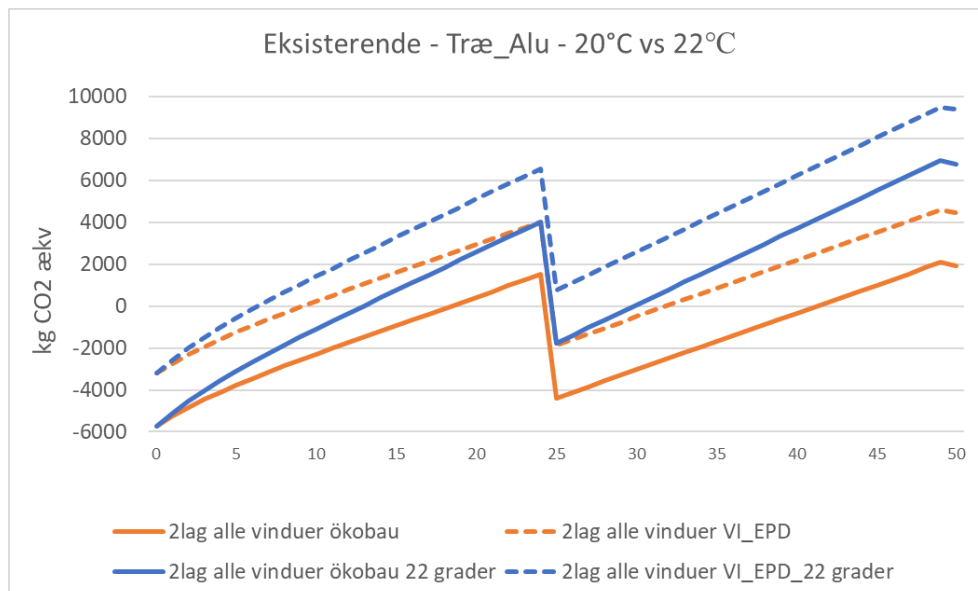
**Figur 35** Klimamæssig rentabilitet af 2-lags vinduer i forhold til 3-lags vinduer. I det ene tilfælde bibeholdes fjernvarme (rød), i det andet kombineres vinduesudskiftning med fra konvertering fra fjernvarme til varmepumpe (grøn).

### 4.3.2 Indetemperatur

I henhold til SBI-rapport 213 (Aggerholm, 2018) og DS 418 (Dansk Standard, 2020) anvendes der sædvanligvis en indetemperatur på 20 °C når det dimensionerende varmetab fra bygningen beregnes. Den samme temperatur anvendes, når BE18 resultater anvendes i beregning af energiforbrug til drift (fase B6) i LCA. Imidlertid vil man i praksis ofte have mere end 20 °C i indetemperatur. Undersøgelser har også vist en tendens til stigende indetemperatureer i opvarmningssæsonen efter en renovering (Gram Hansen 2020). Derfor er der med udgangspunkt i etageboligen foretaget en variation hvor der ses på forskellen mellem 3-lags løsningen og 2-lags løsningen såfremt indetemperaturen er 22 °C i stedet for 20 °C. Variationen er i øvrigt foretaget for den eksisterende bygning (kun vinduesudskiftning) og for træ/alu vinduet.

På Figur 36 angiver de orange linjer forskellen i klimapåvirkning mellem 3-lags- og 2-lags løsningen ved en indetemperatur på 20 °C. Den optrukne linje angiver resultatet for Ökobaudat data og den stiplede for vinduesindustriens datasæt. Tilsvarende angiver de blå linjer forskellen i klimapåvirkning mellem 3-lags og 2-lags løsningen ved en indetemperatur på 22 °C. Som det fremgår af figuren medfører en ændring i indetemperaturen til 22 °C at det klimamæssigt bliver ringere at vælge 2-lags frem for 3-lags løsningen. De blå linjer (22 °C) ligger for samme datasæt ca. 2000 kgCO<sub>2</sub>eq over de orange linjer (20 °C).

Det skyldes at en stigende indetemperatur medfører et større varmebehov både med 3-lags og 2-lags løsningen og samtidig også en større forskel i varmebehov mellem 3-lags og 2-lags løsningen. Den større forskel i varmebehov mellem Dermed bliver forøgelsen i driftsenergiens klimapåvirkning ved at anvende 2-lags vinduer frem for 3-lags vinduer større ved 22 °C end ved 20 °C. Det kan aflæses ved at hældningen mellem år 1-25 og år 26-50 er stejlere på de blå kurver end på de orange kurver.



**Figur 36** Betydning af variation i indetemperatur fra 20C til 22C for anvendelse af 2-lags vinduer for eksisterende etagebolig

### 4.3.3 Renhold

Renhold er i LCA-sammenhæng en del af modul B2 og betragtes derfor ikke i FBK eller DGNB. Der er i denne rapport imidlertid foretaget vurdering af renholdets betydning for vinduets samlede klimapåvirkning. Da det ikke har været muligt at tilvejebringe danske data for renhold er der anvendt data fra norske EPD'er (EPD5)

Data fra EPD5 repræsenterer hhv. træ/alu og træ/træ vindue. I EPD'en forudsættes jævnfør den norske NPCR 014 en indendørs overfladebehandling hvert 20. år for både træ/træ og træ/alu vinduet. Der udendørs vedligehold regnes træ/alu vinduet som vedligeholdelsesfrit over 50 år. Til gengæld regnes der med overfladebehandling på træ/træ vinduet hvert 5. år. Derudover er der indregnet vask 3 gange årligt med vand og sæbe (1,5 dl vaske-middel og 3 liter vand pr. år). Ovenstående forudsætninger fremgår også af Tabel 14 fra EPD5

**Tabel 14.** Forbrug i forbindelse med renhold og vedligehold af træ- og træ/alu vindue (Kilde: EPD5)

Vedlikehold			
	Unit	Verdi u/alu	Verdi m/alu
Vaskemiddel (B2)	l	6	9
Vannforbruk (B2)	m <sup>3</sup>	0.12	0.18
Maling (B2)	kg	1.3	0.28

Da glasudskiftning og vedligehold for træ/alu vinduet begge er deklareret under B2, har det ikke været muligt at udtrække data for vedligehold alene. Derfor kan klimapåvirkning fra renhold alene opgøres for træ/træ – vinduet. De tilhørende klimapåvirkninger er jævnfør EPD5 opgjort til 10,4 kgCO<sub>2</sub>eq pr. 1,84m<sup>2</sup> eller svarende til 5,7 kgCO<sub>2</sub>eq pr. m<sup>2</sup>.

Tilsvarende er klimapåvirkning fra produktion, vedligehold, udskiftning og bortskaffelse 175 kgCO<sub>2</sub>eq pr. 1,84m<sup>2</sup> eller svarende til 95 kgCO<sub>2</sub>eq pr. m<sup>2</sup>. Dermed andrager klimapåvirkningen fra vedligehold kun ca. 6% af vinduets samlede klimapåvirkninger i hele betragtningsperioden på 50 år.

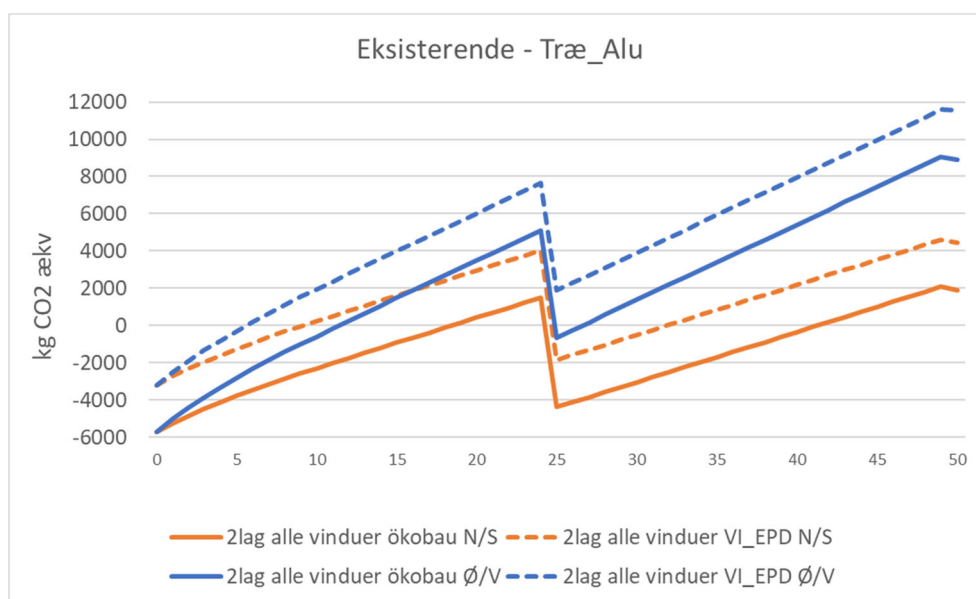
### 4.3.4 Orientering

Når der foretages en vurdering af den klimamæssige rentabilitet af forskellige vinduesløsninger, spiller vinduernes energi-performance en vigtig rolle. Dermed har både vinduets U-værdi og g-værdi samt den passive solvarme der kan nyttiggøres i bygningen en betydning.

Den passive solvarme er i høj grad bestemt af bygningens orientering og vinduernes fordeling i forhold til de forskellige verdenshjørner.

De øvrige analyser i denne rapport, er derfor suppleret med en enkelt variation, hvor bygningens orientering ændres. Der tages for denne analyse også udgangspunkt i den eksisterende etagebolig med fjernvarmeforsyning og et udgangspunkt hvor der ses på forskellen i klimapåvirkning på 3-lags vinduer og 2-lags vinduer. Etageboligen orienterer sig i sin oprindelige form nord / syd. I bebyggelsen findes tilsvarende blokke der orienterer sig øst/vest med samme arealmæssige fordeling af vinduerne.

Figur 37 viser resultaterne af denne variation. Såvel nord/syd som øst/vest orienteringen giver et resultat over "0" og det er dermed ikke klimamæssigt rentabelt at anvende 2-lags vinduer frem for 3-lags vinduer. Det ses også at de orange linjer (nord/syd orientering) ligger tættere på "0" end øst/vest orienteringen (de blå linjer). Det illustrerer at den klimamæssige rentabilitet er ringere ved øst/vest orientering end ved nord/syd orientering. Da alle materiale-parametre er fastholdt i analysen, fremkommer denne forskel af en ringere samlet energibalance for vinduerne ved øst/vest orientering end ved nord/syd orientering. Resultaterne kan ikke generaliseres til andre projekter / beregninger idet det enkelte projekts fordeling af vinduer mod verdenshjørnerne vil have afgørende betydning for resultatet. Resultaterne angiver et spænd på ca. 6.500 kgCO<sub>2</sub>eq mellem de to orienteringer og giver derfor en indikation af, at orienteringen kan have en relativt stor betydning for, om der opnås klimamæssig rentabilitet ved valg af 2-lags vinduer frem for 3-lags vinduer.



**Figur 37** Forøget klimapåvirkning for eksisterende etagebolig ved anvendelse af 2-lags vinduer kontra 3-lags vinduer med hhv. N/S og Ø/V orientering af facaderne

## 4.4 Konklusion

I analysen har vi set på alternativer til vinduesudskiftning med 3-lags ruder, som ellers er den overvejende standard grundet krav om Eref-værdien på mindst 0 kWh/m<sup>2</sup> pr. år for referencevinduet. De to alternativer var 2-lags vinduer i hele facaden eller en kombination af 3-lags vinduer mod nord og 2-lags vinduer i resten af facaden. I resultaterne viste den kombinerede løsning at være den klimamæssig mest rentable løsning, sammenlignet med rene 2- eller 3-lags løsninger. Undtagelsen er etageboligen i renoveret tilstand, hvor forskellen mellem rene 3-lags vinduer og den kombinerede løsning enten går i nul eller er meget lille, alt efter de anvendte miljødata.

Derudover viser de mindre bygninger problemer med overophedning ved 2-lags løsninger uden solafskærmning. Hvis problemet søges afhjulpet med solafskærmende glas, er der risiko for at miste fordelen ved passiv solvarme om vinteren, som resulterer i de samlet set højeste klimapåvirkninger af alle varianter.



5

# **OPSÆTNING AF SOLCELLER**

# 5 OPSÆTNING AF SOLCELLER

## 5.1 Metode

### 5.1.1 Generel

Metoden for LCA følger afsnit 2.1. Der er antaget en levetid for solcellen på 25 år, som normalt svarer garantiperioden for solcellens ydelse. For de EPD'er, hvor der også indgår inverter, svarer inverters levetid til den levetid der er opgivet i de respektive EPD'er. Alternativt anvendes 15 år. Solcellers degradering, det vil sige aftagende strømproduktion, er taget fra EPD'ernes produktdatablade. Standardorientering for solcellen er syd med en hældning fra vandret 37 grader, som er optimal for produktion af solstrøm i Danmark. Systemeffektivitet er forudsættes at være 80%. Der anvendes vejrdata fra det danske Design Reference Year, DRY (DMI, 2013), som også er obligatorisk BE18 / SBI-rapport 213 (Aggerholm, 2018). Emissionsfaktorer for energiproduktionen stammer fra Energistyrelsens fremskrivning (COWI, 2020), som også anvendes i LCAByg. Opførelsesår er 2021.

### 5.1.2 Miljødata for solcelleanlæg

Når der udarbejdes LCA'er i forbindelse med dokumentation til den frivillige bæredygtighedsklasse og DGNB, anvendes i dag programmet LCAByg. Programmet indeholder en database med klimapåvirkninger fra byggevarer der primært stammer fra den tyske Ökobaudat – database. LCAByg indeholder således også data for klimapåvirkning for solceller. Data for klimapåvirkning fra Ökobaudat er gennemsnitsdata for en række forskellige solcelle-typer samlet i et datasæt<sup>1</sup> og derfor ikke nødvendigvis repræsentativt for de anlæg der opstilles.

Derfor har det været nødvendigt at foretage en grundig afsøgning af markedet for data for klimapåvirkning på specifikke solceller. Denne afsøgning af markedet har vist udfordringer med at finde tilstrækkelige data. Den Franske programoperatør Inies<sup>2</sup> samt den svenske EPD international<sup>3</sup> er de eneste steder, hvor data har været offentligt tilgængelige i tredje-partsverificeret form og med markant flere datasæt på den franske end den svenske database.

Baggrunden for at der findes data hos den franske EPD-operatør er, at der for nogle år siden blev indført mulighed for at man i Frankrig i solcelleudbud for større anlæg (over 100kWp) kunne opnå en pointmæssig fordel i udbuddenes tildelingskriterier, hvis man kunne fremvise 3. parts verificerede miljødata med påvirkning fra produktion, montage og bortskaffelse under et vist niveau. Det er imidlertid langt fra alle producenter med miljødata der har gjort data offentligt tilgængelige. Afsøgningen har endvidere vist, at nogle data er opgivet alene for solcellepanelet, hvorimod andre både indholder solcellepanel, inverter, kabler og montagesystem. Ud over data fra de to programoperatører er der gennem en solcelleleverandør fremskaffet et datasæt – ligeledes 3-parts verificeret.

Fælles for de datasæt der er fundet på den franske hjemmeside er, at de er verificeret af det franske institut "Certisolis" men instituttet offentliggør ikke alle datasæt de verificerer.

---

<sup>1</sup> [Photovoltaic system 1000 kWh/m<sup>2</sup>a \(no electricity credits\)](#), generisk data fra Ökobaudat, version af datasæt 20.19.120, besøgt den 4-12-2019

<sup>2</sup> [inies.fr](http://inies.fr)

<sup>3</sup> [environdec.com](http://environdec.com)

### 5.1.3 Solcelletyper og miljø

Der findes i dag en række forskellige solcelleteknologier på markedet. Mest anvendt i Danmark er de monokrystallinske solceller. Derudover findes der forskellige typer af tyndfilms-solceller. I dette projekt har det været muligt at finde data for monokrystallinske-, polykrystallinske solceller samt tyndfilm-teknologierne CDTE og CIGS.

De monokrystallinske solceller sælges oftest af alle solcelletyper i Danmark. Panelerne er kendetegnede ved deres sorte, ensartede overflade. Den ensartede overflade skyldes, at hver celle er opbygget af kun én krystalstruktur, der peger i den samme retning. Lyset rammer derfor kun solcellen i denne ene retning, hvilket giver solcellen sit rolige udseende.

I et solcellepanel er hver solcelle forbundet med et metalgitter, kaldet bussen, og monteret mellem to lag glas eller plast. Dette glas/plast er altid behandlet, således solcellerne bliver uden genskin. Solcellerne leveres i moduler/ paneler, hvor der kan sidde et forskelligt antal celler i hvert modul afhængig af model. De fleste solcellepaneler leveres med 60 solceller pr panel.

De polykrystallinske solceller er modsat mono-cellerne opbygget af flere siliciumkrystaller, der har varierende størrelse og ligger i forskellige retninger. Der vil derfor ofte være spil og krystalliskær i overfladen på den polykrystallinske solcelle. Polykrystallinske solceller har af samme årsag også en mere blå nuance. Modsat monokrystallinske solceller, kan polykrystallinske solceller leveres med eller uden ramme. De kan derfor lettere integreres i bygningskonstruktioner, f.eks. i stedet for glas. Polykrystallinske solceller har en lavere virkningsgrad end monokrystallinske og er derfor over de senere år blevet udfaset af markedet.

Tyndfilmssolceller er en nyere solcelletype på markedet, omend produktionen af denne solcelletype også er mindsket til fordel for de monokrystallinske celler. Tyndfilmssolceller er, som navnet antyder, lavet af materialet, tyndfilm, som bl.a. også kendes fra lommeregneren.

En af tyndfilmssolcellens helt klare fordele er panelets udseende. Tyndfilmssolceller består af en helt ensartet og helt mat overflade, hvilket giver panelet det flotteste look. Undersøgelser viser yderligere, at tyndfilmssolceller er mere effektive i gråvejr, målt i forhold til de krystallinske solcelletyper. Dog er de i direkte sollys mindre effektive, hvilket gør, at de samlet har en anelse lavere ydelse. Mange vælger dog stadigvæk at investere i solcelletypen bl.a. grundet pris, design, bedre varmhåndtering samt det faktum, at tyndfilmssolcellen er den, hvis produktion belaster klimaet mindst.

CD-TE cellerne er baseret på brugen af cadmium tellurid i et tyndt halvlederlag designet til at absorbere og omdanne sollys til elektricitet. Denne teknologi har en relativt lav klimapåvirkning ved fremstilling, hvilket også indikeres af resultaterne vist senere i rapporten. I sig selv er cadmium og tellur toksiske og kræftfremkaldende, men CdTe danner et krystallinsk gitter, der er meget stabilt og er flere størrelsesordener mindre giftigt end cadmium. Glaspladerne omkring CdTe-materiale, der er klemt ind mellem dem (som i alle kommercielle moduler), forsegles under brand og tillader ikke frigivelse af cadmium, medmindre glasset er brudt.

CIGS er en tyndfilm teknologi, men det er vigtigt at den ikke forveksles med andre tyndfilm solceller som ofte er silicium baseret. CIGS bruger ikke grundstoffet silicium, som aktivt stof. CIGS står for: Copper Indium Gallium deSelenide og det er de 4 grundstoffer i bestemt blandingsforhold som er det aktive stof i CIGS. Opbygningen af CIGS er meget anderledes end krystallinske, da man brænder de 4 grundstoffer fast på en ledende flade med laser. Det kan være på en glasplade, der er belagt med en metalfolie og som man så lægger en glasplade belagt med en metalfilm (gennemsigtig) ovenpå.

Dog har det været yderst begrænset med datasæt for hhv. CDTE og CIGS. For de krystallinske solcellers vedkommende hidrører den markant største andel af klimapåvirkning i produktionen fra produktion af selve solcellen – og mere specifikt forarbejdning af den silicium, der anvendes i solcellerne. Et eksempel for et monokrystallinsk panel viser, at selv om

selve cellen kun vejer ca. 2% af modulet bidrager denne del af solcellen med mere end 80% af de samlede klimapåvirkninger (Kilde: EPD1 tabel 15).

Tabellerne 15-16 præsenterer de fundne datasæt fordelt på solcelletype og hvilke komponenter der er indeholdt. EPD1-5 er krystallinske moduler, EPD 6 er CIGS – tyndfilm og EPD 7-9 er krystallinske solceller. EPD 10 og 11 er tyndfilm solceller og EPD 12 er standard-data fra ökobau.dat og er et mix af forskellige teknologier. EPD'er i Tabel 15 viser klimapåvirkningen kun for solcellemodulet, mens EPD'er i Tabel 16 også medtager inverter og kabling, herefter benævnt BOS (Balance of system).

**Tabel 15** Anvendte solcelledata indeholdende kun solcelle og modul.

	EPD 1	EPD 2	EPD 3	EPD 4	EPD 5	EPD 6
Moduler indeholdt	A1-3, C, D	A1-3, C	A1-3, C	A1-3, C	A1-3, C	A1-3, C
Omfang af materialer	Solcellemodul	Solcellemodul	Solcellemodul	Solcellemodul	Solcellemodul	Solcellemodul
Solcelletype	Mono-kry-stallinsk	Mono-kry-stallinsk	Mono-kry-stallinsk	Mono-kry-stallinsk	Mono-kry-stallinsk	CIGS - tyndfilm
Oprindelse – solcelle / silicium	Silicium udvundet i Taiwan	Celle produceret i Malaysia	Celle produceret i Malaysia	Silica kommer fra Norge. Det tildannes i Tyskland og sendes derefter tilbage til Norge for at blive omdannet til Wafer	Norge, Nor-Sun EPD for wafer tilgængelig via <a href="#">link</a>	Tyskland
Produktionsland	Modul fremstilles i Tyskland	Modul samles i Vietnam (dele indkøb i Kina)	Modul samles i Vietnam (dele indkøb i Kina)	Modulet fremstilles / samles i Taiwan	Mexico	Samlet i Frankrig
Effektivitet [Wp/m <sup>2</sup> ]	167	194	185	181	226	100
Angivet levetid ( RSL) år	30	-	-	-	-	-
Degradering [%]	-	0,80	0,80	0,50	0,25	-
Forklaring: EPD 1: S-P-01817 – EPD international EPD 2: JASO-00003-V01.01-FR EPD 3: JASO-00004-V01.01-FR EPD 4: VSOL-00001-V01.01-FR EPD 5: xxxx-yyyyy-V01.01-FR EPD 6: S SUNP-00001-V01.01- FR						

Tabel 16 indeholder tilsvarende information om de anvendte datasæt der indeholder både Solcellemodul og BOS.

**Tabel 16** Anvendte solcelledata indeholdende solcelle, modul og BOS (balance of system).

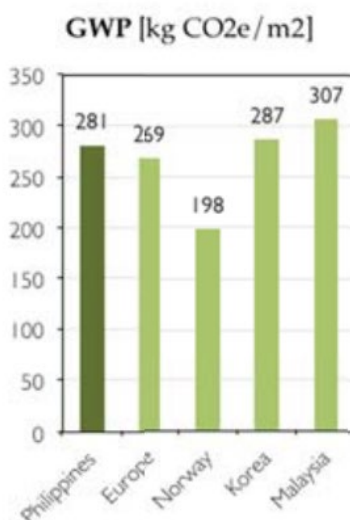
	EPD 7	EPD 8	EPD 9	EPD 10	EPD 11	EPD 12
Moduler indeholdt	A1-3, C,	A1-3, C	A1-3, C	A1-3	A1-3	A1-3, C
Omfang af materialer	Solcellemodul og BOS	Solcellemodul og BOS	Solcellemodul og BOS	Solcellemodul og BOS	Solcellemodul og BOS	Solcellemodul og BOS
Solcelletype	Monokrystallinsk	Monokrystallinsk	Ukendt	CD-TE tyndfilm	CIGS tyndfilm	Blandet – krystallinske og tyndfilm
Oprindelse – solcelle / silicium	Ukendt	Ukendt	Ukendt	Ukendt	Ukendt	Standard Ökobaudat data 2020
Produktionsland	Ukendt	Moduler produceret i Tyskland. Samlet i Frankrig	Ukendt	Ukendt	Ukendt	Ukendt
Effektivitet [Wp/m <sup>2</sup> ]	186	150	150	85,5	90,9	(forudsat 180)
Angivet levetid ( RSL) år	-	Inverter 25. Modul og øvrige anlæg 30	Inverter 25. Modul og øvrige anlæg 30	-	-	-
Degradering [%]	0,25	0,90	0,90	-	-	Forudsat 0,5
Forklaring: EPD 7: SYST-00001-V01.01-FR EPD 8: SYST-00001-V01.01-FR EPD 9: IMER-00002-V01.01-FR EPD 10: <a href="#">Rapport fra NTNU (Norge)</a> EPD 11: <a href="#">Rapport fra NTNU (Norge)</a> EPD 12: Ökobau-2020 data med forudsætninger for typiske danske solcelle-anlæg for effektivitet, levetid etc. <a href="#">Link</a>						

Waferens store andel af den samlede klimapåvirkning for solcelle-modulet har også medført optimering på dette område. Det viser sig ved, at de producenter der dels optimerer på siliciumlagets tykkelse og vælger at forarbejde silicium på lokationer med større andel af vedvarende energi i forarbejdningsprocesserne, opnår markant lavere klimapåvirkning for m<sup>2</sup> solcellemodul end de øvrige. Betydningen af Waferens tykkelse fremgår af Tabel 17 og uddybende informationer findes i [NEPD-2651-1357-EN](#).

**Table 17** Faktor for omregning af klimapåvirkning afhængig af wafertykkelse for NorSun wafer anvendt til fremstilling af monokrystallinske solceller (Kilde: [NEPD-2651-1357-EN](#)).

Wafertykkelse [ $\mu\text{m}$ ]	133	130	150	170	180	Kommentar
Omregningsfaktor	1	0,98	1,22	1,27	1,34	faktor*resultat

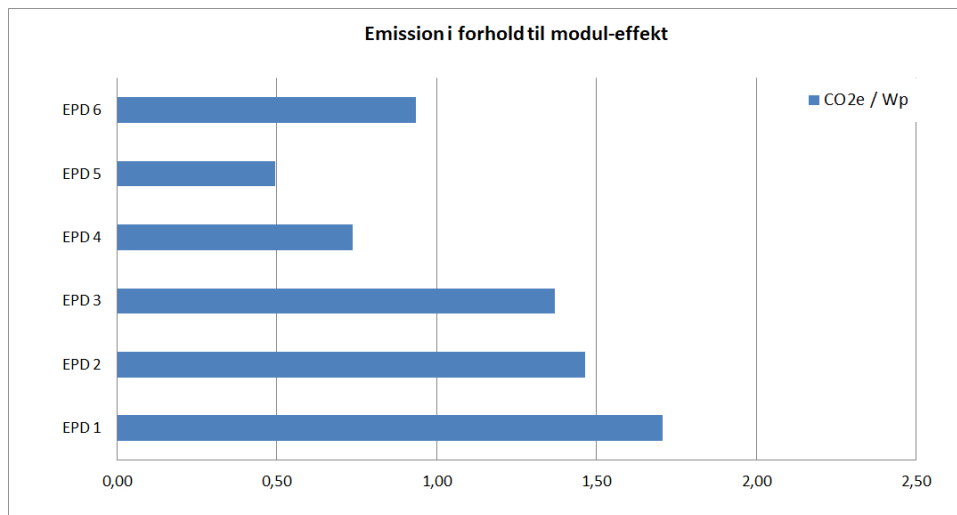
Lokationens betydning ses på Figur 38 gældende for SUNPOWER SPR-327NE-WHT-D modul (Fthenakis, et al. 2012) og i øvrigt på miljødata for Sunpower (EPD4) og Voltec (EPD5) modulerne, hvor waferen i begge tilfælde produceres i Norge.



**Figure 38** Klimapåvirkning for 1m<sup>2</sup> solcellemodul afhængig af produktionsland for wafer. Kilde: Fthenakis et al. 2012.

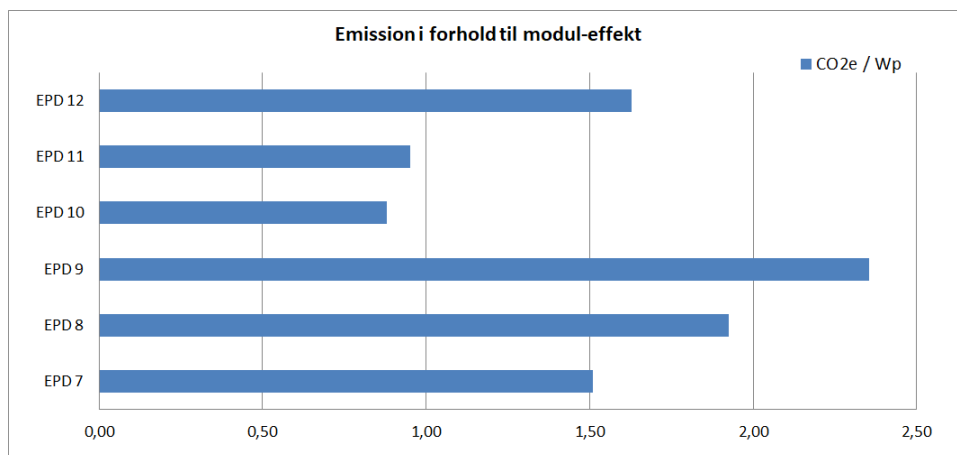
Det kan være en fordel at kunne vurdere solcellernes umiddelbare klimaeffektivitet på tværs af teknologi. Som et mål for "klima-effektiviteten" på tværs af solcelle-teknologi er der i dette projekt arbejdet med enheden kgCO<sub>2</sub> ækvivalent pr. Wp, som er klimapåvirkning i kg CO<sub>2</sub>-ækvivalenter per effekt-enhed (Watt peak). Det skal bemærkes at denne enhed udelukkende tager udgangspunkt i forholdet mellem klimapåvirkning og effektivitet på den enkelte solcelle og ikke den årlige ydelse, der afhænger af sted-specifikke parametre som orientering, skygge mv.

For tyndfilm-teknologierne ses generelt en lavere klimapåvirkning pr. Wp. Denne teknologi er kendetegnet ved, at modul-effektiviteten ikke er så høj som for de monokrystallinske moduler – det vil sige at der kræves flere m<sup>2</sup> solcelleareal pr Wp. Det til trods ses generelt en lavere påvirkning pr. Wp for denne type moduler. Ud over en mindre klimatung forarbejdningsproces, produceres "cellerne" til disse paneler også ofte i lande med mere vedvarende energi i energisystemerne end for krystallinske celler. De enkelte modulers klimaeffektivitet udtrykt ved "kgCO<sub>2</sub>eq pr. Wp". er præsenteret i Figur 39 for datasæt der kun indeholder solcellemoduler og i Figur 40 for datasæt indeholdende både solcellemodul og BOS.



Figur 39 Forholdet mellem solcellemodulernes klimapåvirkning og effektivitet (kun solcellemoduler)

Tilsvarende figur er udarbejdet for solcelldata hvor både modul og BOS indgår.



Figur 40. Forholdet mellem solcellemodulernes klimapåvirkning og effektivitet (solcellemoduler og BOS).

#### 5.1.4 Energifremskrivning - el

I LCA for bygninger som dokumentation i DGNB eller den frivillige bæredygtighedsklasse, skal der regnes med en elforsyning der baseres på den fremskrevne elforsyning 2020-2040 i LCAByg. Denne fremskrivningsmodel er baseret på Energistyrelsens forventning til sammensætningen af det danske el-mix fra 2020 til 2040 og medtager dermed at der forventes en forøget mængde grøn strøm i det danske el-mix i perioden (COWI, 2020).

Solcellers klimamæssige tilbagebetalingstid beregnes ved hjælp af anlæggets materiale-mæssige klimapåvirkning og dens successive reduktion via den producerede vedvarende strøm. Reduktionen beregnes med anlæggets årlige produktion ganget med klimapåvirkningen af den strøm fra elnettet, som erstattes.

#### 5.1.5 LCA-metode

Der findes overordnet set to typer af LCA-metoder. Den almindelige praksis for bygnings-LCA (frivillig bæredygtighedsklasse, DGNB), miljøvaredeklarationer af byggevarer og nærværende studie, anvender metoden *attributionel LCA*. Metoden er afgrænset til livscyklus-sen af en enkel bygning eller anskaffelse af en byggevarer, som isoleret set ikke påvirker de større systemer, herunder markeder eller materialestrømme. Eksempelvis har en beslutning for én byggevarer frem for en anden ingen effekt på produktionskapaciteten eller markedet.

Metoden har mange praktiske fordele, som er nødvendige for en effektiv beslutningsproces inden for en relativ kort tidshorizont, som eksempelvis projektering af en bygning.

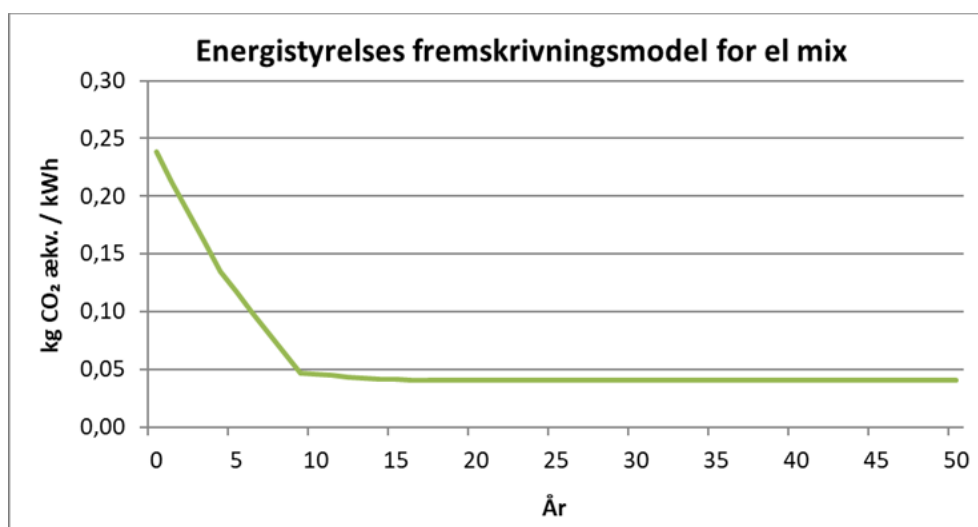
Den anden metode kaldes for *konsekvens LCA*. Metoden ser ud over enkelttilfælde og forsøger at vurdere storskalaeffekter, ofte med hensyn til at skabe videngrundlag til politiske beslutninger. Afgrænsning for konsekvens LCA er ofte et land eller en endnu større skala. Metoden er egnet til strategisk planlægning og ser på overordnede strukturer, eksempelvis udvikling af markeder og udbuddet af råstoffer. Beslutningerne baseret på konsekvens LCA har typisk betydning for markedet både på mellem (5-10 år) eller lang sigt (over 10 år).

Valg af LCA-metoden kan give meget forskellige resultater for vurdering af det samme problem, eksempelvis status af bygningsintegrerede solceller i energisystemet. Da der i dette projekt anvendes attributionel LCA, kan resultaterne alene anvendes til at vurdere solcellernes klimamæssige betydning for et enkelt byggeprojekt ud fra de givne forudsætninger. Resultaterne kan altså ikke anvendes som beslutningsgrundlag for, om solceller er klimamæssigt rentable i byggeriet generelt eller klimamæssigt rentable som en del af energisystemet.

## 5.2 Resultater og diskussion

### 5.2.1 Fremskrivningsmodel

Beregningen af den klimamæssige tilbagebetalingstid baseres på Energistyrelsens fremskrivningsmodel for 2020-2040. Efter 2040 forudsættes samme udledning pr. kWh strøm som i 2040. Klimapåvirkning pr. kWh jævnfør energistyrelsens fremskrivningsmodel for strøm ses i Figur 41.



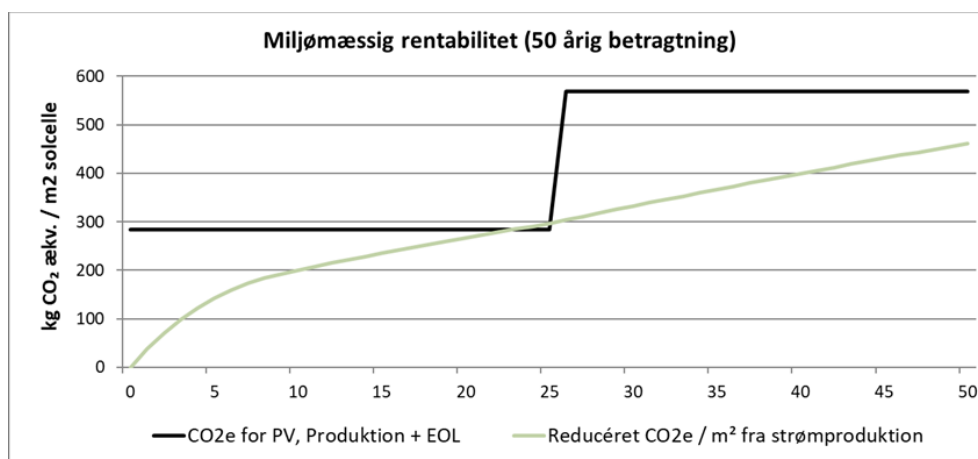
**Figur 41** Energistyrelsens fremskrivningsmodel for den danske el mix (år 2021 svarende til "0"). Kilde: (COWI, 2020).

Med denne fremskrivningsmodel, kan den sparede klimapåvirkning fra produktion af solcellestrøm beregnes for hvert moduls datasæt. Heri indregnes også degradering over levetiden, orientering, hældning etc. Samtidig kan den sparede klimapåvirkning sammenholdes med klimapåvirkning fra produktion og bortskaffelse af solcellen.

Figurerne 45-46 viser resultater for den klimamæssige tilbagebetalingstid for de datasæt der er beskrevet i Tabellerne 15-16. Der er foretaget to beregninger.

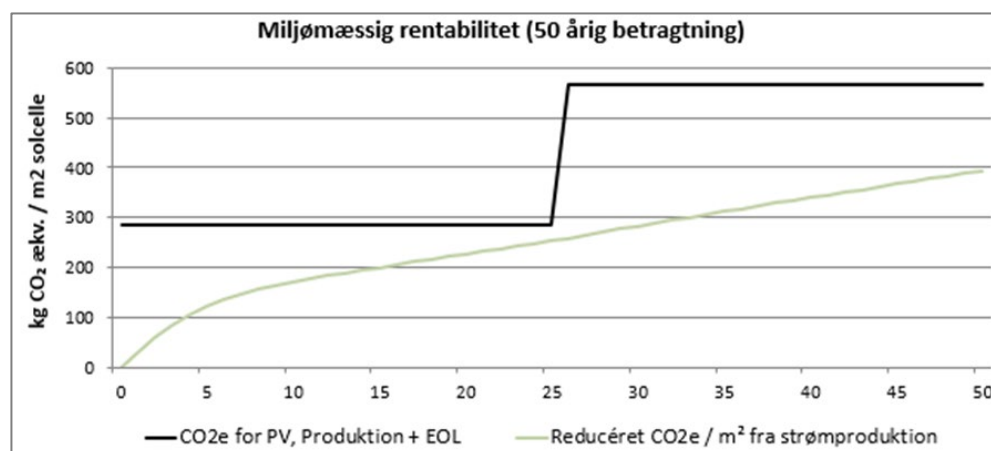
Den klimamæssige tilbagebetalingstid er præsenteret for en betragtningsperiode på 50 år svarende til kravene for bygnings-LCA i DGNB-DK og den frivillige bæredygtigheds-klasse. Samtidig er der for solcellerne regnet en levetid på 25 år hvorved der sker en udskiftning midt i betragtningsperioden. Samtidig er det medregnet at solcellerne de første år efter etablering af solcelleanlægget vil bidrage med en forholdsvis større årlig klimamæssig besparelse fra solcellernes strømproduktion grundet mindre vedvarende energi i energisystemet. Det ses på Figur 42 ved at den grønne kurve (reduceret klimapåvirkning / m<sup>2</sup> fra strømproduktion) har størst hældning de første år efter anlægget er etableret.

Den klimamæssige tilbagebetalingstid vises i Figur 42-43 som skæringen mellem klimapåvirkningen fra anlæggets materialer (produktion, udskiftning og bortskaffelse) og den reducerede klimapåvirkning fra solcellestrømmen. Opnås der ikke skæring mellem de to linjer, opnås der ikke rentabilitet under de givne forudsætninger.



**Figur 42** Produktion og bortskaffelse sammenholdt med reduceret påvirkning via strømproduktion. Eksempel: EPD 2.

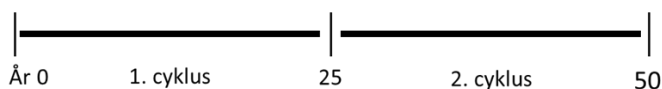
Der er desuden udført en variation, hvor orientering er ændret til øst/vest og hældning til 10 grader fra vandet (se Figur 43). Variationen illustrerer situationen for mange høje / slanke bygninger, hvor det kan være en udfordring at tilvejebringe et tilstrækkeligt tagareal til den nødvendige produktion for at overholde en given energiramme for den bygning solcellerne er placeret på. Med disse forudsætninger opnås en større strømproduktion pr. tagareal, idet solcellemodulerne kan placeres tættere, men samtidig en lavere produktion pr. solcelleareal grundet den ændrede orientering og hældning på modulerne.



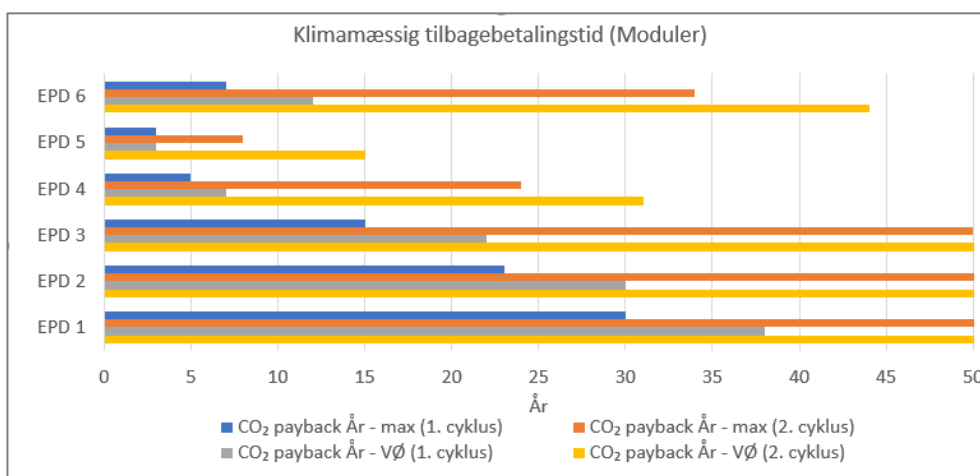
**Figur 43** Produktion og bortskaffelse sammenholdt med reduceret påvirkning via strømproduktion øst/vest-orientering. Eksempel: EPD 2.

Resultaterne for den klimamæssige tilbagebetalingstid for alle datasæt er desuden samlet i hhv. Figur 45 og 46.

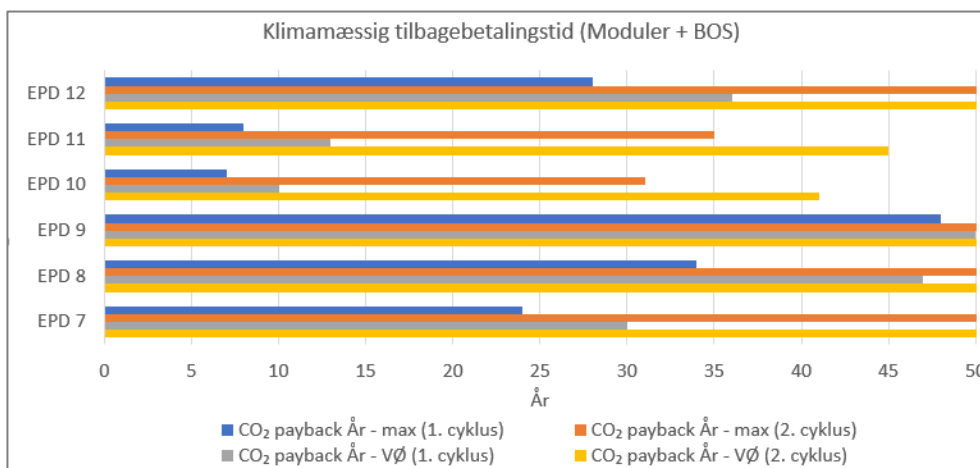
Der vises resultater for både første og anden cyklus jævnfør Figur 44. Den første cyklus skal betragtes som perioden fra første installation og til udskiftning efter en 25-års levetid. Da der relativt set fortrænges mere CO<sub>2</sub> i den første cyklus på grund af en større fossil andel i el-mixet, vil tilbagebetalingstiden for første cyklus være kortere. Tilbagebetalingstiden for anden cyklus skal betragtes som året efter første installation, hvor påvirkningerne i forbindelse med udskiftning vil være tilbagebetalt.



Figur 44. Princip for opdeling af resultater i to cyklusser.



Figur 45 Klimamæssig tilbagebetalingstid for 1. og 2. cyklus for datasæt kun indeholdende solcellemoduler



Figur 46 Klimamæssig tilbagebetalingstid for 1. og 2. cyklus for datasæt indeholdende solcellemoduler og BOS

Resultaterne viser en markant lavere tilbagebetalingstid for EPD 4-6 end for de øvrige datasæt. Fælles for EPD 4-6 er at de enten repræsenterer tyndfilm-teknologi eller krystallinske celler produceret i områder med høj andel af vedvarende energi i energisystemet, her Norge. Samtidig er der for de krystallinske solcellers vedkommende tale om produkter, hvor der er arbejdet med optimering af selve solcellens tykkelse. For EPD 5 er tykkelsen 150 +/- 30 µm. Tilsvarende er den for EPD 2 210 +/- 30 µm.

Samtidig ses en kortere rentabilitet for EPD 3 end EPD 2. EPD 3 er polykrystallinske celler hvorimod EPD 2 er monokrystallinske celler. Der kræves bedre "renhed" af selve solcelle-materialet for de monokrystallinske solceller, hvilket medfører en højere klimapåvirkning i produktionen af solcellen. Den højere klimapåvirkning fra produktion tilbagebetales ikke i tilstrækkelig grad af solcellens højere effektivitet og produktion (194 Wp/m<sup>2</sup> mod 185Wp/m<sup>2</sup>) og dermed opnås en kortere klimamæssig tilbagebetalingstid for det polykrystallinske modul.

Endelig viser resultaterne også at halvdelen af datasættene har en samlet tilbagebetalingstid på mindre end 50 år og vil således have en positiv effekt på bygningens samlede klimapåvirkning over 50 år. Det skal bemærkes, at disse data ikke medtager BOS og det er ikke angivet i vejledningerne til den frivillige bæredygtighedsklasse om BOS skal indgå som en del af bygningens samlede livscyklusvurdering. Det er således muligt allerede med nuværende produktionsteknikker og teknologier for solceller at opnå rentabilitet på mindre end 50 år og dermed en positiv indvirkning på en bygningens samlede LCA.

## 5.3 Usikkerhedsanalyse

Flere parametre vil have betydning for resultaterne. Særligt skal nævnes to parametre – sammensætning og beregningsforudsætninger for el-mix og solcellernes levetid.

### 5.3.1 El-mix

El-mixet i nettet anvendt baseres som nævnt på Energistyrelsens fremskrivningsmodel anvendt i LCAByg. Det er afgørende for solcellernes rentabilitet på det enkelte projekt om der regnes klimapåvirkning per produceret eller forbrugt strømmængde samt om klimapåvirkning for opførelse af produktionsfaciliteterne indgår. Ydermere har det også betydning om klimapåvirkning for den importerede strøm indgår i klimapåvirkningen for el-mixet.

Endelig vil der time-til-time være forskelligt sammensætning af el-mixet afhængig af de produktionsformer der bidrager. Det er muligt via energinet at udlæse time-til-time værdier for miljødata for elnettets sammensætning derfor i højere grad tage højde for eventuelle sæson-udsving. Betydningen heraf er ikke undersøgt i dette projekt, idet disse forudsætninger ikke indgår i retningslinjerne for LCA i forbindelse med FBK eller DGNB.

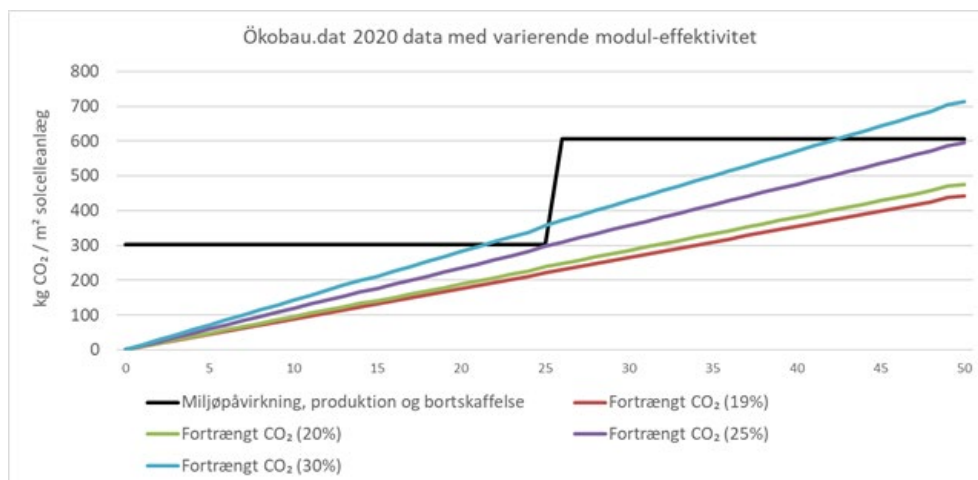
### 5.3.2 Levetid

Solcellernes levetider er antaget at være 25 år svarende til den periode, hvorover der som oftest ydes ydelsesgarant. Levetiden angivet i SBI 2013:30, som anvendes til LCA i Danmark, er 20 år. Der er imidlertid mange eksempler på solcelleanlæg der har produceret strøm mere end 25 år. Der er ikke foretaget parametervariationer i forhold til levetidens betydning for rentabiliteten, men det kan i tilnærmet form aflæses på de enkelte resultatgrafer i forhold til skæring mellem solcellens klimapåvirkning for produktion og bortskaffelse og reduceret påvirkning fra den producerede strøm. Det skal i øvrigt bemærkes, at der i miljødata inklusiv BOS indgår udskiftning af inverter, hvor levetiden for denne er forudsat til 15 år, medmindre andet er angivet i de produktspecifikke miljødata.

### 5.3.3 Generiske og specifikke miljødata

Der er foretaget en simpel parametervariation med generiske miljødata fra Ökobaudat (BMI, 2020) for solcelleanlæggets klimapåvirkning, hvor moduleffektiviteten varieres. Denne variation er foretaget for at afdække den nødvendige effektivitet på solcellerne for at opnå rentabilitet ved brug af generiske data. Variationen er foretaget i erkendelse af, at der stadig

kun findes ganske få producenter med tredjeparts-verificerede miljøvaredeklamationer på solcellemoduler. Derfor vil man i praksis normalt skulle anvende generiske data i LCAByg. Variationen er foretaget for modulers effektivitet på 19, 20, 25 og 30 % (Figur 47).



**Figur 47.** Klimapåvirkning og strømproduktion af solcelleanlæg med generiske miljødata fra Ökobaudat med varierende moduleffektivitet. Resultaterne er foretaget med en gennemsnitsbetragtning for den fortrængte CO<sub>2</sub> svarende til beregningsmetodikken i FBK.

Resultaterne viser, at moduleffektiviteten skal være mindst 25% for at opnå rentabilitet. Resultaterne er beregnet ved optimal orientering og hældning for solcellemodulerne og uden skyggepåvirkning. Kan disse forhold ikke opnås, ville det kræve en endnu højere moduleffektivitet for at opnå rentabilitet. En så høj moduleffektivitet er ikke set blandt producenterne i denne rapport. Det indikerer derfor, at rentabilitet kun kan opnås med produktspecifikke miljødata (EPD) under de nuværende beregningsforudsætninger i FBK og DGNB. Kan EPD'er fremskaffes og er solcellerne produceret med tilstrækkelig lav klimapåvirkning, viser resultaterne fra Figur 45 til gengæld også, at det er muligt at opnå rentabilitet.

## 5.4 Konklusion

Samlet set er 5 ud af de 12 af de undersøgte solcelle-produkter klimamæssigt rentable. Det vil sige at de har en kortere klimamæssig tilbagebetalingstid end betragtningsperioden på 50 år. Dette indebærer to livscyklusser for solcelleanlæg, da der regnes med en udskiftning efter 25 år. Den anden cyklus har en væsentlig ringere rentabilitet, da den producerede solcellestrøm vil fortrænge strøm fra el-nettet, som i anden cyklus grundet energifremskrivning har en lavere klimapåvirkning end første cyklus. Ifølge LCA-standard for bygninger EN15978 (CEN/TC350, 2011) skal der regnes samme klimabelastning for produktion og bortskaffelse for de solceller der produceres efter første cyklus (om 25 år) som de der installeres i dag. Der må dog forventes en lavere klimapåvirkning til produktion af solceller – og byggevarer generelt - i fremtiden, og det forventeligt afkort rentabiliteten også for anden cyklus, men da der mangler datagrundlag for fremskrivningen af materialeproduktionen, kan dette scenarie ikke tages med i betragtningen i dette studier.

Tyndfilmceller har generelt kortere tilbagebetalingstider end krystallinske. Krystallinske celler har markant forbedrede tilbagebetalingstider, når ingot / wafer er forarbejdet i lande med høj andel af vedvarende energi i det lokal el-mix, eksempelvis Norge. Producenter, der arbejder bevidst med optimering gennem lokation af produktion af ingot / wafer og tykkelse på cellerne, ses at have markant kortere tilbagebetalingstid end øvrige.

Ændrer man orientering og hældning af modulerne fra optimal til en vest-øst orientering med 10 graders hældning, forlænges tilbagebetalingstiden med 2-4 år. Manglende datasæt og usikkerhed i konsistens i de anvendte regneregler for EPD'er (Product Calculation Rules, PCR) udfordrer muligheden for at sammenligne produkter og data.

Nærværende solcelleanalyse peger på en række muligheder til forbedring af datagrundlaget og dermed

For det første mangler der tredjeparts-verificerede EPD for de solcelle-moduler og solcelle-systemer, der forhandles i Danmark. De generiske miljødata, som anvendes i stedet for manglende EPD, gør solceller ikke rentable, hvorfor anvendelse af solceller samlet set ville udgøre en klimabelastning i bygnings-LCA. Det anbefales derfor, at der indføres incitament til at udvikle EPD'er for solceller til brug i Danmark.

I DGNB kriteriet ENV 1.1 findes der mulighed for frit at vælge, om solceller skal inkluderes i LCA. Dette alternativ kan dog kun være en midlertidig løsning, da problemet med manglende datagrundlag ikke ændres. Modsat skabes der i DGNB via krav til usikkerhedsfaktorer på generiske klima-data (faktor 1,3) incitament til at der efterspørges EPD'er. El-mix Da el-mixets sammensætning har stor betydning for solcellens rentabilitet, anbefales det, at der gennemføres yderligere analyse af el-produktionens sammensætning og klimapåvirkning. Analysen kunne foretages ud fra følgende 4 tilgange:

- M1: Produktions-mix
- M2: Produktions-mix plus import
- M3: Produktions-mix minus eksport plus import
- M4: Produktions-mix plus net trade

Ligeledes kunne man i disse analyser medtage time-til-time analyse af klimapåvirkningen for den strøm net-strøm som solcellestrømmen ville erstatte. Dermed ville man få et styrket datagrundlag, både for begning af solcellernes rentabilitet og for beregning af bygnings klimapåvirkning generelt.

# KONKLUSION

## 6 KONKLUSION

Eksisterende bygninger, som blev opført under mindre strenge energikrav i bygningsreglementet, har ofte et stort energiforbrug og deraf følgende klimapåvirkning. En reduktion af bygningsmassens energiforbrug vil derfor have en betydeligt bidrag til at opnå reduktionsmålene i klimaloven. Klimalovens delmål i 2030 skal sørge for at holde den globale opvarmning på et acceptabelt niveau. Her kan især renoveringer med hurtige reduktioner af bygnings klimapåvirkning yde et bidrag. Det forudsætter, at renoveringens balancepunkt, det vil sige tidspunktet hvor energibesparelsen overstiger de materialerelaterede klimapåvirkninger, ligger inden for en kort årrække.

Undersøgelsen har vist, at efterisolering, udskiftning af vinduer og opsætning af solceller kan bidrage med nettobesparelse i klimapåvirkning på hver deres vis og under bestemte forudsætninger. Resultaterne viser, hvor stor en nettoreduktion i klimapåvirkning der kan opnås med disse renoveringstiltag. Energieffektivisering af eksisterende bygninger via efterisolering, vinduer og solceller blev behandlet i separate undersøgelser for at bedre at belyse de ret forskellige vilkår, som disse tiltag er underlagt. Herunder tilgængelige miljødata, usikkerheder i beregningen og rolle i bygningsrenovering.

Isoleringsstudiet har undersøgt klimaeffektiviteten af efterisolering af tage, ydervægge og terrændæk. I analysen varieres en række parametre som eksisterende og nye isoleringsniveauer, isoleringstyper og isoleringsprodukter. Den sparede klimapåvirkning er som regel langt større end klimapåvirkningen fra isoleringsmaterialerne. Når man også inkluderer eventuelt nødvendige nye beklædningsmaterialer, er de fleste isoleringstiltag stadig klimamæssigt rentable, men med til dels markant forlænget tilbagebetalingstid. Rentabiliteten afhænger generelt af forholdet mellem energibesparelsen og materialebelastninger. Rentabiliteten er god, hvor det eksisterende isoleringsniveau er lavt, materialebelastningen fra isolering og beklædning er lavt og det nye isoleringsniveau er højt. Løsninger med lange tilbagebetalingstider er generelt mere følsomme over for udgangsparametrene. Det gælder selve udformning af efterisoleringen med isoleringsmængde, -type- og produkt, men også beregningsforudsætninger som indetemperatur. Datagrundlaget er godt, da der findes EPD til de gængse isoleringstyper.

I Vinduesanalysen blev der sammenlignet etablering af nye 2-lags vinduer i hele facaden med en kombination af nye 3-lags vinduer mod nord og 2-lags vinduer i resten af facaden for tre typer boligbyggeri. Den kombinerede løsning har vis sig at være klimamæssigt mest rentabelt. Undtagelsen er etageboligen i renoveret tilstand, hvor der ikke ses en tydelig forskel. Derudover viser de mindre bygninger problemer med overophedning ved 2-lags løsninger uden solafskærmning. Hvis problemet søges afhjulpet med solafskærmende glas, reduceres samtidig den passive solvarme om vinteren og klimapåvirkningen øges. For at opnå god klimaeffektivitet og indeklima samtidig, bør solafskærmningen kunne tilpasses sommer- og vinterforhold.

Solcelleanalysen har undersøgt, hvorvidt de klimamæssige gevinster ved el-produktionen overstiger klimapåvirkningen fra solcellemoduler. Halvdelen af de undersøgte moduler er klimamæssigt rentable. Generiske data fra Ökobaudat ligger i på et mindre rentabelt niveau. Tyndfilmceller har kortere tilbagebetalingstider end krystallinske celler. Omdrejningspunktet for de krystallinske cellers høje klimapåvirkning er produktionen af bundpladen, den såkaldte wafer. Tynde wafere og dem, som produceres med vedvarende energi, har markant reducerede tilbagebetalingstider. Rentabilitetsberegninger for solceller i byggeprojekter er forbundet med relativ høj usikkerhed. Det skyldes manglende EPD for de solceller, som

bliver forhandlet i Danmark, og mindre god sammenligningsgrundlag blandt EPD'er på grund af metodeforskelle.

Renoveringer er vigtige til at opretholde bygningsmassens funktion og værdi, ikke mindst som alternativ til ressourcetungt nybyggeri. Når renoveringer udføres derudover klimaeffektive, kan bygninger optimere deres bidrag til begrænsning af den globale opvarmning. Klimamæssig rentabilitet kan bruges som indikator for forholdet mellem materialepåvirkninger og energibesparelse. Beregning af byggeprojekters klimapåvirkning kan bedst tilvejebringes ved en LCA over hele betragtningsperioden. Som supplerende information kan rentabilitetsberegninger anvendes til at optimere de energirelaterede tiltag, der indgår i LCA. Rentabiliteten sætter samtidig energirenovering i en større sammenhæng til faktiske reduktioner af drivhusgasudledninger og hvordan disse kan tilvejebringes.

CO<sub>2</sub>-aftrykket og klimahensyn har i en årrække været et løftestang for implementering af livscyklusvurdering på bygninger. Med fokus på én enkel miljøindikator er det lykkedes at skabe opmærksomhed, standardiserede metoder og kompetencer inden for bygnings-LCA på meget kort tid. For at måle og regulere de menneskeskabte forandringer af miljøet på en mere helhedsorienteret måde, må perspektivet dog være at inddrage flere miljøindikatorer.

# REFERENCER

## 7 REFERENCER

- Aagaard, N.-J., Brandt, E., Aggerholm, S., Haugbølle, K., & Statens Byggeforskningsinstitut. (2013). *Levetider af bygningsdele ved vurdering af bæredygtighed og totaløkonomi*.
- Aggerholm, S. (2018). *SBI-anvisning 2013: Bygningers energibehov*.
- BMI. (2020). *Ökobaudat 2020-II*. Retrieved from [www.oekobaudat.de](http://www.oekobaudat.de)
- Bolig- og Planstyrelsen. (2020). *Vejledning om den frivillige bæredygtighedsklasse*.
- CEN/TC350. (2011). *EN 15978:2011*.
- CEN/TC350. *DS/EN 15804 + A1:2013*. , (2014).
- CEN/TC350. *EN 15804:2012+A2:2019*. , (2019).
- COWI. (2020). *Opdaterede emissionsfaktorer for el og fjernvarme*.
- Dansk Standard. (2020). *DS 418:2011 Beregning af Bygningers Varmetab*.
- De Forenede Nationer. (2015). *Parisaftalen*.
- DMI. (2013). *DMI Technical Report 13-19: 2001-2010 Danish Design Reference Year*. DMI.
- Europakommissionen. (2020). *En renoveringsbølge for Europa*.
- Fthenakis, V. M., Betita, R., Shields, M., Vinje, R., & Blunden, J. (2012). Life cycle analysis of high-performance monocrystalline silicon photovoltaic systems: Energy payback times and net energy production value. *EU PVSEC Proceedings*, 4667–4672. <https://doi.org/10.4229/27thEUPVSEC2012-6CV.4.14>
- Gram-Hansen, K., & Rhiger Hansen, A. (2019). *SBI 2019:09. Forskellen mellem målt og beregnet energiforbrug til opvarmning af parcelhuse*.
- Indenrigs- og Boligministeriet. (2021). *National strategi for bæredygtigt byggeri*.
- Klima- Energi- og Forsyningsministeriet. (2019). *Bekendtgørelse om energimærkning af bygninger*.
- Klima- Energi- og Forsyningsministeriet. (2020). *Lov om klima*.
- Kragh, J., & Aggerholm, S. (2021). *Varmebesparelse i eksisterende bygninger - Segmentering*.
- Mortensen, L. H., Kanafani, K., Rose, J., & Hjorth Richter, K. (2018). *Branchevejledning for energiberegninger 2.0*.
- Transport- og Boligministeriet. (2019). *Bekendtgørelse om bygningsreglement 2018*.

The background of the page is filled with a pattern of thin, dark blue, wavy lines that create a sense of movement and depth. These lines are arranged in concentric, slightly irregular curves that flow across the entire page, framing the central text.

8

# BILAG

# BILAG

## Bilag 1. Modeldokumentation for efterisolering

Tabel 18. Materiale-mængder og klimapåvirkning af beklædninger og supplerende materialer i isoleringslaget.

Bygningsdel	Materiale	Kommentar	Mængde/m2	GWP kg CO <sub>2</sub> .eq / m <sup>2</sup>
<b>Tage</b>				
T1	Tagsten		1 m2	16,18
	Afstandslist	25x45 mm c/c 500	0,0023 m3	0,65
	Lægter	38x73 mm c/c 375 mm	0,0074 m3	2,13
	Skruer	0,05 kg/lag m. skruer	0,10 kg	0,36
	Påføring	45 mm c/c 1000	Afhænger af tykkelsen	
			<b>Total</b>	<b>19,32</b>
T3 <sub>1</sub> Varmt tag	Tagpap	2 lag	1,0 m2	26,18
	Skruer	0,05 kg/lag m. skruer	0,05 kg	0,18
			<b>Total</b>	<b>26,36</b>
T3 <sub>2</sub> Koldt tag	Tagpap	2 lag	1,0 m2	26,18
	Krydsfinér	15 mm	0,015 m3	4,45
	Spærtræ	5 cm i ventileret hulrum 45 mm c/c 600 mm	0,00375 m3	1,08
	Spærtræ	I isoleringslaget 45 mm c/c 600 mm	Afhænger af tykkelsen	
	Skruer	0,05 kg/lag m. skruer	0,10 kg	0,36
			<b>Total</b>	<b>45,04</b>
<b>Ydervægge</b>				
Y1	Fibercement	8 mm	1,0 m2	7,19
	Vindgips	9 mm	1,0 m2	1,22
	Afstandslist	22x45 mm c/c 600	0,0021 m3	0,60
	Skruer	0,05 kg/lag m. skruer	0,15 kg	0,53
			<b>Total</b>	<b>9,55</b>
Y2	Teglsten		0,108 m3	58,5
	Mørtel		12,1 kg	4,40
	Murbindere	0,05 kg/lag m. skruer	0,05 kg	
			<b>Total</b>	<b>62,9</b>
Y3	Fibercement	8 mm	1,0 m2	7,19
	Afstandslist	22x45 mm c/c 600	0,0021 m3	0,60
	Skruer	0,05 kg/lag m. skruer	0,10 kg	0,36
			<b>Total</b>	<b>8,14</b>
Y4	Kalkcementpuds	3 mm	0,003 m3	1,15
	Glasfibervæv		1,0 m2	0,30
	Skruer	0,05 kg/lag m. skruer	0,05 kg	0,18
			<b>Total</b>	<b>1,62</b>
<b>Terrændæk</b>				
D1	Trægulv	22 mm	0,022 m3	4,44
	Strøer	45 mm c/c 600	0,004 m3	1,12
	Isolering	75 mm mellem strøer	0,069 m3	2,87
	Skruer	0,05 kg/lag m. skruer	0,10 kg	0,36
	Dampspærre		1 m2	0,96
	Beton	100 mm	0,10 m3	20,3
	Armering	30 kg/m3 beton	3 kg	2,05
			<b>Total</b>	<b>29,23</b>
D2	Trægulv	22 mm	0,022 m3	4,44
	Spånplade	22 mm	0,022 m3	8,69
	Skruer	0,05 kg/lag m. skruer	0,10 kg	0,36
			<b>Total</b>	<b>13,49</b>

**Table 19.** Liste over anvendte miljøvederklaringer (EPD). Indikatorerne klimapåvirkning (GWP) og total primærenergi (PEtot) er beregnet for en identisk isolans, som kan betyde afvigende tykkelser. De typiske anvendelser er de renoveringstiltag, hvor isoleringen normalt anvendes.

Isolerings-type	Producent	Produkt	EPD-nummer	GWP kgCO <sub>2</sub> eq for R = 1 m <sup>2</sup> K/W	PEtot MJ for R = 1 m <sup>2</sup> K/W	Typisk anvendelse		
Glasuld	Producent 1	Glasuld, λ37 (a)	NEPD-2612-1324-EN	0,450	17,05	T1, T2, Y1		
		Glasuld, λ30 (a)	NEPD-2609-1324-EN	1,44	53,54	T1, T2, Y1		
		Glasuld granulat, λ42 (a)	NEPD-2080-940-EN	0,567	36,73	T2		
		Glasuld granulat, λ34 (a)		0,907	22,96	T1		
		Glasuld, λ38 (a)	NEPD-2018-891-EN	2,18	71,22	T3		
		Glasuld, λ39	NEPD-2605-1326-EN	1,42	46,86	T3		
		Glasuld, λ37 (b)	NEPD-2604-1326-EN	0,511	19,59	Y2		
		Glasuld, λ30 (b)	NEPD-2613-1324-EN	1,45	55,04	Y2		
	Glasuld, λ38 (b)	NEPD-2016-891-EN	2,31	83,73	Y4			
	Producent 2	Glasuld, λ37 (c)	EPD-S-P-01751	0,672	14,98	T1, T2, Y1		
		Glasuld, λ32	EPD-S-P-01753	1,02	22,88	T1, T2, Y1		
		Glasuld granulat, λ42 (b)	EPD-S-P-01755	0,492	10,57	T2		
		Glasuld granulat, λ33	EPD-S-P-01758	0,969	20,75	T1, T3, Y1		
		Glasuld granulat, λ34 (b)	EPD-S-P-01757	0,996	21,40	Y5		
Stenuld	Producent 3	Stenuld, λ37 (a)	NEPD-1762-735-EN	1,35	0,451 <sup>(1)</sup>	21,50	25,49 <sup>(1)</sup>	T1, T2, Y1
		Stenuld, λ34 (a)		1,58	0,526 <sup>(1)</sup>	25,08	29,74 <sup>(1)</sup>	T1, T2, Y1
		Stenuld, λ37 (b)		1,24	0,413 <sup>(1)</sup>	19,71	23,36 <sup>(1)</sup>	T2
		Stenuld granulat, λ37 (a)		2,14	0,714 <sup>(1)</sup>	34,04	40,36 <sup>(1)</sup>	Y1
		Stenuld granulat, λ38		1,46	0,488 <sup>(1)</sup>	23,29	27,61 <sup>(1)</sup>	T1
		Stenuld granulat, λ41 (a)		1,24	0,413 <sup>(1)</sup>	19,71	23,36 <sup>(1)</sup>	T2
		Stenuld granulat, λ37 (b)		2,48	0,826 <sup>(1)</sup>	39,41	46,73 <sup>(1)</sup>	Y5
		Stenuld, λ36 (a)		4,50	2,78 <sup>(1)</sup>	71,66	84,96 <sup>(1)</sup>	T3
		Stenuld, λ35 <sup>(2)</sup>		3,71	2,30 <sup>(1)</sup>	59,12	70,09 <sup>(1)</sup>	T3
		Stenuld, λ38 (a) <sup>(2)</sup>		7,20	4,45 <sup>(1)</sup>	114,65	135,94 <sup>(1)</sup>	T3
		Stenuld, λ39		2,81	1,74 <sup>(1)</sup>	44,79	53,10 <sup>(1)</sup>	T3
		Stenuld, λ37 (c)		4,50	2,78 <sup>(1)</sup>	71,66	84,96 <sup>(1)</sup>	Y4
		Stenuld, λ37 (d)		1,24	0,413 <sup>(1)</sup>	19,71	23,36 <sup>(1)</sup>	Y2
		Stenuld, λ32		2,36	0,789 <sup>(1)</sup>	37,62	44,60 <sup>(1)</sup>	Y2
	Stenuld, λ37 (e)	4,28	2,64 <sup>(1)</sup>	68,07	80,71 <sup>(1)</sup>	D1		
	Stenuld, λ33 (a)	3,06	2,05 <sup>(1)</sup>	<sup>(3)</sup>	<sup>(3)</sup>	Y3		
	Producent 4	Stenuld, λ36 (b)	NEPD-2392-1128-EN	130		12,73	T1, T2, T3, Y1	
		Stenuld, λ34 (b)		1,70		16,67	T1, T2, T3, Y1	
		Stenuld granulat, λ36		1,94		19,06	T1, T3	
		Stenuld granulat, λ41 (b)		1,48		14,51	T2	
		Stenuld, λ38 (b)		2,88		28,26	T3	
		Stenuld, λ36 <sup>(2)</sup>		6,28		61,73	T3	
		Stenuld, λ36 (c)		4,32		42,38	T3	
		Stenuld, λ38 (c) <sup>(2)</sup>		8,76		86,04	T3	
Stenuld granulat, λ37 (c)		2,31			22,66	Y1, Y5		
Stenuld, λ34 (c)		1,94			19,06	Y2		
Stenuld, λ33 (b)	2,07		20,36	Y2				
Stenuld, λ36 (d)	3,72		36,53	Y4				
Papiruld	Producent 5	Papiruld, λ37	EPD-PSG-20210030-IBA1-DE	0,376	24,20	T1, T2, T3, Y1, Y5		

Fortsat Tabel 19.

Træfiber	Producent 6	Træfiber, λ37	EPD-HWS-20160032-IAC2-DE	1,31	48,82	T1, T2, T3, Y1
		Træfiber, λ43	EPD-HWS-20160105-IAC2-DE	4,65	340,97	Y4
	Producent 7	Træfiber, λ38 (a)	NEPD-2287-1041-NO	0,55	70,71	T1, T2, T3, Y1
		Træfiber granulat, λ38 (a)	NEPD-2286-1041-NO	0,22	39,58	T2
		Træfiber granulat, λ38 (b)	NEPD-2286-1041-NO	0,275	49,48	T1, T3
	Producent 8	Træfiber granulat, λ38 (c)	NEPD-2286-1041-NO	0,309	55,66	Y1
		Træfiber, λ36	EPD-STE-20200175-IBA1-DE	0,298	49,17	T1, T2, T3, Y1
		Træfiber, λ38 (b)		0,248	40,97	T1, T2, T3, Y1
		Træfiber granulat, λ38 (d)	EPD-STE-20200173-IBA1-DE	0,122	18,79	T2
		Træfiber granulat, λ38 (e)	EPD-STE-20200173-IBA1-DE	0,133	20,56	T1, T3, Y1
Træfiber, λ40	EPD-STE-20200172-IBA1-EN	1,48	42,88	Y4		
EPS	Producent 9	EPS, λ38	MD-16005-EN	3,51	50,74	Y3, Y4
		EPS, λ41		3,16	45,66	T3, D1
		EPS, λ33 (a)		8,07	116,70	D2
	EPS, λ31	MD-16006-EN	3,04	42,98	Y3, Y4	
			EPS, λ33 (b)	2,43	34,38	T3, D1
XPS	Producent 9	XPS, λ39	NEPD-396-274-EN	4,86	81,17	T3, Y3, Y4, D1
	Producent 10	XPS, λ34	NEPD-2390-1113-NO	7,44	122,99	T3, Y3, Y4, D1
Phenolskum	Producent 11	Phenolskum, λ20 (a)	EPD-KSI-20210041-CBA1-EN	2,95	45,75	D1, D2
		Phenolskum, λ20 (b)	EPD-KSI-20190072-CBA1-EN	3,05	48,18	Y3, Y4
		Phenolskum, λ20 (c)	EPD-KSI-20210045-CBA1-EN	2,95	45,75	-
		Phenolskum, λ20 (d)	EPD-KSI-20210043-CBA1-EN	3,04	52,57	Y3
		Phenolskum, λ20 (e)	EPD-KSI-20210047-CBA1-EN	3,37	51,23	Y3
PIR	Producent 12	PIR, λ26	EPD-IVP-20160147-IBE1-DE	5,08	75,03	T3, D1, D2
Celleglas	Producent 13	Celleglas, λ36	EPD-PCE-20200300-IBB1-EN	5,55	140,68	T3, Y3, Y4, D1, D2

(a, b, c...) Unikt navngivning for forskellige produkter, som er identisk i isoleringstype og varmeledningsevne.

(1) Ikke-udgivet EPD, som afløser den gældende EPD (værdi i kolonne til venstre).

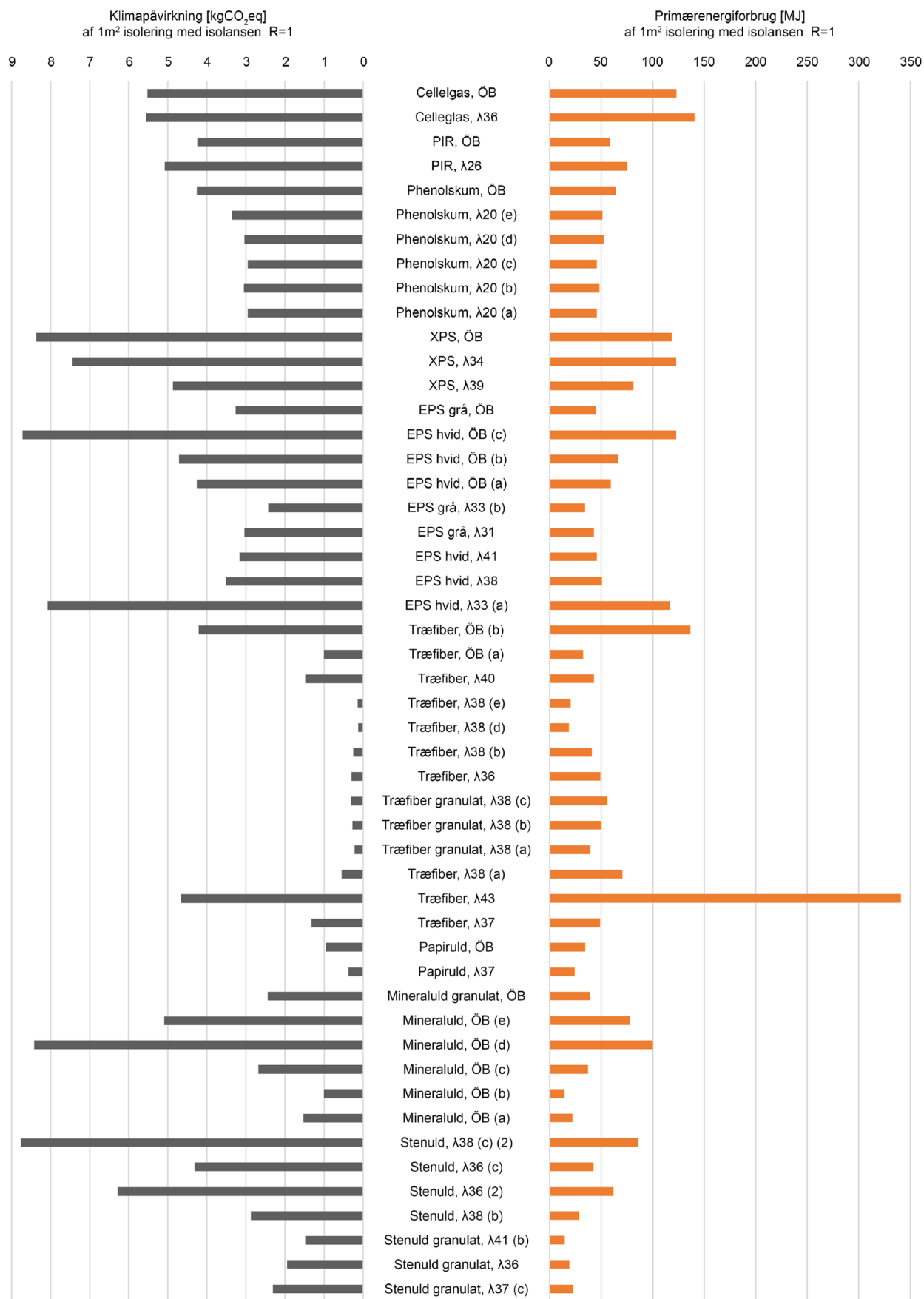
(2) Produktet er top- eller underlag (20-30 mm) i et isoleringssystem for fladt tag og kan ikke sammenlignes direkte med øvrige produkter.

(3) Manglende data

**Table 20.** Liste over generiske datasæt fra Ökobaudat (ÖB) version 2020-II. Indikatorerne klimapåvirkning (GWP) og total primærenergi (PE<sub>tot</sub>) er beregnet for en identisk isolans, som kan betyde afvigende tykkelser. De typiske anvendelser er de renoveringstiltag, hvor isoleringen normalt anvendes.

Isoleringstype	Generisk datasæt	Densitet <sup>(1)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	GWP kgCO <sub>2</sub> eq for R = 1 m <sup>2</sup> K/W	PE <sub>tot</sub> MJ for R = 1 m <sup>2</sup> K/W	Typisk anvendelse
Mineraluld	Mineraluld, ÖB (a)	26	1,53	21,94	T1, T2, Y1
	Mineraluld, ÖB (b)	17	1,00	14,35	Y2
	Mineraluld, ÖB (c)	46,25	2,68	37,44	Y4
	Mineraluld, ÖB (d)	145	8,41	100,10	T3
	Mineraluld, ÖB (e)	85	5,09	77,87	D1
	Mineraluld granulat, ÖB	50	2,44	39,22	T1, T2, Y1, Y5
Papiruld	Papiruld, ÖB	45	0,951	34,54	T1, T2, T3, Y1, Y5
Træfiber	Træfiber, ÖB (a)	50	1,01	32,63	T1, T2, T3, Y1
	Træfiber, ÖB (b)	180	4,20	136,51	Y4
EPS	EPS hvid, ÖB (a)	18	4,26	59,30	T3, Y3, Y4
	EPS hvid, ÖB (b)	18,5	4,71	66,47	D1
	EPS hvid, ÖB (c)	36	8,71	123,05	D2
	EPS grå, ÖB	16,6	3,26	44,92	T3, Y3, Y4, D1
XPS	XPS, ÖB	32	8,37	118,58	T3, Y3, Y4
Phenolskum	Phenolskum, ÖB	40	4,26	64,32	Y3, Y4, D1, D2
PIR	PIR, ÖB	31	4,24	58,56	T3, D1, D2
Celleglas	Celleglas, ÖB	115	5,52	123,06	T3, Y3, Y4, D1, D2

(1) Densiteter stammer dels fra Ökobaudat og EPD



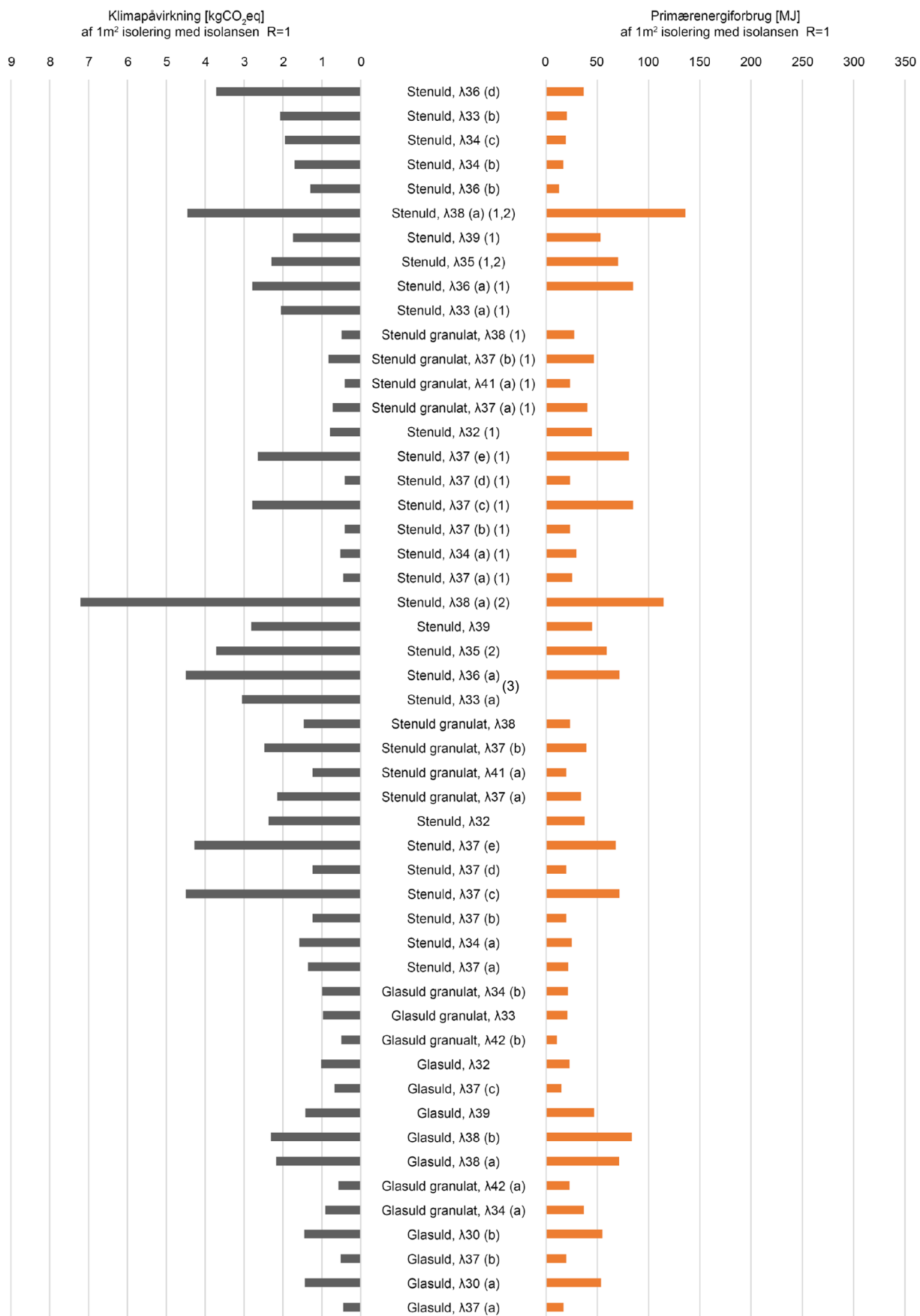
**Figur 48** (første del). Oversigt over klimapåvirkning og primærenergiforbrug af alle datasæt i isoleringsstudiet i henhold til Tabellerne 19-20. Resultater er beregnet for en identisk isolans på  $R = 1 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

(a, b, c...) Unikt navngivning for forskellige produkter, som er identisk i isoleringstype og varmeledningsevne.

(1) Ikke-udgivet EPD, som afløser den gældende EPD (værdi i kolonne til venstre).

(2) Produktet er top- eller underlag (20-30 mm tykkelse) i et isoleringssystem for fladt tag og kan ikke sammenlignes direkte med øvrige produkter.

(3) Manglende data



Figur 48 (anden del).

Tabel 21. Alternative beklædningsmaterialer til følsomhedsanalysen.

Bygningsdel	Materiale	Kommentar	Mængde/m2	GWP [kg CO <sub>2</sub> -eq / m <sup>2</sup> ]
<b>Tage</b>				
<b>T1 - Skifer</b>	Skifer	8 mm	1 m2	15,2
	Trykimprægneret afstandslister	25x45 mm c/c 500 mm	0,0023 m3	0,649
	Lægter	38x73 mm c/c 375 mm	0,0074 m3	2,13
	Skruer	0,05 kg/lag m. skruer	0,15 kg	0,533
	<b>Total</b>			<b>18,6</b>
<b>T1 - Tagpap</b>	Tagpap	2 lag	1,0 m2	26,18
	Krydsfinérplade	15 mm	0,15 m3	4,45
	Skruer	0,05 kg/lag m. skruer	0,05 kg	0,178
	<b>Total</b>			<b>30,8</b>
<b>T1 - Fibercement</b>	Fibercementplade	8 mm	17 kg/m2	18,8
	Trykimprægneret afstandslister	25x45 mm c/c 500 mm	0,0023 m3	0,649
	Lægter	38x73 mm c/c 375 mm	0,0074 m3	2,13
	Skruer	0,05 kg/lag m. skruer	0,15 kg	0,533
	<b>Total</b>			<b>22,1</b>
<b>Ydervægge</b>				
<b>Y1 - Skifer</b>	Skifer	8 mm	1,0 m2	15,2
	Afstandslister	25x50 mm c/c 600 mm	0,0021 m3	0,6
	Lægter	38x55 mm c/c 300 mm	0,0070 m3	2,01
	Vindgips	9 mm	0,69 m2	1,22
	Skruer	0,05 kg/lag m. skruer	0,2 kg	0,711
	<b>Total</b>			<b>19,8</b>
<b>Y1 - Aluminium</b>	Aluminiumsplade	1 mm	2,7 kg	28,2
	Vindgips	9 mm	0,69 m2	1,22
	Aluminiumsprofil	Ophængningssystem	5,0 kg	53,4
	Anodisering		1,0 m2	6,12
	Skruer	0,05 kg/lag m. skruer	0,15 kg	0,533
<b>Total</b>			<b>89,5</b>	
<b>Y1 - Fyrretræ</b>	Fyrretræ	25x150 mm	0,025 m3	5,05
	Vindgips	9 mm	0,69 m2	1,22
	Afstandslister	22x45 mm c/c 600 mm	0,0021 m3	0,60
	Overflade, lak		0,38 kg	5,43
	Skruer	0,05 kg/lag m. skruer	0,15 kg	0,533
	<b>Total</b>			<b>12,8</b>
<b>Y3 - Skifer</b>	Skifer	8 mm	1,0 m2	15,2
	Afstandslister	25x50 mm c/c 600 mm	0,0021 m3	0,6
	Lægter	38x55 mm c/c 300 mm	0,0070 m3	2,01
	Skruer	0,05 kg/lag m. skruer	0,15 kg	0,533
	<b>Total</b>			<b>18,4</b>
<b>Y3 - Aluminium</b>	Aluminiumsplade	1 mm	2,7 kg	28,2
	Aluminiumsprofil	Ophængningssystem	5,0 kg	53,4
	Anodisering		1,0 m2	6,12
	Skruer	0,05 kg/lag m. skruer	0,10 kg	0,356
	<b>Total</b>			<b>88,1</b>
<b>Y3 - Fyrretræ</b>	Fyrretræ	25x150 mm	0,025 m3	5,05
	Afstandslister	22x45 mm c/c 600 mm	0,0021 m3	0,60
	Overflade, lak		0,38 kg	5,43
	Skruer	0,05 kg/lag m. skruer	0,10 kg	0,356
	<b>Total</b>			<b>11,4</b>

**Tabel 22.** Be18 inddata af udgangsmodellen (før renovering) i isoleringsstudiet. U-værdierne af eksisterende klimaskærm svarer til det lave isoleringsniveau i henhold til Tabel 7.

Be18 kategori	Enfamiliehus	Rækkehus	Etagebolig
Rotation	0°	0°	0°
Opvarmet bruttoareal	77,1 m <sup>2</sup>	485,2 m <sup>2</sup>	1715 m <sup>2</sup>
Varmekapacitet	86 Wh/K m <sup>2</sup>	86 Wh/K m <sup>2</sup>	116 Wh/K m <sup>2</sup>
Normal brugstid	168 timer	168 timer	168 timer
Tillæg	0 kWh/m <sup>2</sup> år	0 kWh/m <sup>2</sup> år	0 kWh/m <sup>2</sup> år
Varmeforsyning	Fjernvarme	Fjernvarme	Fjernvarme
Køling	Ingen	Ingen	Ingen
Solceller	Ingen	Ingen	Ingen
U-værdi, facade	1,48	1,48	1,48 W/m <sup>2</sup> K
U-værdi, facade u. terræn	-	-	-
U-værdi, tag	0,61	0,61	0,61 W/m <sup>2</sup> K
U-værdi, terrændæk	0,59	0,59	0,59 W/m <sup>2</sup> K
Linjetab, fundament	0,83	0,83	0,83 W/mK
Linjetab, vinduer	0,03 W/mK	0,03 W/mK	0,03 W/mK
U-værdi, 2-lags vindue	2,9 W/m <sup>2</sup>	2,9 W/m <sup>2</sup>	2,9 W/m <sup>2</sup> K
g-værdi, 2-lags vindue	0,79	0,79	0,79
Solafskærmning	Ingen	Ingen	Ingen
Grundluftsifte, naturlig ventilation, vinter	0,3 l/s m <sup>2</sup>	0,3 l/s m <sup>2</sup>	0,3 l/s m <sup>2</sup>
Grundluftsifte, mekanisk ventilation, vinter	-	-	0,3 l/s m <sup>2</sup>
Luftsifte, emhætte	0,6 l/s m <sup>2</sup>	0,6 l/s m <sup>2</sup>	0,6 l/s m <sup>2</sup>
Luftsifte, naturlig ventilation, sommer	2,0 l/s m <sup>2</sup>	2,0 l/s m <sup>2</sup>	2,0 l/s m <sup>2</sup>
Varmegenvinding, mekanisk ventilation	Ingen	Ingen	Ingen
SEL-værdi, mekanisk ventilation	0,6 kJ/m <sup>3</sup>	0,6 kJ/m <sup>3</sup>	0,6 kJ/m <sup>3</sup>
Internt varmetilskud, personer	1,5 W/m <sup>2</sup>	1,5 W/m <sup>2</sup>	1,5 W/m <sup>2</sup>
Internt varmetilskud, apparatur	3,5 W/m <sup>2</sup>	3,5 W/m <sup>2</sup>	3,5 W/m <sup>2</sup>
Varmeanlæg	2 strengs, 60/30 °C	2 strengs, 60/30 °C	2 strengs, 60/30 °C
Pumpe, varmeanlæg	Ingen	Ingen	1x 250 W, 40%
Fjernvarmestik	4 m, 0,25 W/mK	16 m, 0,25 W/mK	15 m, 0,25 W/mK
Varmt brugsvandsproduktion	-	-	Central veksler
Fjernvarmeforsyning, varmt brugsvand	4 m, 0,25 W/mK	16 m, 0,25 W/mK	10 m, 0,25 W/mK
Cirkulationspumpe, varmt brugsvand	Ingen	Ingen	1x 56 W, 100%
Rør, varmt brugsvand	-	-	66 m, 0,20 W/mK
Rør, cirkulation	-	-	66 m, 0,18 W/mK
Fjernvarmeveksler, (effekt, varmetab og standby)	Ingen	Ingen	200 kW, 5 W/K, 5 W

## Bilag 2. Detaljerede resultater for efterisolering

Dette bilag indeholder alle resultater, angivet som tilbagebetalingstid, for isoleringsstudiet på niveau med isoleringsprodukter, som er det mest detaljerede niveau. Her findes alle datapunkter, som indgår i de mere sammenfattende resultater på niveau med isoleringstiltag (afsnit 0) og isoleringstyper (afsnit 3.2.1). Hver side indeholder ét isoleringstiltag for tage, ydervægge og terrændæk. Resultaterne vises for tre eksisterende isoleringsniveauer før renovering. Undtagelsen er hulmursisolering, som viser resultater for tre størrelser af mellemrum.

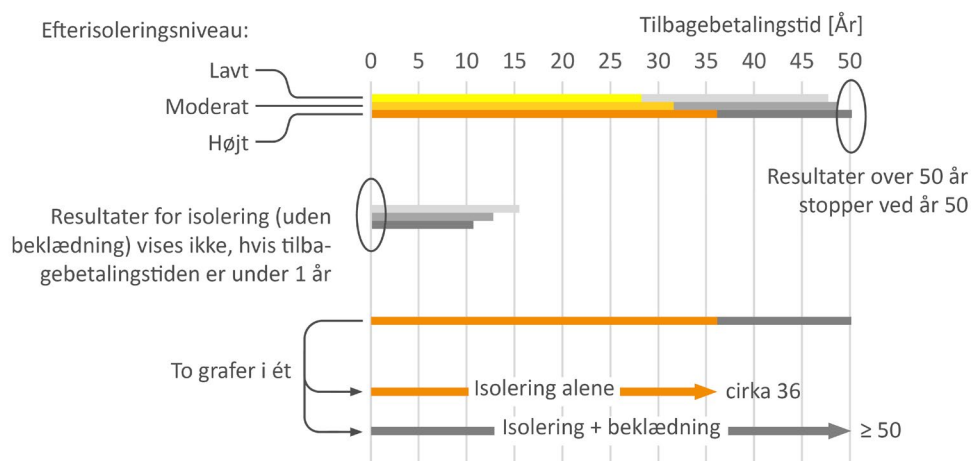
Graferne indeholder en række informationer og er udformet anderledes end de øvrige resultater i rapporten. Det skyldes ønsket om at vise en stor mængde af data på en komprimeret måde.

Figur 49 forklarer de vigtigste forudsætninger til at læse graferne. Resultaterne viser to eller tre bjælker for alle produkter og generiske data fra tabellerne 19-20. Med undtagelsen af hulmursisolering svarer bjælkerne til de tre efterisoleringsniveauer lavt, moderat og højt, markeret med farvekode. Hver bjælke indeholder to resultater oven på hinanden, isolering alene (orange nuancer) og isolering samt beklædning (grå nuancer). Tilbagebetalingstiden for isolering og beklædningen sammen er altid længere, hvorfor en grå ende stikker et par år længere ud af bjælken. Bjælkerne er altså ikke sammensatte i længden.

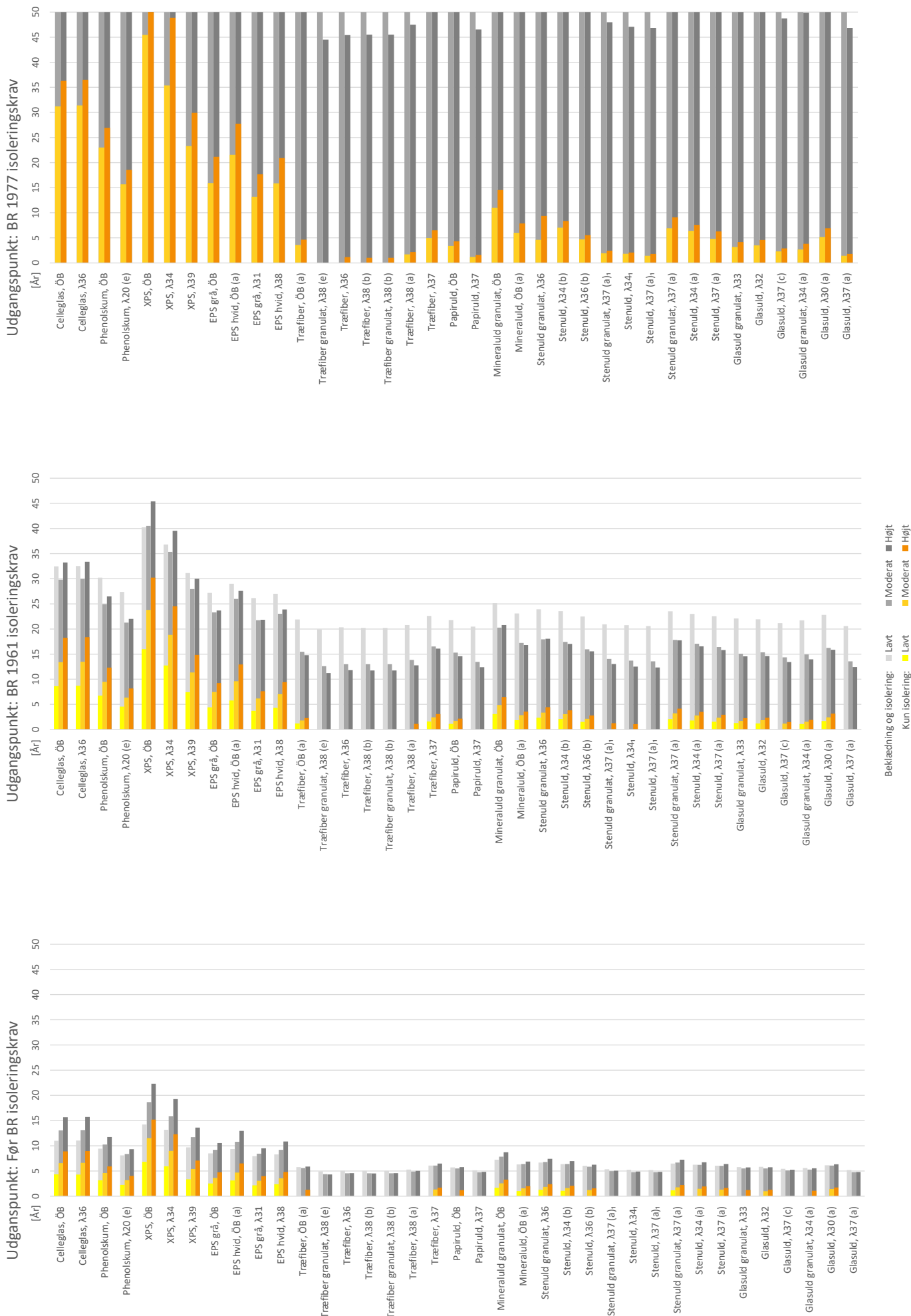
Skalaen slutter ved 50 år og der vises ikke resultater derudover. Det betyder samtidig, at man ikke kan vide, om et resultat er 50 år eller større. Længere tilbagebetalingstider er ikke vist, da interessen gælder klimamæssigt rentable løsninger indenfor 50 år. På starten af skalaen gælder den anden afgrænsning, at resultater under 1 år ikke vises.

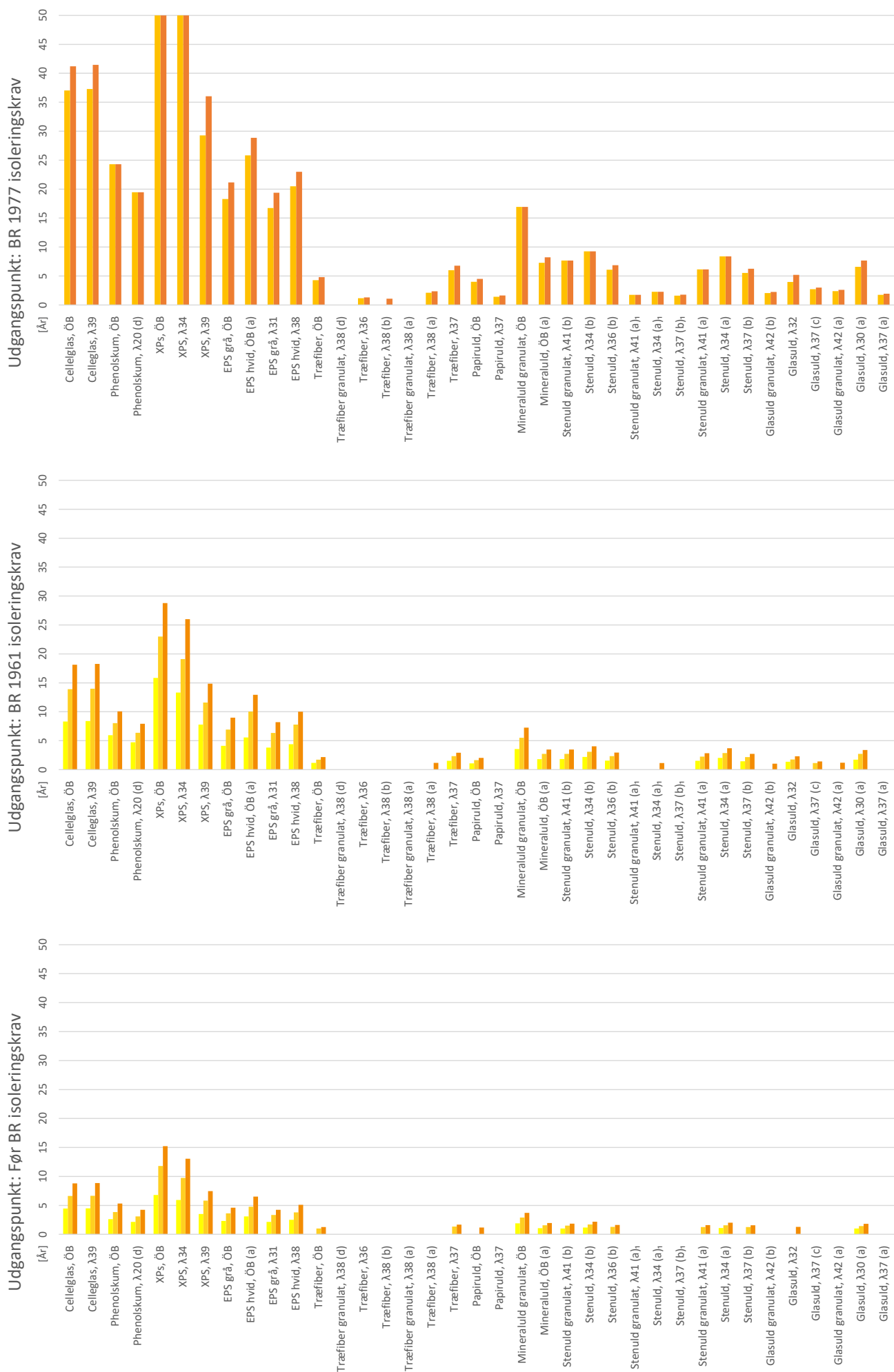
Når der kun vises to bjælker for et produkt, kan det skyldes to årsager. Når forklaringen for grafen kun vise to efterisoleringsniveauer, så er det lave niveau ikke beregnet, da isoleringsmængden er urealistisk lille. Når forklaringen derimod viser tre niveauer, så findes der resultater for alle niveauer, men produktet har en tilbagebetalingstid på under et år, det vil sige mellem 1-11 måneder.

Beregningsforudsætninger for energi og LCA følger de i afsnit 2 og 3.1 beskrevne metoder.

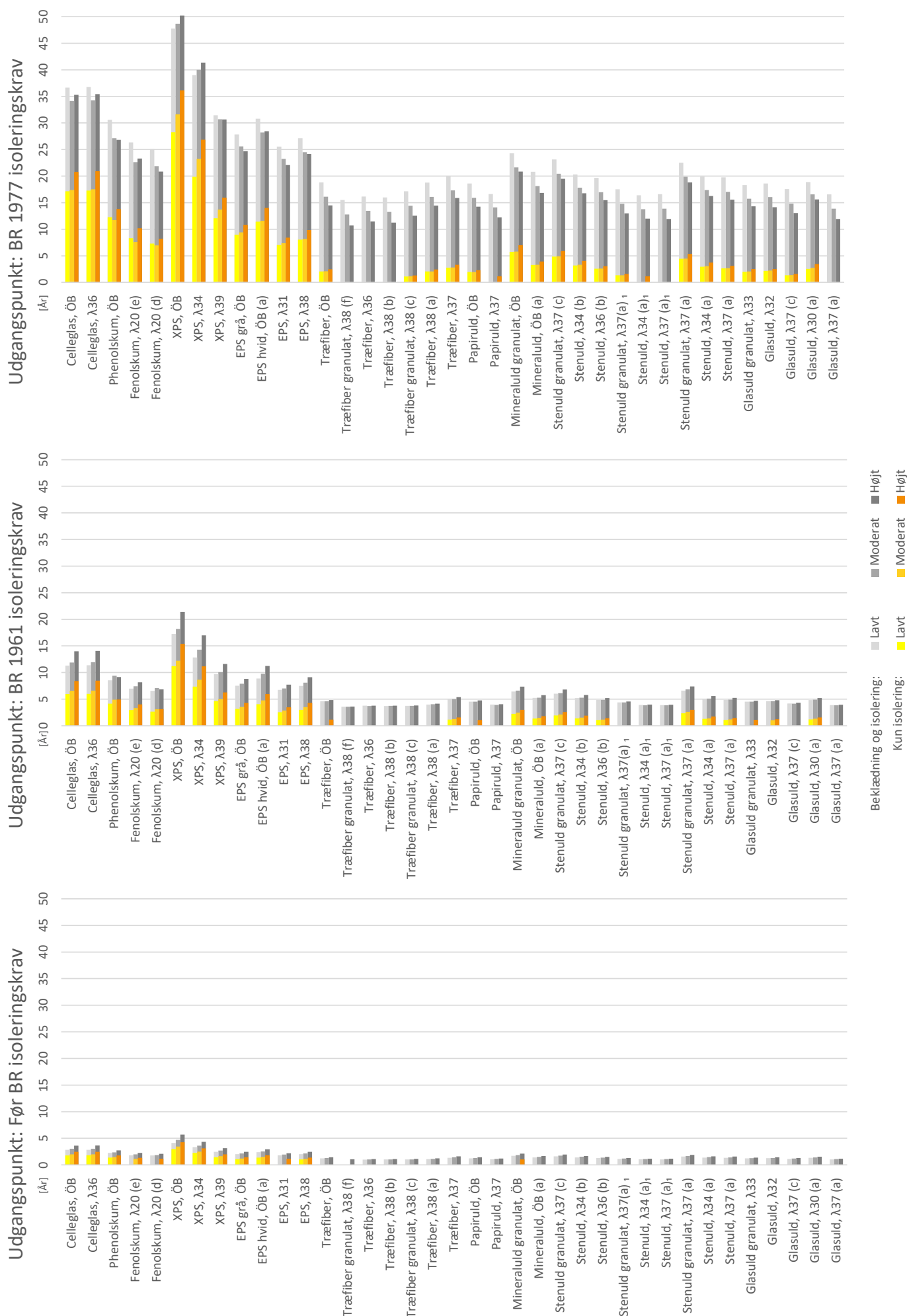


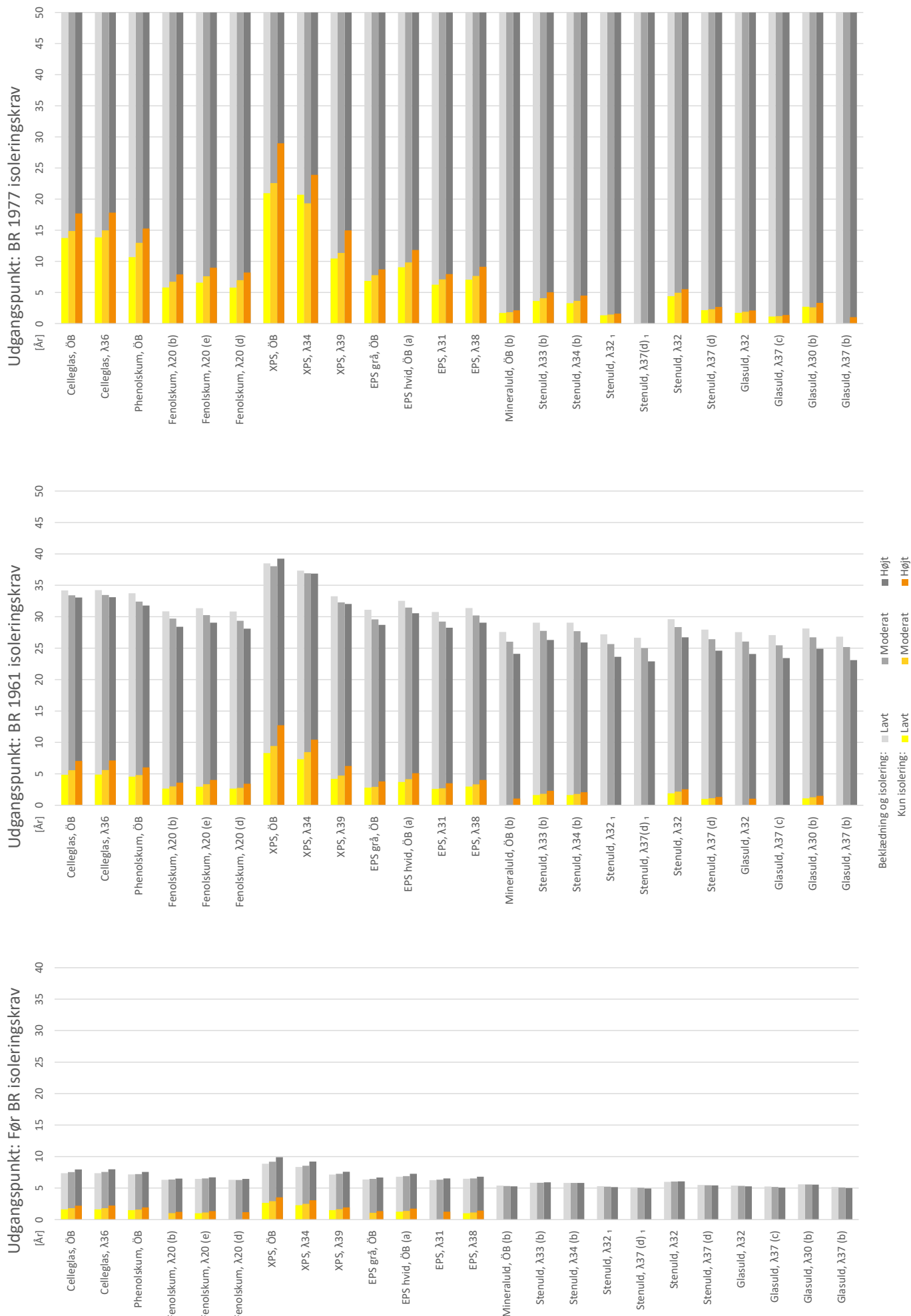
Figur 49. Forklaring af resultatgrafer i Bilag 2.

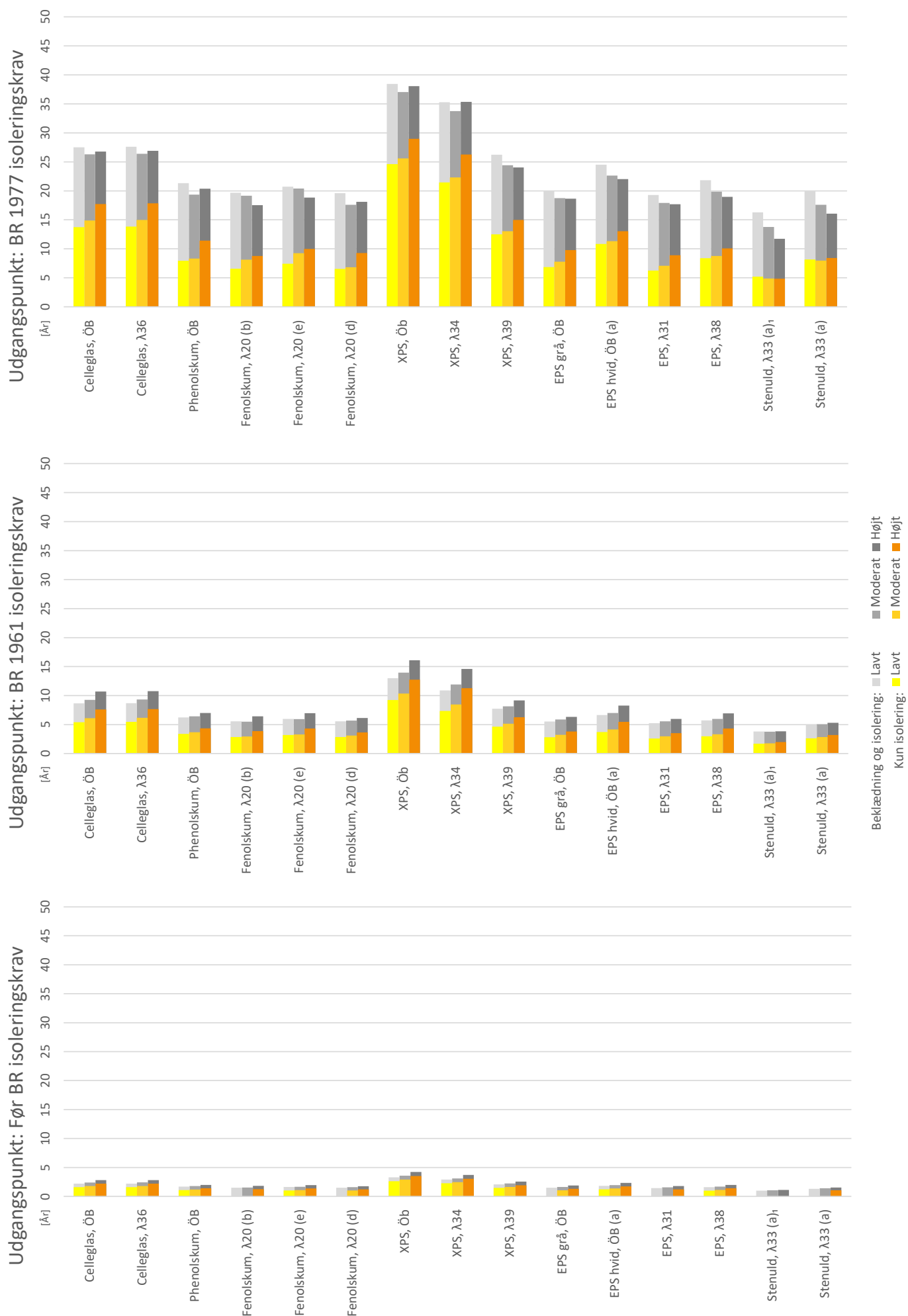


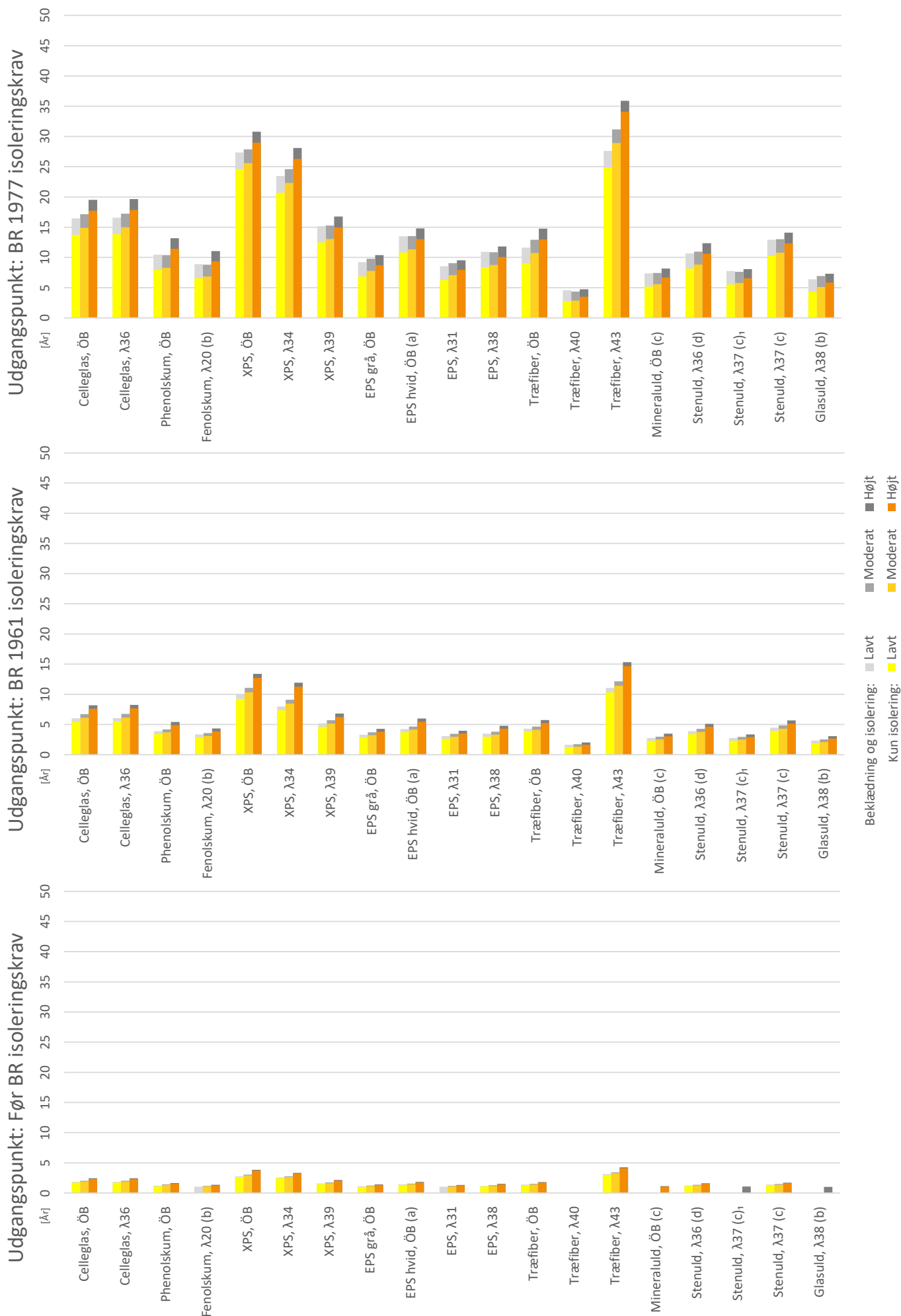




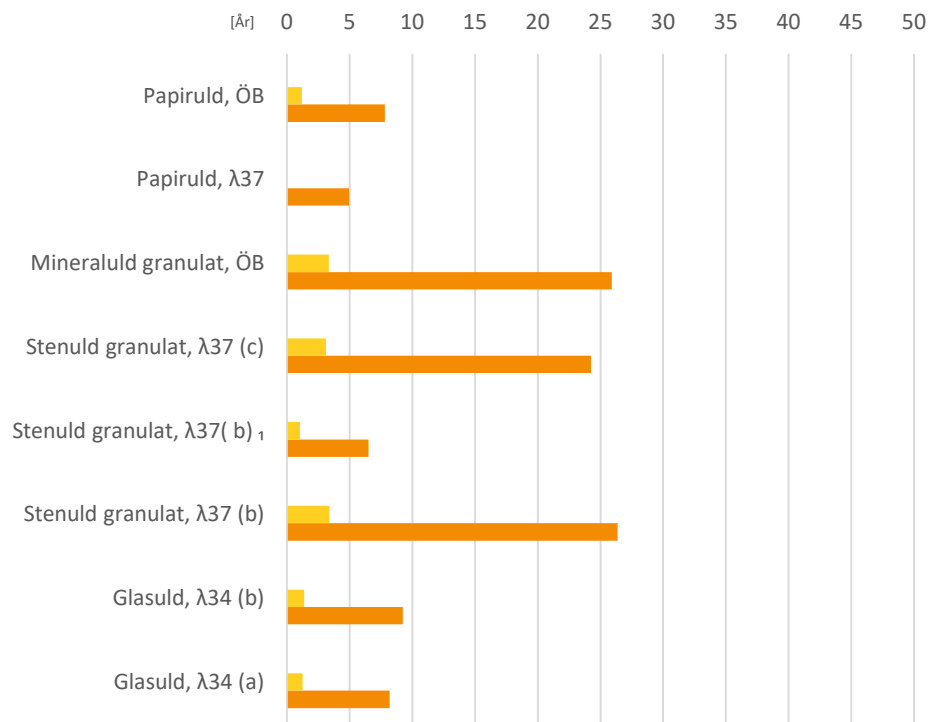




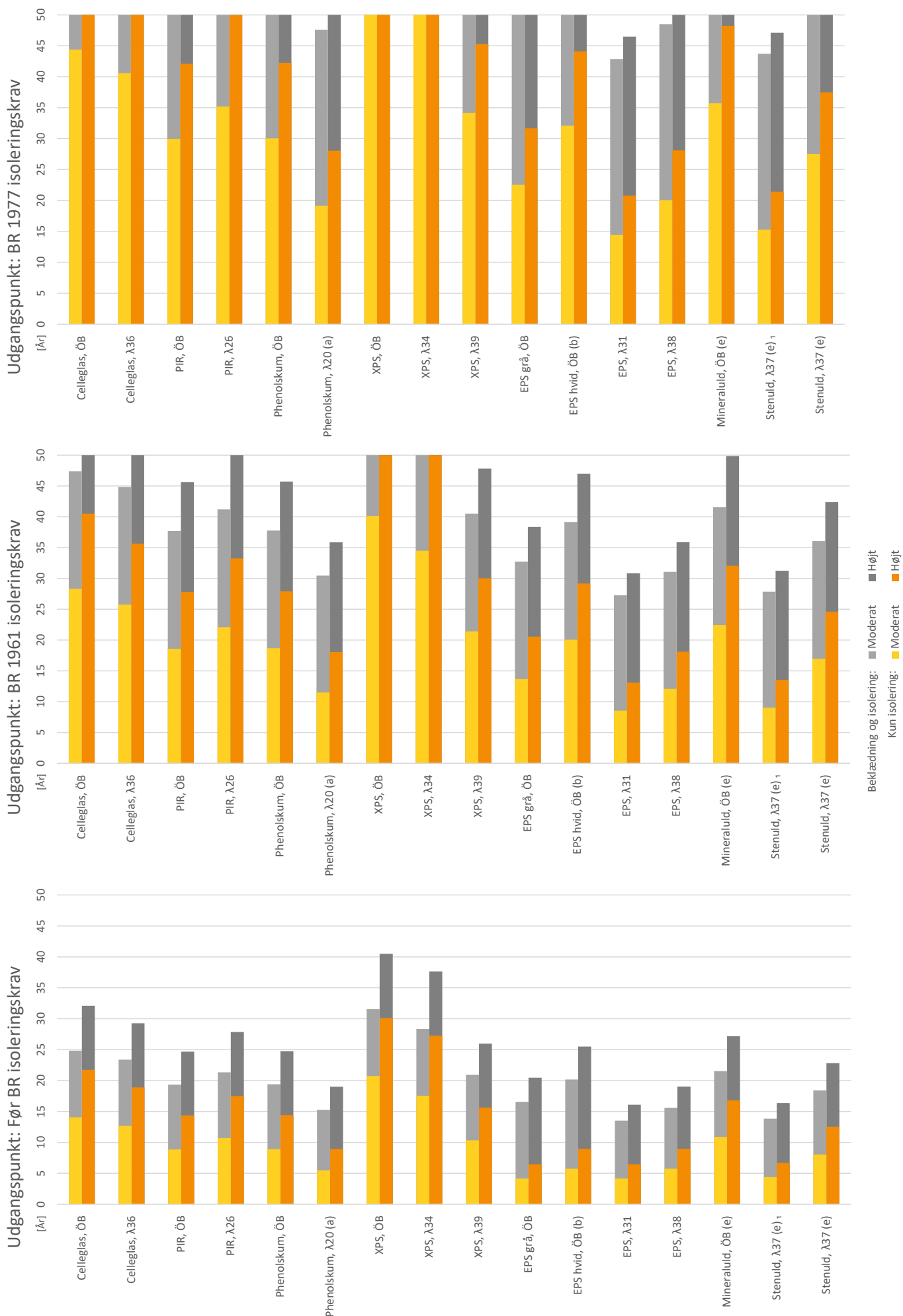


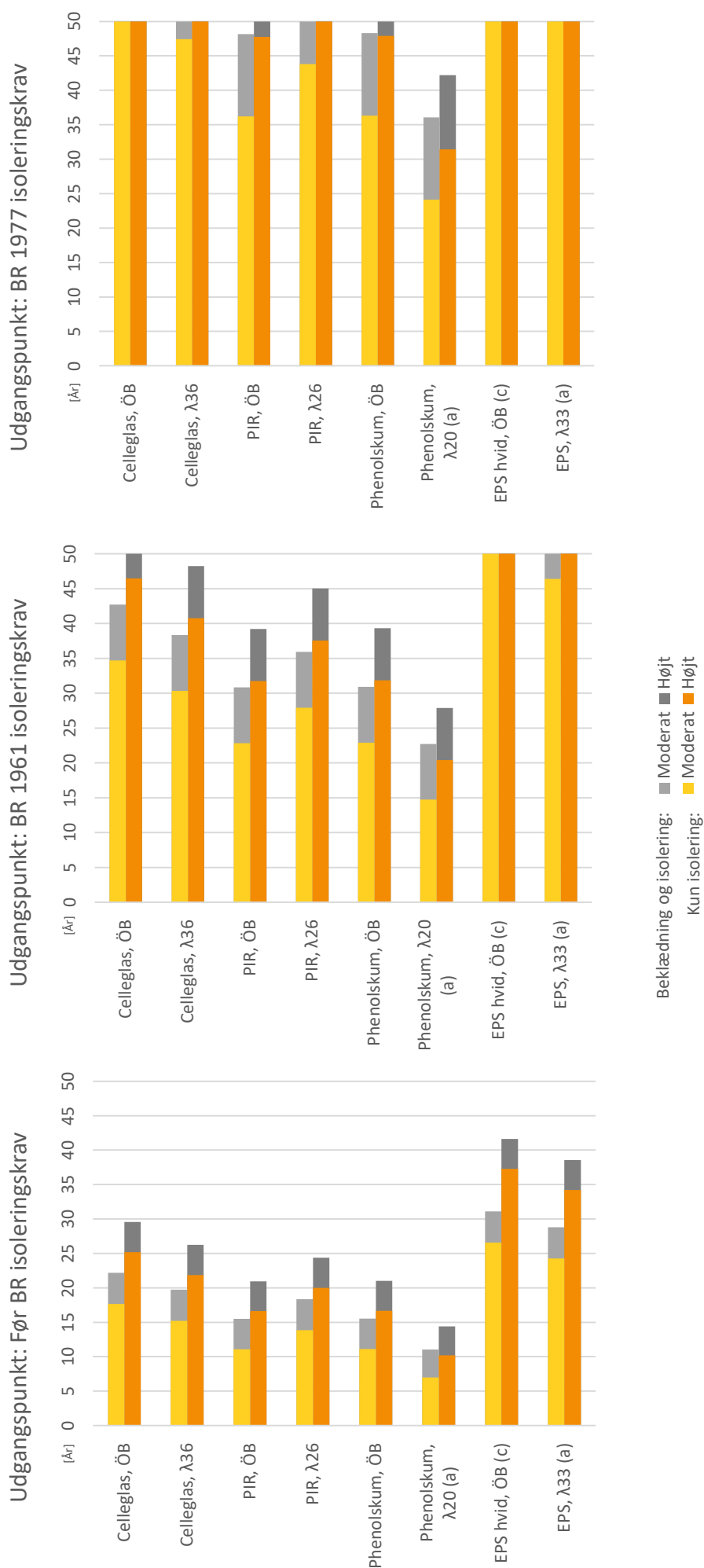


## Hulmursisolering



	Mellemrum mm	Oprindelig U-værdi W/m <sup>2</sup> *K	Ny U-værdi W/m <sup>2</sup> *K
Smalt hulrum	50	1,54 (tomt hulrum)	0,5
Moderat hulrum	75	0,54 (Lambda 045)	0,4
Bredt hulrum	130	0,32 (Lambda 045)	0,25



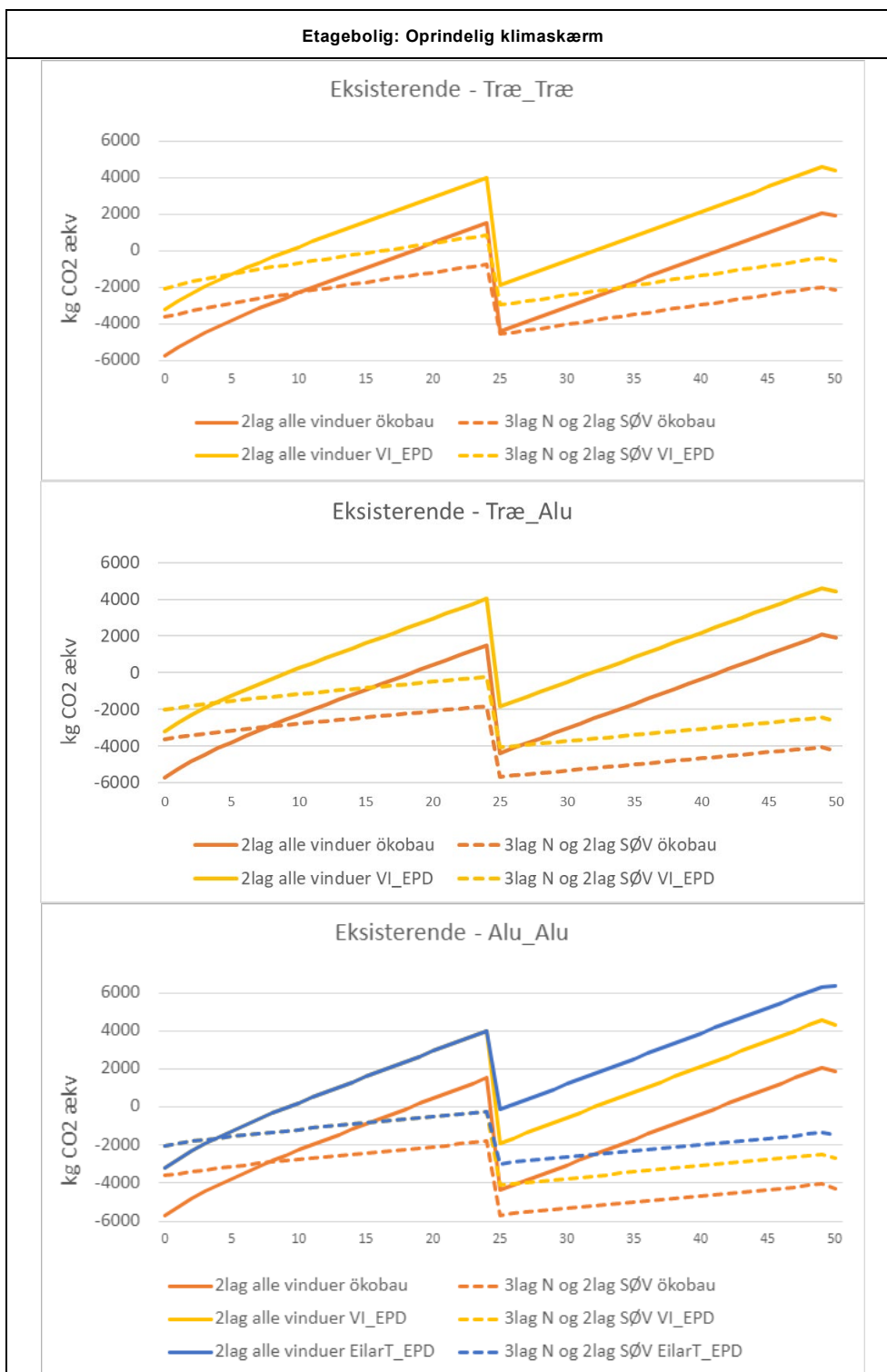


## Bilag 3. Modeldokumentation for vinduesudskiftning

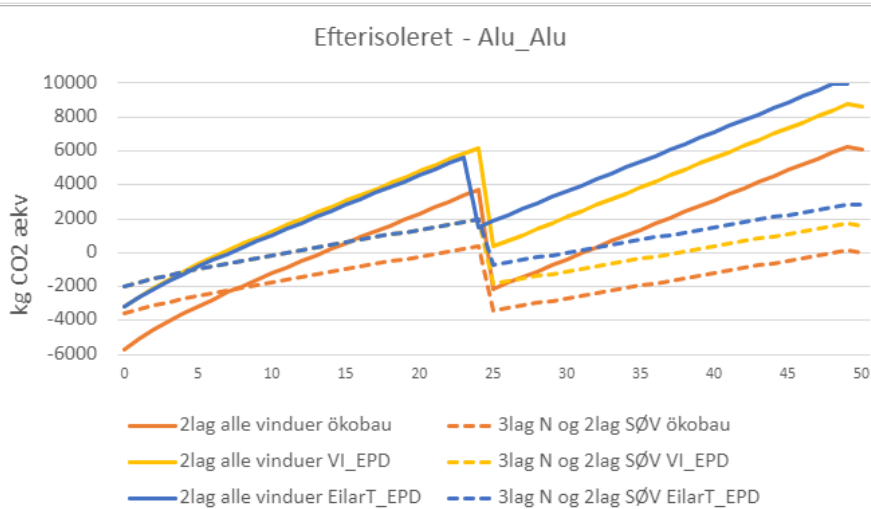
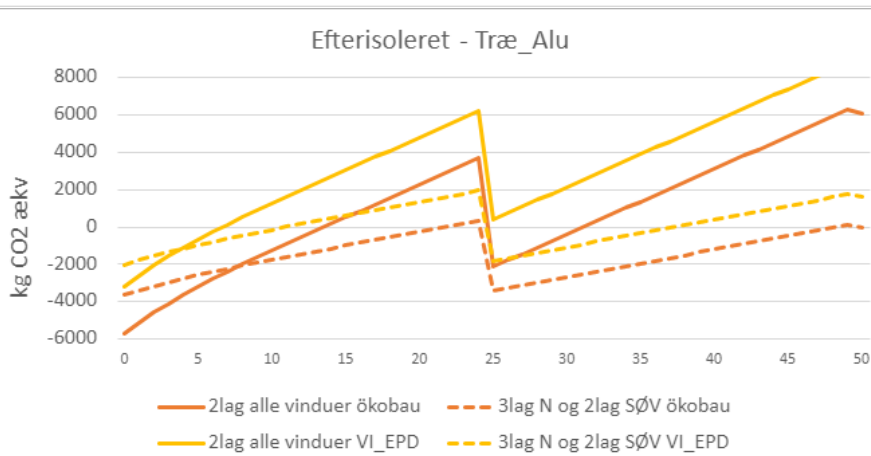
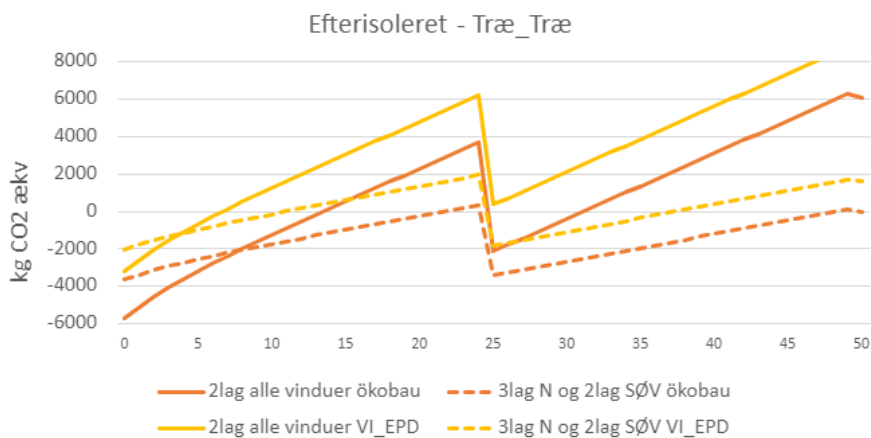
**Tabel 23.** Be18 inddata for referencecase i vinduesstudiet.

Be18 kategori	Etagebolig
Rotation	15°
Opvarmet bruttoareal	1978 m <sup>2</sup>
Varmekapacitet	143 Wh/K m <sup>2</sup>
Normal brugstid	168 timer
Tillæg	0 kWh/m <sup>2</sup> år
Varmeforsyning	Fjernvarme
Køling	Ingen
Solceller	Ingen
U-værdi, facade	0,18 W/m <sup>2</sup> K
U-værdi, facade u. terræn	0,16 W/m <sup>2</sup> K
U-værdi, tag	0,10 W/m <sup>2</sup> K
U-værdi, terrændæk	0,20 W/m <sup>2</sup> K
Linjetab, fundament	0,91 W/mK
Linjetab, vinduer	0,03 W/mK
U-værdi, 2-lags vindue	1,3 W/m <sup>2</sup> K
U-værdi, 3-lags vindue	0,9 W/m <sup>2</sup> K
g-værdi, 2-lags vindue	0,73
g-værdi, 3-lags vindue	0,53
Solafskærmning	Ingen
Grundluftskifte, naturlig ventilation, vinter	0,3 l/s m <sup>2</sup>
Grundluftskifte, mekanisk ventilation, vinter	0,3 l/s m <sup>2</sup>
Luftskifte, emhætte	0,6 l/s m <sup>2</sup>
Luftskifte, naturlig ventilation, sommer	2,0 l/s m <sup>2</sup>
Varmegenvinding, mekanisk ventilation	0,80
SEL-værdi, mekanisk ventilation	1,0 kJ/m <sup>3</sup>
Internt varmetilskud, personer	1,5 W/m <sup>2</sup>
Internt varmetilskud, apparatur	3,5 W/m <sup>2</sup>
Varmeanlæg	2 strengs, 60/30 °C
Pumpe, varmeanlæg	1x 250 W, 40%
Fjernvarmestik	15 m, 0,25 W/mK
Varmt brugsvandsproduktion	Central veksler
Fjernvarmeforsyning, varmt brugsvand	10 m, 0,3 W/mK
Cirkulationspumpe, varmt brugsvand	1x 56 W, 100%
Rør, varmt brugsvand	66 m, 0,20 W/mK
Rør, cirkulation	66 m, 0,18 W/mK
Fjernvarmeveksler, (effekt, varmetab og standby)	200 kW, 5 W/K, 5 W.

## Bilag 4. Detaljerede resultater for vinduesudskiftning

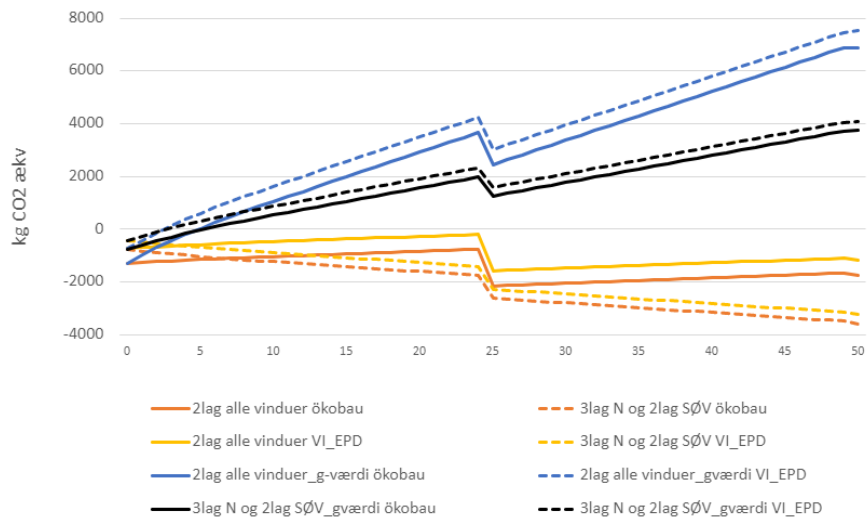


Etagebolig: Efterisoleret klimaskærm

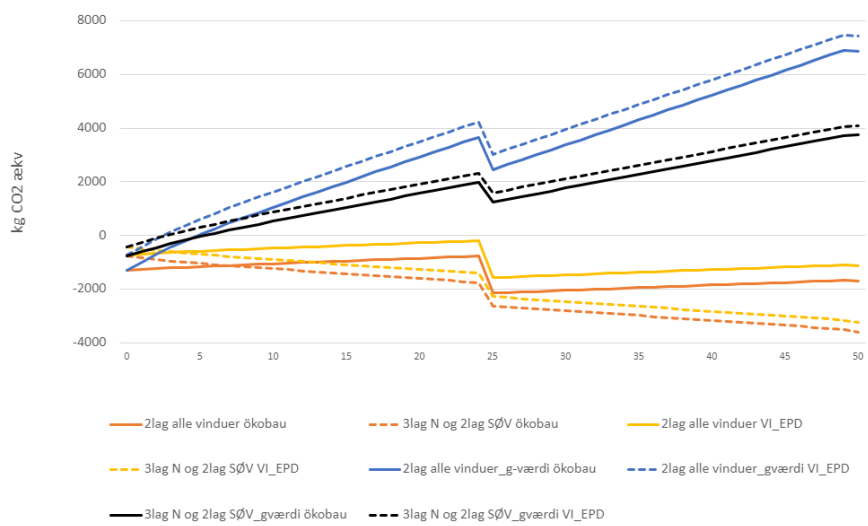


Rækkehus: Ikke-efterisoleret klimaskærm

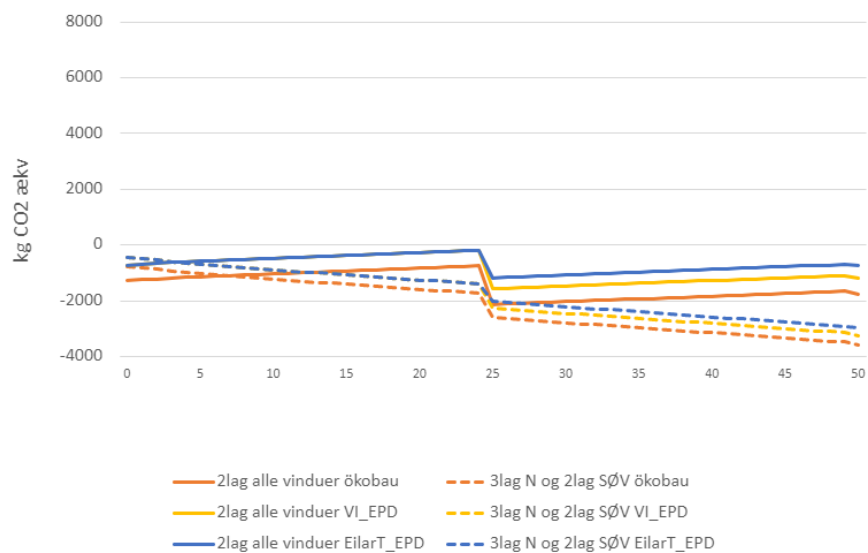
Eksisterende - Træ\_Træ



Eksisterende - Træ\_Aluminium

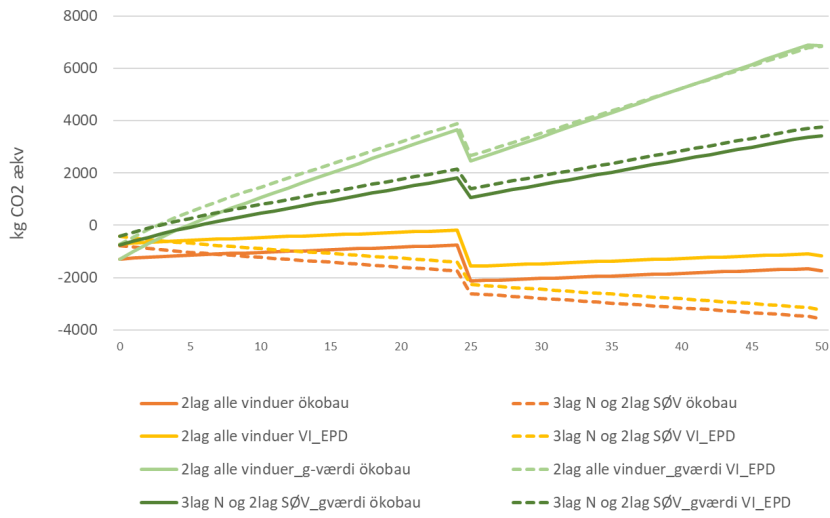


Eksisterende - Aluminium

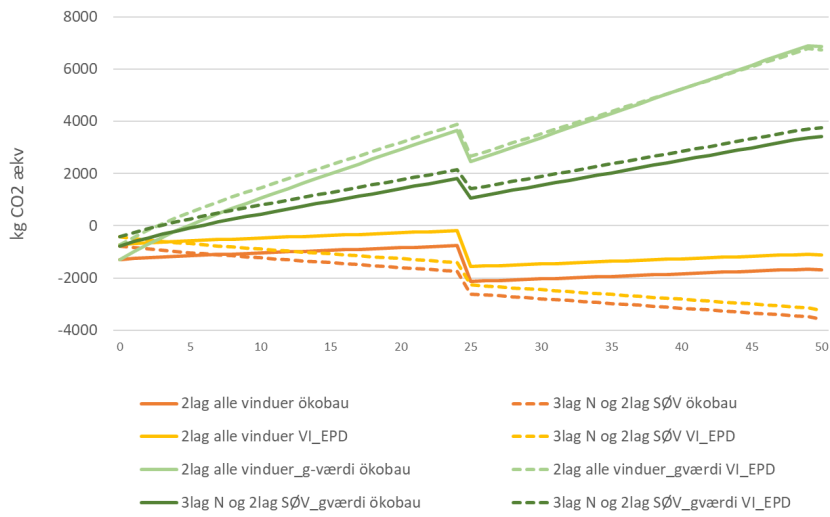


Rækkehus: Efterisoleret klimaskærm

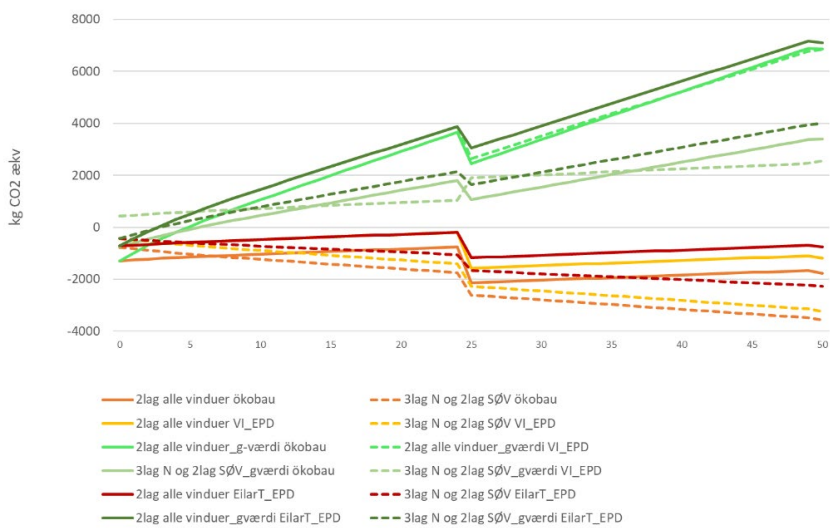
Efterisoleret - Træ\_Træ



Efterisoleret - Træ\_Alu

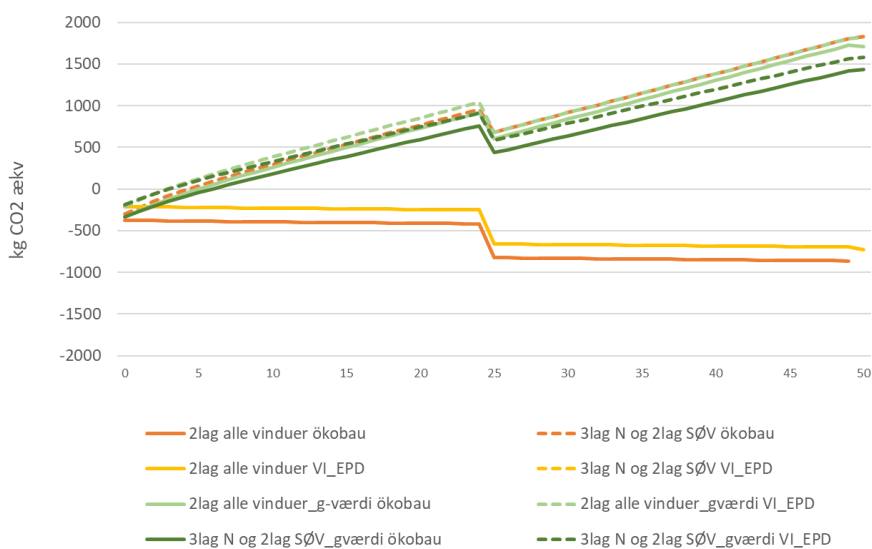


Efterisoleret - ALU\_ALU

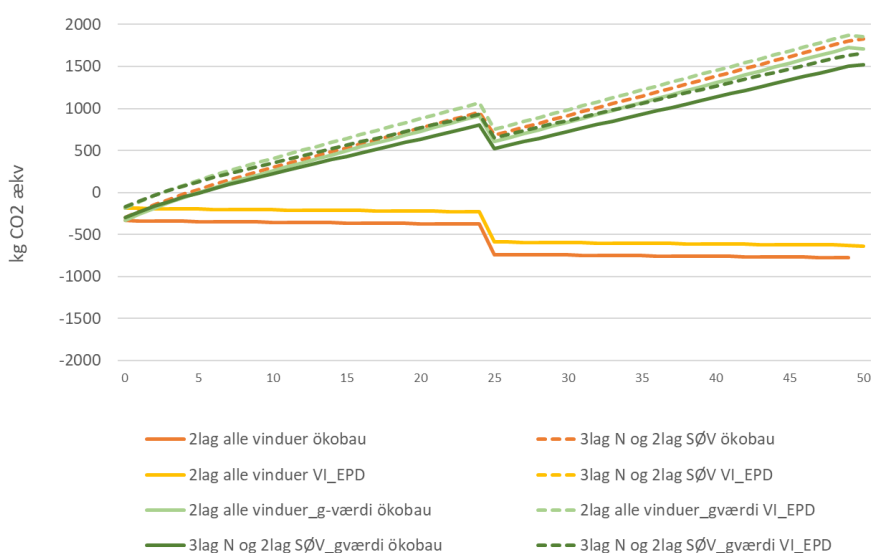


### Enfamiliehus: Ikke-efterisoleret klimaskærm

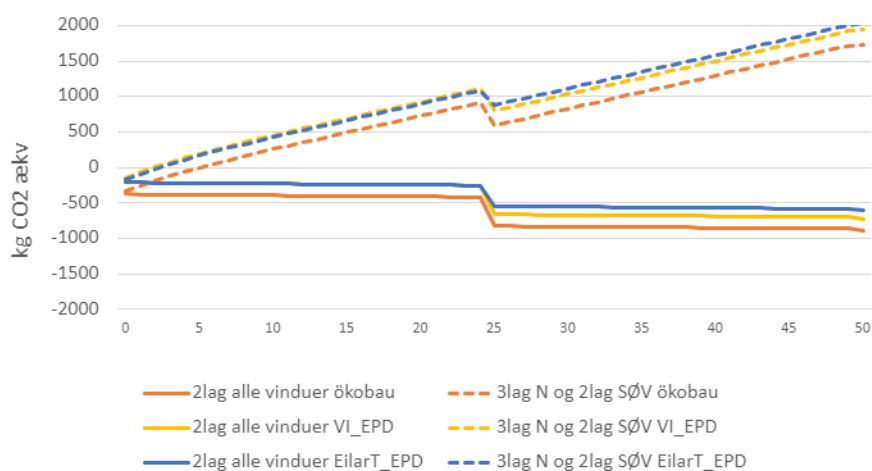
Eksisterende - Træ\_Træ



Eksisterende - Træ\_Aluminium

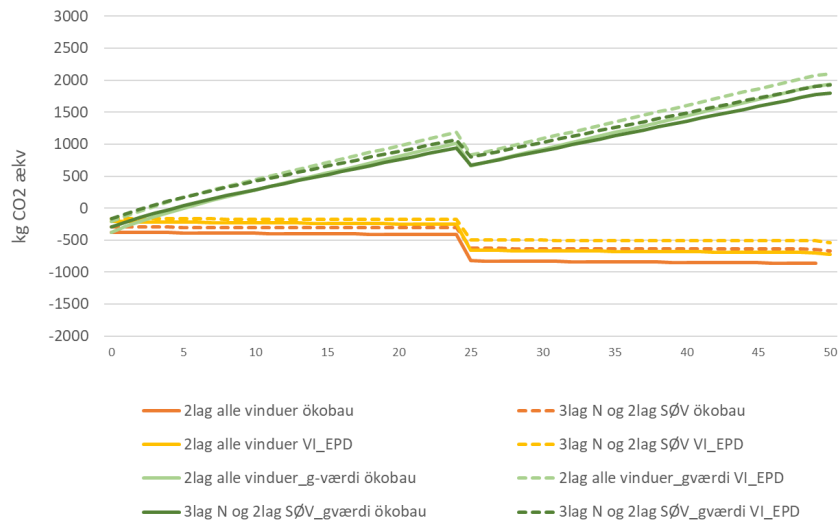


Eksisterende - Aluminium

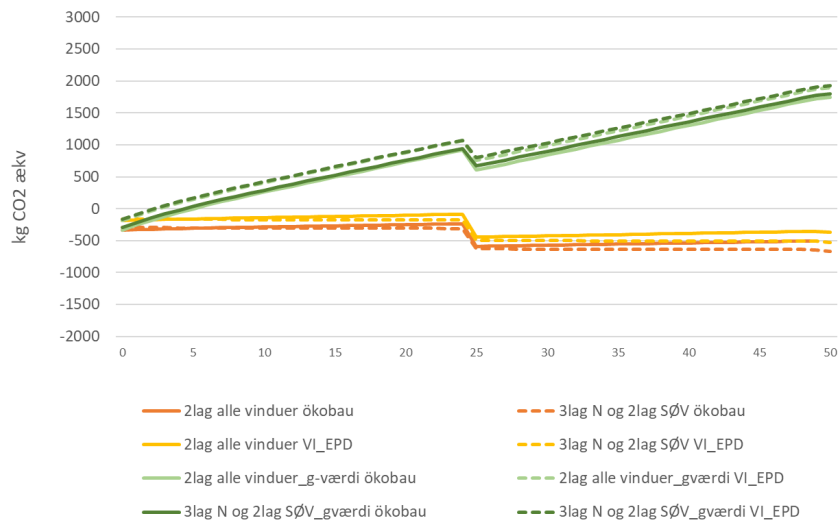


### Enfamiliehus: Efterisoleret klimaskærm

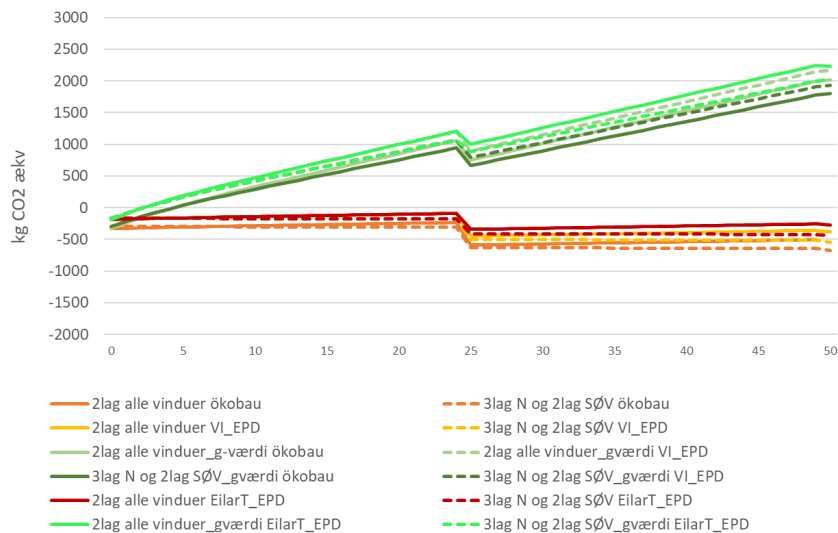
Efterisoleret - Træ\_Træ



Efterisoleret - Træ\_Alu



Efterisoleret - ALU\_ALU



## Bilag 5. Dokumentation af cases

Analysen af efterisolering, vinduesudskiftning og solceller bruger bygningseksempler på to måder. Nogle analyser kan ikke udføres uden at forudsætte en konkret bygning, herunder beregning af vinduers varmebalance og andel af kuldebroer i klimaskærmen. I et andet hen-seende er casene med til at afgrænse typiske isoleringstiltag på boligbyggeri.

I analyserne anvendes tre eksempelbygninger (se tegninger på næste side): Et enfamiliehus på 1 etage fra 1957, en rækkehusbebyggelse på 2 etager fra 1958 og en etageejendom på 5 etager fra 1980. Bygningstyperne er valgt for at gøre resultaterne anvendeligt for en større del af bygningsmassen. De tre boligformer udgør 72% af det opvarmede etageareal, hvis man definerer bygningsmassen i øvrigt som indeholdende stuehuse, erhverv og institutioner.

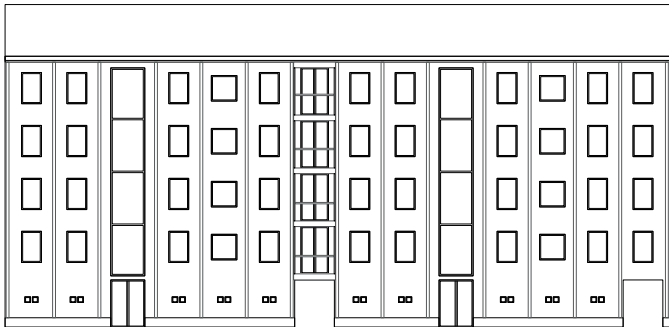
Da der forekommer forskelle i udformning, renoveringsmulighed og især energiforhold, er eksemplerne blevet generaliseret, så de repræsenterer en større andel af bygningsmassen ud over de konkrete bygninger (Tabel 24). En væsentlig tilpasning er fastlæggelse af U-værdier for tage, ydervægge og terrændæk. Her erstattes konstruktionernes originale U-værdier med generiske, som muliggør en variation af bygningers energistandard.

**Tabel 24.** Tilpasninger af bygningseksempler til at opnå større generaliserbarhed

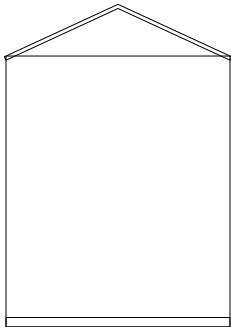
Emne	Tilpasning
Klimaskærm	Tage, ydervægge og terrændæk har éns U-værdier i alle bygningseksempler. I isoleringsstudiet varieres U-værdierne på tre forskellige niveauer: <ul style="list-style-type: none"><li>- Lavt (svarende til U-værdi før BR energikrav)</li><li>- Moderat (svarende til BR61 energikrav)</li><li>- Højt (svarende til BR77 energikrav)</li></ul>
Tagform	I forlængelse af generaliseringen af klimaskærmen varieres også tagformen i isoleringsstudiet. Uanset det originale tag introduceres der tre muligheder: Fladt tag, skråtag med uudnyttet loft og skråtag med loft til kip.
Sokkel og fundament	Alle bygninger har sokkel med éns egenskaber, som ikke renoveres
Kælder, terrændæk	Eventuelle kældre eller krybekælder er erstattet med terrændæk i stueplan
Facadeudformning	Facader har éns udformning over hele ydervægsareal inkl. gavle op til tagkanten
Varmekilde	Opvarmning sker ved direkte fjernvarme og radiatorer

De generiske opbygninger omfatter både skrå tagflader og lodrette ydervægge i de øverste etager. Isoleringsstudiet antager det fulde etageareal i alle case-varianter og tager ikke hensyn til et ringere etageareal af tagetager med skråloft. Indflydelsen på resultaterne er dog minimalt, da der regnes på besparelser og ikke absolutte værdier.

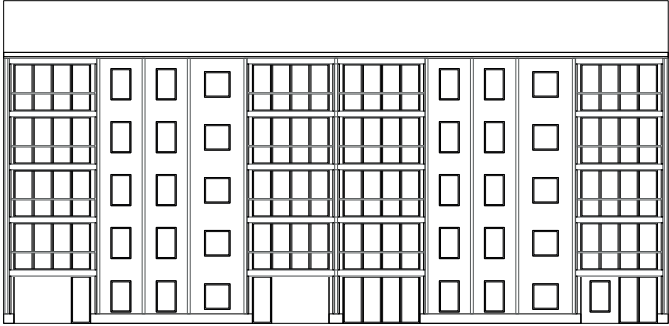
### Etageboligbyggeri



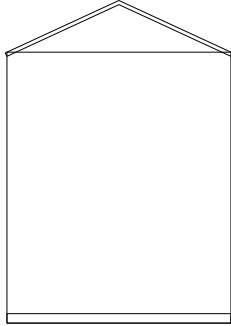
Facade mod nord



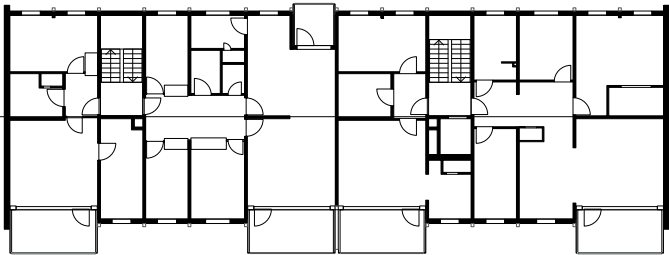
Facade mod øst



Facade mod syd

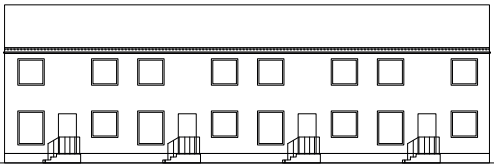


Facade mod vest

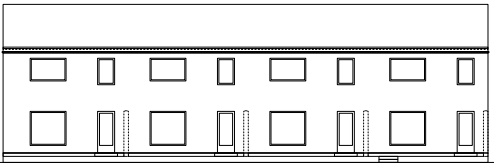


Plan normaletage

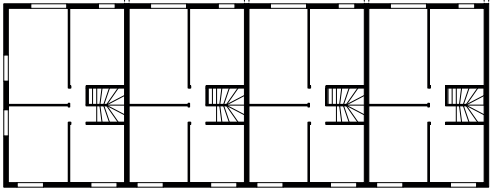
### Rækkehus



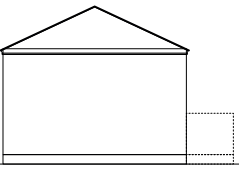
Facade mod nordøst



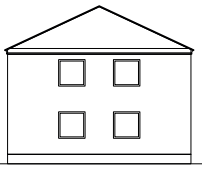
Facade mod sydvest



Plan 1. sal

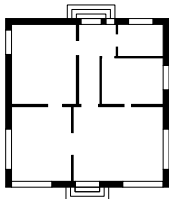


Facade mod nord

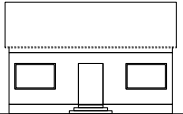


Facade mod sydøst

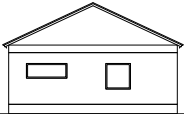
### Enfamiliehus



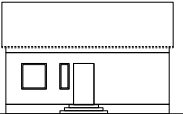
Stueplan



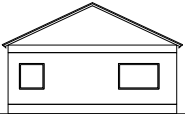
Facade mod syd



Facade mod øst



Facade mod nord



Facade mod vest

## Bilag 6. Emissionsfaktorer for driftsenergi

Tabel 25 indeholder de i denne rapport anvendte emissionsfaktorer efter i henhold til den frivillige bæredygtighedsklasse og LCAByg (COWI, 2020). Emissionsfaktorer angiver klimapåvirkningen knyttet til den leverede energi til bygninger. Baggrundsrapporten oplyser emissionsfaktorer i 5-års intervaller mellem 2020-2040. De manglende år bliver beregnet ved lineær interpolation og værdier fra 2040 gentages frem til 2070 jævnfør den frivillige bæredygtighedsklasse. I rapporten forudsættes direkte fjernvarme som standardforudsætning samt klimapåvirkning (GWP) som miljøindikator. Følsomhedsanalyserne indeholder derudover beregninger for el-baseret luft-til-vand varmepumpe som varmekilde og resultater angivet i primærenergi (PEtot). Den totale primærenergi (PEtot) er beregnet som sum af den fornybare (PErt) og ikke-fornybare (PEnt) andel fra baggrundsrapporten. Emissioner for fjernvarme udgør et nationalt gennemsnit.

**Tabel 25.** Emissionsfaktorer for driftsenergi.

År	Fjernvarme		EI	
	GWP	PEtot	GWP	PEtot
	kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh	MJ/kWh	kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh	MJ/kWh
2020 <sup>(1)</sup>	1,31E-01	5,49E+00	2,64E-01	9,77E+00
2021	1,23E-01	5,36E+00	2,38E-01	9,42E+00
2022	1,14E-01	5,23E+00	2,12E-01	9,06E+00
2023	1,05E-01	5,10E+00	1,87E-01	8,71E+00
2024	9,66E-02	4,97E+00	1,61E-01	8,35E+00
2025 <sup>(1)</sup>	8,78E-02	4,84E+00	1,35E-01	8,00E+00
2026	8,45E-02	4,79E+00	1,17E-01	7,72E+00
2027	8,12E-02	4,74E+00	9,98E-02	7,43E+00
2028	7,79E-02	4,69E+00	8,22E-02	7,15E+00
2029	7,46E-02	4,63E+00	6,46E-02	6,86E+00
2030 <sup>(1)</sup>	7,13E-02	4,58E+00	4,70E-02	6,58E+00
2031	7,08E-02	4,58E+00	4,59E-02	6,52E+00
2032	7,03E-02	4,58E+00	4,48E-02	6,46E+00
2033	6,98E-02	4,58E+00	4,36E-02	6,40E+00
2034	6,93E-02	4,58E+00	4,25E-02	6,34E+00
2035 <sup>(1)</sup>	6,88E-02	4,58E+00	4,14E-02	6,28E+00
2036	6,86E-02	4,57E+00	4,12E-02	6,25E+00
2037	6,85E-02	4,56E+00	4,10E-02	6,23E+00
2038	6,83E-02	4,56E+00	4,07E-02	6,20E+00
2039	6,82E-02	4,55E+00	4,05E-02	6,18E+00
2040 <sup>(1)</sup> - 2070	6,80E-02	4,54E+00	4,03E-02	6,15E+00

(1) Nøgletal fra baggrundsrapport (COWI, 2020)

Energirenovering rummer et stort potentiale til at reducere den eksisterende bygningsmasses klimaaftryk. Livscyklusvurderinger (LCA), som både inkluderer den sparede energi og de anvendte materialer, kan være med til at reducere udledningen af drivhusgasser mest muligt. Rapporten undersøger balancen mellem energibesparelser og klimapåvirkninger fra materialer for efterisolering, vinduesudskiftning og opsætning af solceller. Rapporten er resultat af projektet Balancepunkt mellem materialeforbrug og energibesparelser, som er udført af BUILD og Arkitema og støttet af Grundejernes Investeringsfond.



**BUILD**  
AALBORG UNIVERSITET