

# Solcellers klimaaftryk

Solcellers klimaaftryk og deres potentiale for at reducere CO<sub>2</sub>-udledningen fra Københavns Kommunes bygninger

Udarbejdet af: Pernille Krieger  
Kontrolleret af: Rasmus Søgaard  
Godkendt af: Nina Wellendorff Marquardsen  
Dato: 14.11.2023  
Version: 03  
Projekt nr.: 1020679

**Artelia A/S**  
Buddingevej 272  
DK-2860 Søborg  
+45 4457 6000  
CVR: 64 04 56 28  
[www.arteliagroup.dk](http://www.arteliagroup.dk)

## Indholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Ordliste.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Forord.....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Konklusion .....</b>	<b>9</b>
3.1	Konklusioner fra delanalyse 1: Solcellers CO <sub>2</sub> -aftryk .....	9
3.2	Konklusioner fra delanalyse 2: Energiforsyningen i dag og i fremtiden .....	9
3.3	Konklusioner fra delanalyse 3: Cases fra Københavns Kommune .....	10
<b>4</b>	<b>Baggrund og formål.....</b>	<b>11</b>
4.1	Baggrund og afgrænsning .....	11
4.2	Formål .....	12
4.3	Læsevejledning .....	12
<b>5</b>	<b>Metode, afgrænsning og tilgang .....</b>	<b>14</b>
5.1	Delanalyse 1: Solcellers CO <sub>2</sub> -aftryk .....	14
5.2	Delanalyse 2: Energiforsyningen i dag og i fremtiden .....	17
5.3	Delanalyse 3: Cases fra Københavns Kommune .....	17
<b>6</b>	<b>Solcellers CO<sub>2</sub>-aftryk.....</b>	<b>19</b>
6.1	Materiale.....	22
6.2	Levetider .....	23
6.3	EPD-standard .....	24
6.4	Effektivitet.....	25
6.5	Monteringsløsninger.....	28
6.6	Invertereffektivitet.....	29
6.7	Fastlæggelse af bedste, værste og gennemsnitlige scenarie.....	30
<b>7</b>	<b>Energiforsyningen .....</b>	<b>32</b>
7.1	Energiforsyningen i Danmark i dag.....	32
7.2	Energiforsyningen i Danmark i fremtiden.....	33
7.3	Solcellers klimamæssig tilbagebetalingstid .....	33
7.4	Solcellers klimamæssige tilbagebetalingstid som funktion af orientering og hældning .....	35
<b>8</b>	<b>Cases fra Københavns Kommune .....</b>	<b>38</b>
8.1	Målt elforbrug vs. maksimal elproduktion iht. BR18 .....	41
8.2	Optimeret solcelleareal .....	44
8.3	Solcellepotentialet for cases .....	50
<b>9</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>51</b>
9.1	LCA-beregningsmetode.....	51
9.2	Energiforsyning .....	52
9.3	Energiforbrug.....	52
9.4	Batterier .....	52

<b>10</b>	<b>Referencer .....</b>	<b>54</b>
<b>11</b>	<b>Bilagsoversigt.....</b>	<b>55</b>

s

## 1 Ordliste

Emissionsfaktorer	Emissionsfaktorer er mængden af luftforurening eller drivhusgasser, der frigives ved en bestemt aktivitet, f.eks. energiproduktion. De bruges til at vurdere og beregne klimapåvirkningen og miljøkonsekvenserne af forskellige processer og aktiviteter.
Energimix	Energimix refererer til den samlede sammensætning af energikilder, som et område, land eller en virksomhed anvender til at opfylde deres energibehov. Dette inkluderer en blanding af energiformer som kul, naturgas, vedvarende energi (sol, vind, vandkraft osv.) og andre kilder, der bruges til at generere elektricitet eller levere varme.
EPD	En EPD er en standardiseret dokumentation, der indeholder verificerede miljøoplysninger om et produkts livscyklus, herunder produktion, anvendelse og bortskaffelse.
Fotovoltaisk	Fotovoltaisk (PV) henviser til teknologien, der bruges til at konvertere sollys direkte til elektrisk energi ved hjælp af solceller eller fotovoltaiske celler. Disse celler er designet til at generere elektricitet ved at udnytte fotonernes (lyspartiklernes) energi fra sollys, hvilket gør dem til en vigtig komponent i solcelleanlæg. Teknologien er opkaldt efter fotoner og volt (enhed for elektrisk spænding) og spiller en central rolle i vedvarende energiproduktion.
Inverter	En inverter er en elektronisk enhed, der bruges til at ændre strømmen fra en form til en anden. En inverter i en solcellesammenhæng bruges til at konvertere den jævnstrøm (DC), som solceller genererer, til vekselstrøm (AC), som kan bruges i bygningen.
Livscyklusvurdering	En livscyklusvurdering (LCA) er en standardiseret metode til at evaluere de miljømæssige påvirkninger, der er forbundet med et produkts livscyklus fra råvareudvinding og produktion til brug og bortskaffelse.
LCA	Se under "Livscyklusvurdering".
Livscyklusfaser	Livscyklusfaser refererer til forskellige faser, som et produkt eller en proces gennemgår i løbet af dets samlede levetid.
Miljøvaredeklaration	Se "EPD".
Monokrystallinsk solcelle	En monokrystallinsk solcelle består af ét siliciumkrystal. Cellerne er opdelt i kvadrater med mindre afstand for at få en højere effekt og dermed større virkningsgrad. De er ofte monteret på en hvid baggrund, der reflekterer

	<p>det lys, der trænger igennem cellerne, så cellerne bedre kan holdes afkølet. Ved højere temperatur falder virkningsgraden og dermed effekten af solcellerne.</p>
Polykrystallinsk solcelle	<p>Polykrystallinske solceller indeholder flere siliciumkrystaller, og de er ofte i blå nuancer og firkantede. De bliver dannet ved afstøbning i en form. De enkelte krystaller i solcellen kaster lyset forskelligt tilbage, hvilket giver en 'levende' overflade. Polykrystallinske solceller kan indfarves til den farve, som man ønsker, men det koster effekt, så virkningsgraden bliver lavere, og solcellerne bliver dyrere. Polykrystallinske celler har en lidt lavere virkningsgrad pr. kvadratmeter end monokrystallinske.</p>
Solcelleanlæg	<p>Et solcelleanlæg består af solcellepaneler, invertere, montagesystemer og andre komponenter, der arbejder sammen for at generere elektrisk energi fra sollyset. Solcelleanlæg kan variere i størrelse fra små, enkeltstående installationer på huse til store solparker, der dækker store landområder. De udnytter solens energi til at producere elektricitet og bidrager til vedvarende energiproduktion.</p>
Solceller	<p>Solceller er elektroniske enheder, der omdanner sollys direkte til elektrisk energi. De består normalt af siliciummaterialer og genererer elektricitet, når sollyset rammer dem, hvilket gør dem til en ren og vedvarende kilde til elektrisk strøm i solenergisystemer.</p>
Solcellepanel	<p>Et solcellepanel er en enhed, der består af flere solceller, som er forbundet elektrisk og monteret på en ramme. Disse paneler er designet til at opsamle sollys og konvertere det til elektrisk energi. De er byggestenene i et solcelleanlæg. Typisk skal der 5 m<sup>2</sup> solcelleanlæg til 1 kWp anlæg.</p>
Tilbagebetalingstid	<p>Perioden, det tager at generere nok indtægter eller besparelser fra en investering til at dække de oprindelige omkostninger ved investeringen. Dette kan ses både i et økonomisk (DKK) og klimamæssigt (CO<sub>2</sub>e) perspektiv.</p>
Totaløkonomi	<p>Totaløkonomi er en tilgang, der evaluerer de samlede omkostninger i forbindelse med et projekt eller en investering, herunder både direkte og indirekte omkostninger over hele levetiden. Som regel tilbagediskonterer metoden fremtidige udgifter til en nutidsværdi.</p>
Tyndfilmssolcelle	<p>Tyndfilmssolceller er lavet af meget tynde lag af halvledende materialer. De kan fremstilles ved at påføre disse materialer i form af en tynd film på et substrat som glas, plastik eller metal. Tyndfilmssolceller fungerer bedre i gråvejr end de krystallinske, hvilket er en fordel på vores breddegrader, hvor det ofte er skyet vejr. Tyndfilmssolceller anvender mindre sjældne og dyre materialer som indium og gallium sammenlignet med nogle andre solcelleteknologier som f.eks. siliciumbaserede solceller.</p>

Watt peak / Wp	"Watt peak" eller "Wp" er en måleenhed, der bruges til at angive den maksimale effektivitet eller ydeevne af en solcelle eller et solcellepanel under standardiserede betingelser. Det repræsenterer den mængde elektrisk effekt, som en solcelle eller et solpanel kan genere ved optimale forhold. En tommelfingerregel er, at der skal 1 kWp solcelleanlæg til for at producere 1.000 kWh årligt afhængigt af orientering, placering og hældning.
Vedvarende energi	Vedvarende energi refererer til former for energi, der kan genereres eller udvindes på en måde, der ikke udtømmer naturressourcerne og ikke medfører skadelig miljøpåvirkning.

## 2 Forord

Denne analyse er udarbejdet af Artelia på vegne af Københavns Kommune, som har ønsket at få belyst solcellers klimapåvirkning samt potentialet for at reducere CO<sub>2</sub>-udledningen fra Københavns Kommunes egne bygninger. Projektet er iværksat som led i opfyldelsen af initiativ nr. 5 i Teknik- og Miljøforvaltningens budgetnotat fra budgetåret 2023 *"TM129 Solcellehandlingsplan – Tilskud til rådgivning og solceller på kommunale bygninger"*.

Rapporten baserer sig på en omfattende analyse af miljøvaredeklarationer på 30 forskellige solcellepaneler produceret af 15 forskellige producenter. Dette analysegrundlag har muliggjort udarbejdelsen af tre scenarier ud fra parametre som CO<sub>2</sub>-aftryk, energieffektivitet og økonomi. Ydermere er konsekvensen af forskellige installationsparametre såsom hældning, orientering, geografisk placering mv. sammenlignet med et gennemsnitligt elforbrug i hhv. en daginstitution, skole og sportshal i Københavns Kommune.

Arbejdet med denne rapport blev udført i perioden august 2023 – november 2023. Rapporten forventes fremlagt for Københavns Kommunes Økonomiudvalg og Teknik- og Miljøudvalg ultimo 2023.



### 3 Konklusion

Der er en markant variation i CO<sub>2</sub>-aftryk fra solceller i dag og dermed også i solcellernes miljømæssige tilbagebetaling. Derfor er det afgørende at fastsætte specifikke retningslinjer for valg af solceller for at undgå en situation, hvor de solcelleanlæg, som vi investerer i, aldrig betaler sig hjem miljømæssigt. De kommende afsnit indeholder opsummeringer af anbefalinger og konklusioner fra de tre delanalyser.

#### 3.1 Konklusioner fra delanalyse 1: Solcellers CO<sub>2</sub>-aftryk

Der er stor forskel på solceller, både når det kommer til deres produktivitet og deres CO<sub>2</sub>-aftryk. I delanalyse 1 er der foretaget en generisk analyse af solcellers CO<sub>2</sub>-aftryk for at kortlægge de faktorer, som har indvirkning på solcellernes CO<sub>2</sub>-aftryk. Analysen er ikke specificeret til en bestemt bygning, tagflade eller facade. Resultaterne af delanalyse 1 skal derfor betragtes i en bredere sammenhæng.

Konklusioner:

- Der er stor forskel på solcellers CO<sub>2</sub>-aftryk. Der bør derfor altid være en produktspecifik miljøvaredeklaration (EPD) på solcellen, så den kan sammenlignes med andre produkter (afsnit 6.1)
- Solceller bør maksimalt have et CO<sub>2</sub>-aftryk på 1,4 kg CO<sub>2</sub>/Wp<sup>1</sup> ved en betragtningsperiode på 50 år medregnet livscyklusfaserne produktion (A1-A3), udskiftning (B4), endt levetid (C3-C4) (afsnit 6.7)
- Solceller bør som minimum have en effektivitet på 184 Wp/m<sup>2</sup>. Der kan vælges solceller med lavere effektivitet som f.eks. tyndfilmssolceller, hvis solcellearealet ikke er en begrænsende faktor (afsnit 6.4)
- Af de undersøgte solceller er monokrystallinske solceller de mest effektive, og tyndfilmssolceller de mindst effektive (afsnit 6.4)
- Man bør altid vælge en højeffektiv inverter med en virkningsgrad på minimum 90 %. Den højeffektive inverter vurderes at være 50 % dyrere end en standardinverter. Forskellen i virkningsgraden betyder dog, at der ved anvendelse af en standardinverter er behov for at anvende et 20 % større solcelleareal (afsnit 6.6)

#### 3.2 Konklusioner fra delanalyse 2: Energiforsyningen i dag og i fremtiden

Solcellers klimamæssige rentabilitet afhænger af elnettets emissionsfaktor, som er et udtryk for klimabelastningen pr. kWh. Denne belastning varierer ligesom prisen over året, men også over døgnet, da den afspejler sammensætningen af produktionsformerne i elnettet. Delanalyse 2 undersøger den miljømæssige tilbagebetalingstid ved etablering af solceller.

---

<sup>1</sup> I den pågældende EPD bør CO<sub>2</sub>-udledningen fra faserne A1-A3 + C3-C4 maksimalt være 0,7 kg CO<sub>2</sub>/Wp, da EPD'en ikke betragter solcellens levetid.

## Konklusioner:

- Solcellens CO<sub>2</sub>-aftryk er afgørende for, om solcellen har en positiv indvirkning på miljøet. Valget af en solcelle bør derfor altid baseres på solcellens produktspecifikke EPD (afsnit 7.3)
- Solcellens miljømæssige tilbagebetalingstid afhænger af solcellens orientering og hældning.
- Den mest optimale løsning er en orientering mod syd med en hældning på 45 grader (afsnit 7.4), hvor den gennemsnitlige solcelle med et CO<sub>2</sub>-aftryk på maksimalt 1,4 kg CO<sub>2</sub>/Wp<sup>2</sup> ved en betragtningsperiode på 50 betaler sig hjem miljømæssigt efter 15 år. Den CO<sub>2</sub>-mæssigt bedste solcelle (0,6 kg CO<sub>2</sub>/Wp<sup>3</sup>) vil betale sig hjem miljømæssigt efter 3 år, mens den CO<sub>2</sub>-mæssigt værste solcelle (3,0 kg CO<sub>2</sub>/Wp<sup>4</sup>) ikke betaler sig hjem miljømæssigt inden for solcellens levetid (afsnit 7.3)

### 3.3 Konklusioner fra delanalyse 3: Cases fra Københavns Kommune

Med de markedsvilkår, der er i dag, skal man som hovedregel ikke producere mere el, end der forbruges. Det skyldes, at man i mange tilfælde enten skal betale for at komme af med strømmen på nettet eller får en så lav spotpris, at den spises op af transmissionsafgift. Delanalyse 3 undersøger, om det er muligt at sætte flere solceller op på kommunens bygninger uden at overproducere strøm, som skal sælges til nettet.

## Konklusioner:

- Solcelleanlæg bør projekteres, så det matcher bygningens unikke elforbrug. Anlægget bør tilpasses, så der opnås den maksimale dækningsgrad uden unødvendig overproduktion af strøm, som skal tilbageføres til nettet (afsnit 8.2)
- For den undersøgte daginstitution kan solcellearealet projekteres til en dækningsgrad på 46 % uden at medføre overproduktion af strøm (afsnit 8.2)
- For den undersøgte skole kan solcellearealet projekteres til en dækningsgrad på 33 % uden at medføre overproduktion af strøm (afsnit 8.2)
- For den undersøgte hal kan solcellearealet projekteres til en dækningsgrad på 19 % uden at medføre overproduktion af strøm (afsnit 8.2)

<sup>2</sup> Ved en betragtningsperiode på 50 år. I den pågældende EPD bør CO<sub>2</sub>-udledningen fra faserne A1-A3 + C3-C4 maksimalt være 0,7 kg CO<sub>2</sub>/Wp, da EPD'en ikke betragter solcellens levetid.

<sup>3</sup> Ved en betragtningsperiode på 50 år. I den pågældende EPD bør CO<sub>2</sub>-udledningen fra faserne A1-A3 + C3-C4 maksimalt være 0,3 kg CO<sub>2</sub>/Wp, da EPD'en ikke betragter solcellens levetid.

<sup>4</sup> Ved en betragtningsperiode på 50 år. I den pågældende EPD bør CO<sub>2</sub>-udledningen fra faserne A1-A3 + C3-C4 maksimalt være 1,5 kg CO<sub>2</sub>/Wp, da EPD'en ikke betragter solcellens levetid.

## 4 Baggrund og formål

### 4.1 Baggrund og afgrænsning

Denne analyse blev iværksat som svar på Københavns Kommunes initiativ til at undersøge og forstå solcellers effekt ift. at reducere klimabelastningen fra kommunens egne bygninger i forbindelse med mulig opsætning af flere solceller på kommunens byggerier. Dette initiativ blev formuleret som initiativ nr. 5 i Teknik- og Miljøforvaltningens budgetnotat fra budgetåret 2023 "TM129 Solcellehandlingsplan – Tilskud til rådgivning og solceller på kommunale bygninger".

#### **Initiativ 5: Undersøgelse af mulighed for etablering af solcelleanlæg i forbindelse med kommunalt nybyggeri**

Med dette initiativ gennemføres en undersøgelse af muligheden for, at der i større omfang kan etableres solcelleanlæg på tag, facader og andre steder i forbindelse med kommunens bygge- og anlægsprojekter. Tagflader på nybyggeri er i flere tilfælde en aktiv del af bygningen, fx til legepladser, boldbaner og tekniske installationer. Ligeledes bygges flere tage med blødt underlag, som ikke egner sig til at bære solceller. Det betyder, det er svært at lave en fast model for etablering af solceller på nybyggeri. I stedet bliver det en konkret vurdering fra sag til sag, om det er muligt at etablere solceller. Økonomiudvalget og Teknik- og Miljøudvalget forelægges medio [ændret til 'ultimo'] 2023 resultaterne af undersøgelsen.

I en tid, hvor bæredygtighed og reduktion af drivhusgasemissioner er et globalt fokuspunkt, har Københavns Kommune forpligtet sig til at handle proaktivt for at mindske sin egen klimapåvirkning, jf. KBH2025 Klimaplan (Teknik og Miljøforvaltningen, 2012). Solcellehandlingsplanen har til formål at supplere KBH2025 Klimaplanens roadmap med indsats, der øger produktionen af vedvarende energi.

Projektet tager udgangspunkt i solcelleteknologien som helhed, idet ønsket er at udarbejde generelle retningslinjer for at forbedre solcelleudnyttelsen i Københavns Kommune. Projektet begrænser sig derfor ikke til en specifik bygning eller tagflade.

Solcellers faktiske indvirkning på miljøet afhænger af en række faktorer, herunder typen af solceller, deres placering, orientering, hældning, mv. For at træffe informerede beslutninger om installationen af solcelleanlæg på kommunens bygninger er der behov for en dybdegående analyse og evaluering af solcellernes CO<sub>2</sub>-aftryk.

Samtidig er det væsentligt at have fokus på, hvorvidt solcellerne er fremstillet under etiske arbejdsforhold og ikke vha. eksempelvis tvangsarbejde. Ifølge data præsenteret i et studie af Crawford & Murphy (Crawford & Murphy, 2023) er anvendelsen af kinesisk tvangsarbejde dog oftere tilfældet end undtagelsen, idet 13 ud af 16 undersøgte paneler ikke kan fremlægge godkendte forsyningskædeprofiler. Kun Meyer Burger Technology, REC Group med panelerne N-PEAK og Alpha samt Trina Solars asiatiske paneler viste ingen spor på anvendelse af tvangsarbejde. Der findes endnu ikke en produktspecifik miljøvaredeklaration for Meyer Burger Technology. Som følge heraf vil analysens datagrundlag være utilstrækkeligt, hvis der alene inkluderes solceller, som i Crawford og Murphys analyse fremgår som ikke lavet med tvangsarbejde. Nærværende analyse tager derfor udgangspunkt i et bredt udsnit af de i dag tilgængelige solcelledata, og derfor kan det ikke udelukkes, at solceller, som

laves ved brug af tvangsarbejde, indgår i analysen. De solceller, som vi med sikkerhed ved, er lavet med tvangsarbejde, indgår ikke i nærværende rapport.

Københavns Kommune gennemfører aktuelt en indsats for at sikre, at der ikke på kommunens byggerier opsættes solceller, som er lavet med tvangsarbejde. Denne indsats er forankret i kommunens CSR-enhed og gennemføres i samarbejde med kommunens bygherreorganisation Byggeri København.

Analysen forholder sig ikke til selskabsdannelse, da beslutningen herom afventer indstilling til Københavns Kommunes Økonomiudvalg i februar 2024. Analysen forholder sig heller ikke til batteriløsninger, hvor solceller og batterier kombineres. Dette skyldes, at datagrundlaget for batterier er for smalt på nuværende tidspunkt.

## 4.2 Formål

Projektets hovedformål er at skabe et vidensgrundlag om solcelleteknologiens CO<sub>2</sub>-belastning og identificere potentialet for at minimere CO<sub>2</sub>-emissionerne fra Københavns Kommunes ejendomsportefølje.

Projektet har desuden til formål at skabe en forståelse for, hvordan forskellige solcellepaneler performer, identificere optimale driftsparametre for solcelleanlæg på Københavns Kommunes ejendomme og synliggøre, hvad konsekvensen af aspekter som solcelleorientering, hældning og monteringsløsninger er på den afledte CO<sub>2</sub>-udledning. Udover at generere viden og anbefalinger ønsker projektet at levere praktiske retningslinjer for implementering af solceller på Københavns Kommunes bygninger. Dette inkluderer at vurdere den miljømæssige og totaløkonomiske rentabilitet og tilbagebetalingstid for solcelleanlæg på forskellige bygningstyper. Dette vil give en klarere vejledning til fremtidige beslutninger om vedvarende energiproduktion, som kan overføres til Københavns Kommunes kommende tekniske bygherrestandard for solceller (TBS).

I sidste ende stræber projektet efter at bidrage til en mere klimavenlig fremtid for Københavns Kommune ved at give kommunen det rette vidensgrundlag til at udnytte brugen af solcelleteknologien bedst muligt i forhold til kommunens ejendomsportefølje og dermed fremme overgangen til vedvarende energi.

## 4.3 Læsevejledning

Rapporten er opbygget med en introduktion og efterfølgende afsnit om metode, analyser og resultater. Dette udmunder i en diskussion af de fremtidige potentialer og anbefalinger ifm. opsætning af solceller på kommunens bygninger.

Analysedelen indledes med et afsnit, der analyserer klimabelastningen fra et udvalg af solcellepaneler samt en analyse af de betydende installationsfaktorer, som f.eks. hældning og orientering.

Herefter gennemgås elforsynings udvikling og betydning for den klimamæssige effekt af solceller som elproducerende anlæg, hvorefter elforbruget på en skole, en daginstitution og en sportshal i

Københavns Kommune analyseres ift. den økonomiske og klimamæssige betydning af at opsætte solceller.

Til slut diskuteres mulige potentialer for CO<sub>2</sub>-reduktion ved etablering af solceller i Københavns Kommune, fremtidige udfordringer og anbefalinger samt hvilke dele af analysen, der kan overføres til Københavns Kommunes tekniske bygherrestandard om solceller (TBS).

## 5 Metode, afgrænsning og tilgang

Rapporten er opdelt i tre delanalyser, som har til formål at analysere solcellers CO<sub>2</sub>-belastning samt identificere og diskutere potentialer for reduktion af CO<sub>2</sub>-emissionerne fra kommunens egne bygninger. For at nå dette har projektet anvendt en metodologi, som er beskrevet i afsnit 5.1, afsnit 5.2 og afsnit 5.3.

- Delanalyse 1: Solcellers CO<sub>2</sub>-aftryk
- Delanalyse 2: Energiforsyning
- Delanalyse 3: Cases fra Københavns Kommune

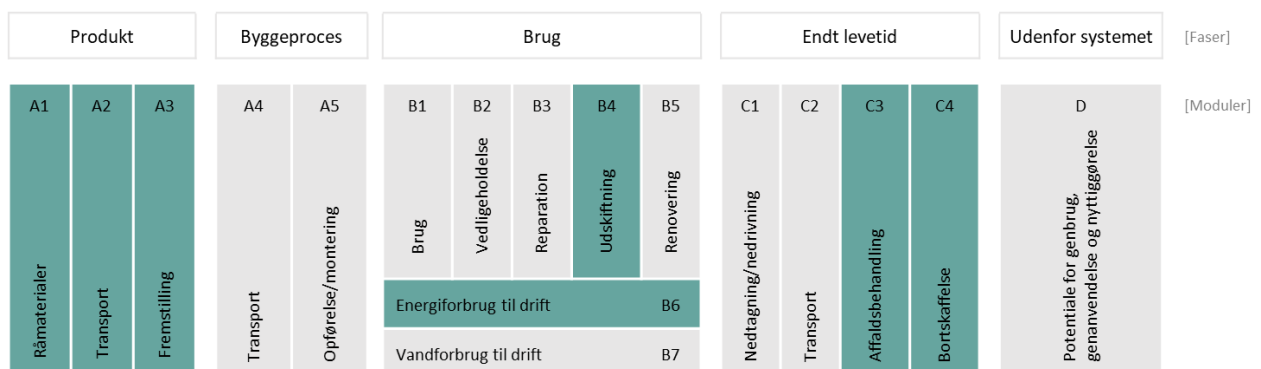
### 5.1 Delanalyse 1: Solcellers CO<sub>2</sub>-aftryk

Der er stor forskel på solceller, både når det kommer til deres produktivitet og CO<sub>2</sub>-aftrykket. Der er derfor foretaget en generisk analyse af solcellers CO<sub>2</sub>-aftryk for at kortlægge de faktorer, som har indvirkning på solcellernes CO<sub>2</sub>-aftryk. Analysen er ikke specificeret til en bestemt bygning, tagflade eller facade. Resultaterne af delanalyse 1 kan derfor betragtes i en bredere sammenhæng.

Analysen tager udgangspunkt i en livscyklustankegang, som flytter fokus fra forholdene omkring det færdige solcelleanlæg til at indebære hele solcelleanlæggets livscyklus. En livscyklusvurdering af bygninger indebærer normalt vurderinger tilhørende hele bygningens livscyklus. Dette betyder, at samtlige faser inkluderes i vurderingen – alt fra udvinding af ressourcer til fremstilling af byggevarer over byggeprocessen, brugsfasen i form af drift og vedligeholdelse, nedrivningen, og til materialerne bortskaffes eller genanvendes.

Livscyklusvurderingerne (LCA) i delanalyse 1 følger retningslinjerne fastlagt i standarden DS/EN 15978:2012 "Bæredygtighed inden for byggeri og anlæg - Vurdering af bygningers miljømæssige kvalitet – Beregningsmetode" (Dansk Standard, 2012). Standarden specificerer principper og struktur samt vejledning og krav til LCA.

Standarden opdeler en bygnings livscyklus i fem forskellige livscyklusfaser og 17 underliggende moduler. Dette udgør tilsammen hele bygningens livscyklus, hvor der både tages højde for forbrug af byggematerialer såvel som processer vedrørende driften af en bygning (driftsenergiforbrug og vandforbrug). De 17 faser fremgår af Figur 1.



Figur 1- Systemafgrænsning og livscyklusfaser i henhold til DS/EN 15978:2012. De grønne felter markerer faser indeholdt i delanalyse 1.

Da der på nuværende tidspunkt kun er tilgængelige miljødata på et udvalg af de 17 moduler, har det gældende bygningsreglement BR18 reduceret de faser, som medtages i LCA'en til produktion og transport af byggevarer (A1-3), udskiftning af bygningsdele (B4), driftsenergi (B6) og affaldsbehandling ved endt levetid (C3-4). Miljøgevinster eller belastninger ifm. genbrug/genanvendelse/materiale-nyttiggørelse af de bortskaffede materialer rapporteres separat i det næste produktsystem (fase D).

Ved delanalyse 1 sammenholdes solcellernes CO<sub>2</sub>-udledning ved en solcelleeffektivitet på 1 Watt Peak. De inkluderede faser er markeret med grøn i Figur 1.

Økonomisk er der også forskel på, hvilken solcelletype der investeres i. I analyserne indgår vejledende enhedspriser som et estimat til at vise en tendens.

### 5.1.1 Betragtningstidsperioden

Betragtningstidsperioden er et udtryk for den årrække, det antages, at bygningens driftsfase udgør, hvorefter nedrivningen starter. Den reelle levetid for en bygning kan være længere eller kortere end den anvendte betragtningstidsperiode. Betragtningstidsperioden har stor indflydelse på udskiftningen af byggevarer, da de byggevarer, der har kortere levetid end betragtningstidsperioden, skal udskiftes en eller flere gange i løbet af betragtningstidsperioden.

I det gældende bygningsreglement BR18 er betragtningstidsperioden fastlagt til 50 år i overensstemmelse med Level(s). Level(s) blev lanceret af Europakommissionen som en fælles europæisk ramme for måling og rapportering af bæredygtighed ved nybyggeri og gennemgribende renovering af boliger og kontorer. Delanalyse 1 tager udgangspunkt i en levetid på 50 år, jf. BR18.

### 5.1.2 Miljødata

Analysen er baseret på produktspecifikke miljøvaredeklarationer (Environmental Product Declarations, EPD'er) udarbejdet i overensstemmelse med standarderne EN 15804+A1 og EN 15804+A2 (Dansk Standard, 2019) eller PEP Ecopassport (P.E.P., 2023). PEP'er er EPD'er, der er produceret til elektrisk, elektronisk og HVAC-bygningsudstyr. De faser, der medregnes, er i overensstemmelse med EN 15804+A2. Det betyder, at de miljømæssige data og oplysninger, der bruges i analysen, er tredjepartsverificeret og baseret på standardiserede procedurer og retningslinjer.

De analyserede solcellepaneler er udvalgt på baggrund af tilgængelige EPD'er, som angivet i oversigten i Tabel 1 og uddybet i Bilag A.

### 5.1.3 Bedste, værste og gennemsnitlige scenarie

På baggrund af de undersøgte solceller fastlægges tre scenarier i afsnit 6.5 til videre analyse. Scenarierne afspejler hhv. et bedste, et værste og et gennemsnitligt scenarie for klimaaftryk og energieffektivitet. Det gennemsnitlige scenarie fastlægges på baggrund af medianen, mens bedste og værste scenarie fastlægges på baggrund af minimum- og maksimumværdier.

Tabel 1 – Oversigt over solceller, der indgår i analysen

Producent	Produkt	Materiale	Type	Levetid	EPD-standard	EPD
Bourgeois-Global	BGPV (BK) 460-MCSI	Monokrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	EN 15804+A1	BOUR-00002-V01.01
	BGPV (SL) 385-MCSI	Monokrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	EN 15804+A1	BOUR-00001-V01.01
DMEGC Solar	DM345 G1-60HBW	Monokrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	EN 15804+A1	DMEG-00001-V01.01
	DM345 G1-60HSW	Monokrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	EN 15804+A1	DMEG-00001-V01.01
Dualsun	M10-54 DS415-108M10-02	Monokrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	EN 15804+A1	DUAL-00001-V01.01
	M6-60 DS385-120M6-02-V	Monokrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	EN 15804+A1	DUAL-00002-V01.01
Edilians	Kit Tuile Photovoltaïque TPVS & TPVXL	Monokrystallinsk	Bygningsintegrerede (BIPV)	25 år	EN 15804+A1	EDIL-00002-V02.01
	Kit Tuile Photovoltaïque TPVS & TPVXL ROUGE	Monokrystallinsk	Bygningsintegrerede (BIPV)	25 år	EN 15804+A1	EDIL-00005-V01.01
	Système Tuile FAG 10 SOLAIRE	Monokrystallinsk	Bygningsintegrerede (BIPV)	25 år	EN 15804+A1	EDIL-00001-V02.02
	Système Tuile FAG10 SOLAIRE ROUGE	Monokrystallinsk	Bygningsintegrerede (BIPV)	25 år	EN 15804+A1	EDIL-00004-V01.01
Ennogie	Ennogie ERS-0191 (130W)	Monokrystallinsk	Bygningsintegrerede (BIPV)	25 år	EN 15804+A2	MD-23028
First Solar	Series 6	Monokrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	30 år	EN 15804+A1	NEPD-2993-1671
	Series 7	CIGS	Bygningsmonterede (BAPV)	30 år	EN 15804+A2	NEPD-5039-4377-EN
Midsummer	Bold	Tyndfilm	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	EN 15804+A2	S-P-06690
	Slim	Tyndfilm	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	EN 15804+A2	S-P-06691
	Wave	Tyndfilm	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	EN 15804+A2	S-P-06692
PhotoWatt	PW60LHT-C 355Wc	Polykrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	PEP	PHOT-00001-V01.01
	PW72LHT-C420Wc	Polykrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	PEP	PHOT-00003-V01.01
REC Solar	Alpha Pure	Monokrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	EN 15804+A2	NEPD-3420-2033
	Alpha-Pure R 430 Wc	Monokrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	PEP	RECS-00002-V01.01
	N-Peak 2	Monokrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	EN 15804+A2	NEPD-3422-2033
Sunpartner	Wysips Cameleon	Tyndfilm	Bygningsintegreret (BIPV)	30 år	EN 15804+A1	SUNP-00001-V01.01
SunStyle	Tuiles photovoltaïques Coloris Noir, structure de pose en bois	Monokrystallinsk	Bygningsintegrerede (BIPV)	30 år	EN 15804+A2	STIL-00001-V01.01
	Tuiles photovoltaïques Coloris Noir, structure de pose en acier	Monokrystallinsk	Bygningsintegrerede (BIPV)	30 år	EN 15804+A2	STIL-00002-V01.01
Systovi	R-Volt	Monokrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	EN 15804+A1	SYST-00002-V01.01
	V-Sys	Monokrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	EN 15804+A1	SYST-00001-V01.01
	V-Sys bas-carbone	Monokrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	EN 15804+A1	SYST-00003-V01.01
Viridian Solar	Clearline Fusion PV16	Monokrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	25 år	EN 15804+A2	S-P-06949
Voltec Solar	Tarka 126 VSBD	Monokrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	30 år	EN 15804+A1	VSOL-00004-V01.01
	TARKA VSMS format 60 cellules	Monokrystallinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	30 år	EN 15804+A1	VSOL-00001-V01.01



## 5.2 Delanalyse 2: Energiforsyningen i dag og i fremtiden

Solcellers økonomiske rentabilitet er bl.a. afhængig af elforsyningsens elpris ift. den strøm, solcellerne kan producere og evt. afsætte til elnettet. På samme måde er solcellernes klimamæssige rentabilitet afhængig af elnettets emissionsfaktor, som er et udtryk for klimabelastningen pr. kWh. Denne belastning varierer ligesom prisen over året, men også over døgnet, da den afspejler sammensætningen af produktionsformerne i elnettet.

For at vurdere solcelleproduktionens effekt på klimabelastningen anvendes i delanalyse 2, beskrevet i afsnit 7, historiske emissionsdata for el i perioden 2019-2022 (Energinet, 2023). De historiske emissionsdata bruges til at konstruere en gennemsnitlig timebaseret emissionsfaktor for el i Østdanmark. Disse data tager dog ikke hensyn til den indlejrede CO<sub>2</sub> i forsyningen, som f.eks. opførsel og vedligehold af de el-producerende anlæg. Derfor anvendes data fra "Emissionsfaktorer for el, fjernvarme og ledningsgas for 2025-2075" (Artelia, 2023) til at korrigere de timebaserede emissionsfaktorer for forsyningens indlejrede CO<sub>2</sub>. Til slut fremskrives de timebaserede emissionsfaktorer til 2075 ud fra Energestyrelsens forventninger til den grønne omstilling af elforsyningen.

## 5.3 Delanalyse 3: Cases fra Københavns Kommune

Med de markedsvilkår, der er i dag, skal man som hovedregel ikke producere mere el, end der forbruges. Det skyldes, at man i mange tilfælde enten skal betale for at komme af med strømmen på nettet eller får en så lav spotpris, at den spises op af transmissionsafgift. For at vælge den optimale solcelleløsning til en bygning er det afgørende at tage højde for flere faktorer, herunder bygningens energiforbrug på både daglig og årlig basis. Københavns Kommune forvalter en varieret ejendomsportefølje, herunder administrationsbygninger, kulturhuse, biblioteker, institutioner, plejehjem, skoler og idrætsanlæg. Hver af disse bygningstyper har unikke brugsprofiler og energiforbrugsmønstre, hvilket kræver individuelle tilgange til solcelleløsninger.

I denne analyse er det valgt at fokusere på tre specifikke bygninger i Københavns Kommune: Kirsebærhavens Skole (en eksisterende skole), Børnehuset Else (en nybygget daginstitution) og Hal C multihal (en nybygget sportshal). Hver af disse bygningstyper kræver en tilpasset solcelleløsning for at maksimere udnyttelsen af solenergi og optimere energiforsyningen. Ved at tage højde for det aktuelle energiforbrug for hver bygningstype kan vi opnå mere effektive og energirigtige løsninger, der sparer omkostninger og reducerer den miljømæssige påvirkning.

Der er i alt modtaget data på tre daginstitutioner, tre skoler og to sportshaller, og de tre udvalgte cases vurderes repræsentative for Københavns Kommunes bygningstypologi.

### 5.3.1 Energiforbrug

Analyserne i denne rapport bygger på det aktuelle energiforbrug for en toårig periode fra d. 01.08.2021 til 01.08.2023.

### 5.3.2 Energiproduktion

Solcellernes energiproduktion er beregnet ud fra solindstrålingen, som afhænger af solcellernes geografiske placering, orientering og hældning, solcellernes effektivitet, skyggefaktor og anlæggets systemvirkningsgrad. Smuds og anlæggets faldende effektivitet har også indvirkning på solcellernes

energiproduktion. Dette er dog ikke medtaget i nærværende studie, men bør medregnes ved projektering af solcelleanlæg. Solcellernes effektivitet ( $W_p$ ) er fastlagt iht. det gennemsnitlige scenarie i delanalyse 1.

Solindstrålingen varierer afhængigt af den geografiske placering. I denne rapport er den årlige solindstråling fastlagt baseret på vejrdata indhentet fra Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) (Danmarks Meteorologiske Institut, 2023).

Solceller er følsomme over for skygger, og markant skygge på selv mindre arealer kan få betydelig negativ effekt på elproduktionen. Tilsvarende er temperaturer afgørende for produktionen, hvor bl.a. dårlig eller manglende ventilation betyder en faldende produktion. I nærværende analyse er det derfor forudsat, at solcellerne er placeret uden skyggepåvirkning og med tilstrækkelig ventilation.

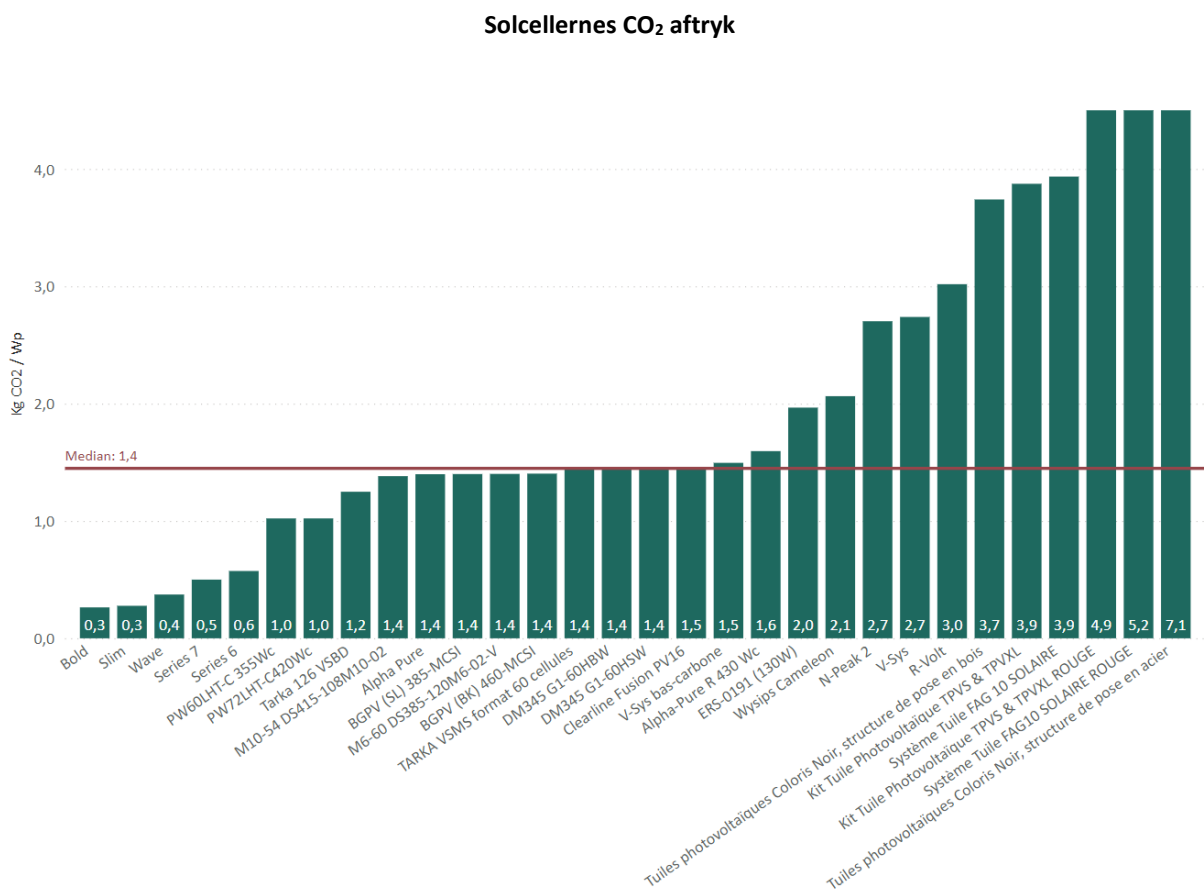
I delanalyse 3 indgår en forsimplet tilbagebetalingsbetragtning. Betragtningen inkluderer ikke eventuelle afgifter forbundet med anlægget. Tilsvarende er scenarierne optimeret med fokus på at fjerne overproduktion, hvorfor solgt el ikke indgår i betragtningen. Den beregnede tilbagebetalingstid i dette studie kan derfor ikke perspektiveres til andre studier eller projekter uden for dette studie.

## 6 Solcellers CO<sub>2</sub>-aftryk

Dette afsnit undersøger, hvordan væsentlige parametre påvirker CO<sub>2</sub>-aftrykket fra solceller. Analysen sigter mod at identificere retningslinjer og anbefalinger, der kan danne grundlag for fremtidige byggeprojekter i Københavns Kommune. Afsnittet præsenterer desuden de tre scenarier, der ligger til grund for delanalyse 3, hhv. et bedste, et værste og et gennemsnitligt scenarie.

Analysen er lavet på baggrund af produktspecifikke miljøvaredeklarerationer (EPD'er) fra 30 forskellige solcellepaneler. De udvalgte solceller er valgt på baggrund af tilgængelige EPD'er, som angivet i oversigten i Tabel 1 og uddybet i Bilag A. Solceller, der er undersøgt af Crawford & Murphy (Crawford & Murphy, 2023), og som ikke kan fremlægge godkendte forsyningsprofiler, dvs. at det ikke kan udelukkes, at de er lavet med tvangsarbejde, er fraevalgt i analysen.

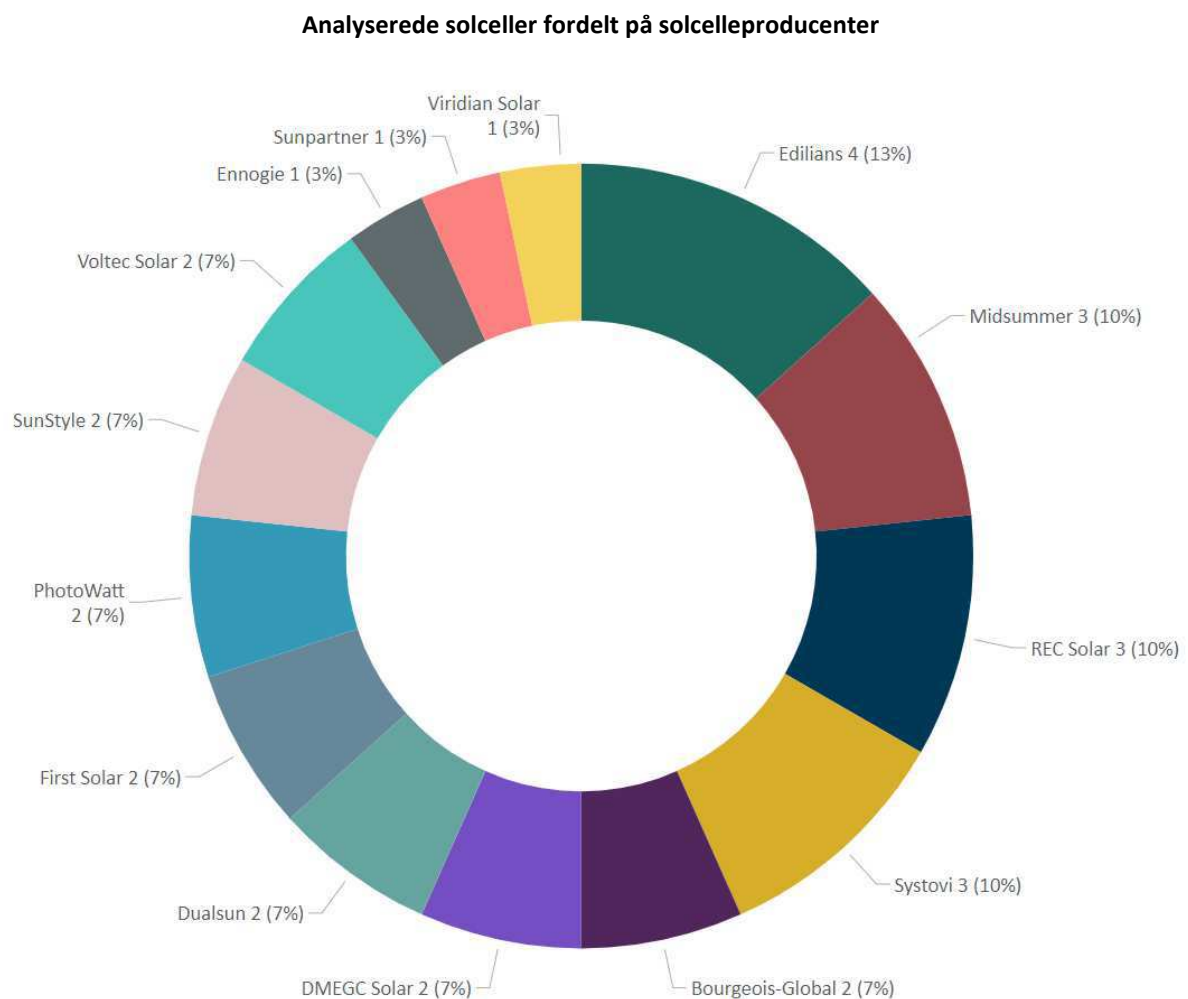
CO<sub>2</sub>-aftrykket fra solcellerne er beregnet i henhold til DS/EN 15978:2012 ved en solcelleeffektivitet på 1 Watt peak (Wp). I beregningen indgår produktion af solcellerne (fase A1-A3), udskiftning af solcellerne (fase B4) og endt levetid (fase C3-C4) for en betragtningsperiode på 50 år iht. beregningsmetoden for klimapåvirkningen beskrevet i det gældende bygningsreglement BR18 §297. Solcellen udskiftes til en tilsvarende solcelle. Det betyder, at der medregnes én udskiftning af solcellerne i år 25 eller år 30. Det beregnede CO<sub>2</sub>-aftryk fra de undersøgte solceller er vist i Figur 2.



Figur 2 CO<sub>2</sub>-aftryk fra de undersøgte solcellepaneler over en betragtningsperiode på 50 år. CO<sub>2</sub>-aftrykket er beregnet i henhold til DS/EN 15978:2012 med faserne A1-A3, B4 og C3-C4.

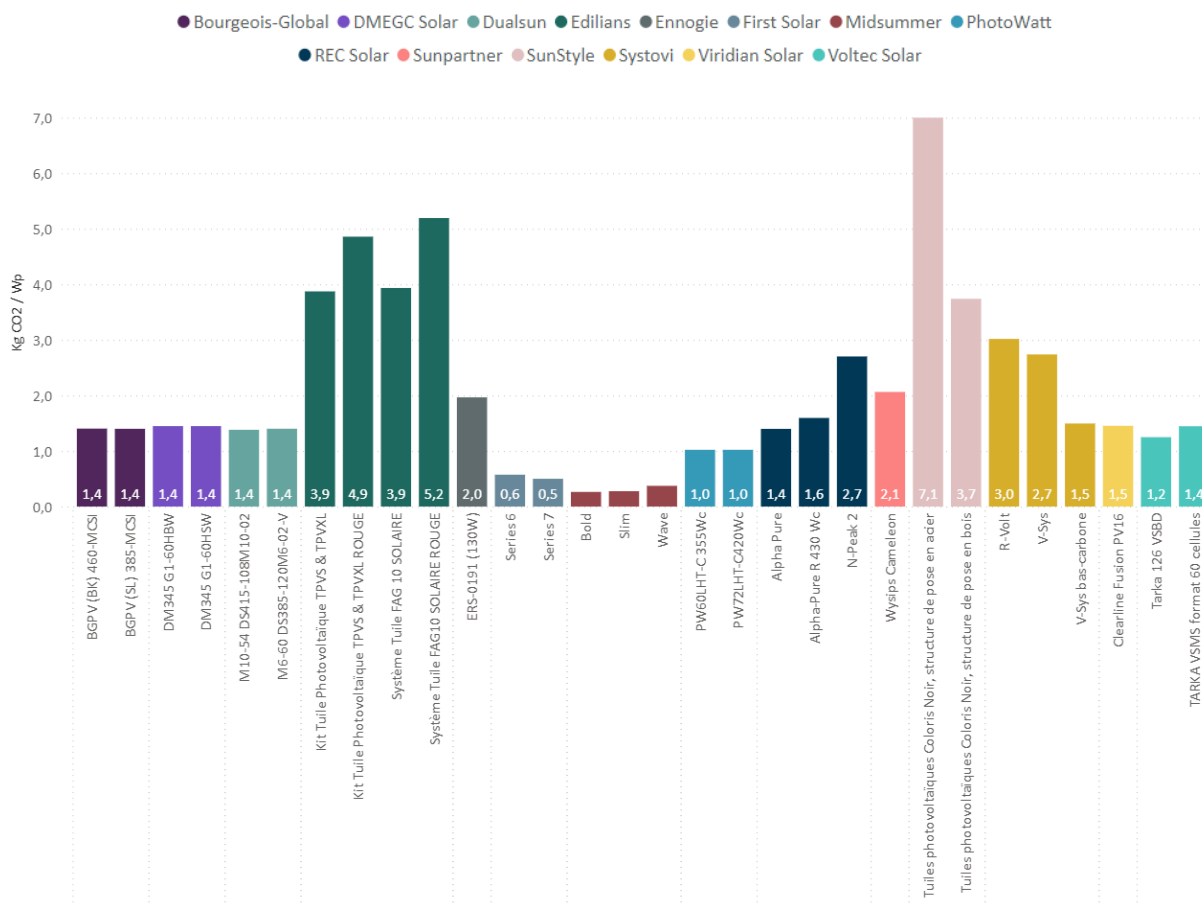
Som det fremgår af Figur 2, er der stor spredning i CO<sub>2</sub>-aftrykket blandt de undersøgte solceller. Solcellen med det laveste CO<sub>2</sub>-aftryk ligger på under 0,3 kg CO<sub>2</sub> pr. Watt peak, mens solcellen med det største CO<sub>2</sub>-aftryk ligger på 7,1 kg CO<sub>2</sub> pr. Watt peak pr. år. Medianen for de undersøgte solceller ligger på 1,4 kg CO<sub>2</sub> pr. Watt peak. Det er således ikke uvæsentligt, hvilken konkret solcelle der vælges. Dette uddybes nærmere i afsnit 6.1-6.4.

De valgte solcellepaneler er fremstillet af i alt 14 forskellige producenter. Fordelingen af de analyserede solcellepaneler efter producent er illustreret i Figur 3. Der er højst inddraget fire solcellepaneler (13 % af det samlede datagrundlag) fra hver producent. Af den grund vurderes analysen at have en betydelig diversitet med hensyn til de undersøgte solcelleproducenter.



Figur 3 Analyserede solceller fordelt på solcelleproducenter

CO<sub>2</sub>-aftrykket fra solcellepanelerne er præsenteret i Figur 4 og illustrerer markante variationer i udledningen på tværs af forskellige solcelleproducenter. Grafen afslører også betydelige forskelle i CO<sub>2</sub>-aftrykket mellem solcellepaneler fra den samme solcelleproducent.

CO<sub>2</sub>-aftryk fordelt på solcelleproducent

Figur 4 CO<sub>2</sub>-aftryk fra de undersøgte solcellepaneler over en betragtningsperiode på 50 år. Farven indikerer solcelleproducenten, som kategoriseret øverst. CO<sub>2</sub>-aftryk er beregnet i henhold til DS/EN 15978:2012 med faserne A1-A3, B4 og C3-C4.

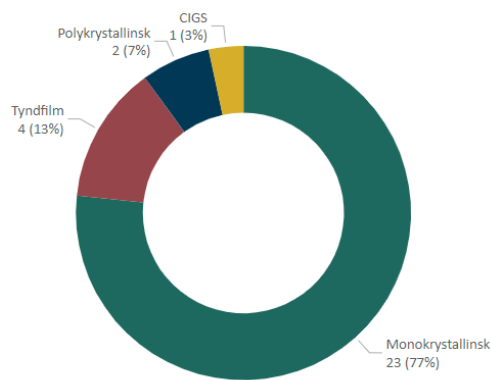
Af de undersøgte solceller har solcellerne fra Midsummer generelt det laveste CO<sub>2</sub>-aftryk. Solcellerne med de højeste CO<sub>2</sub>-aftryk kommer fra SunStyle og Edilians, mens solcellerne fra REC Solar ligger jævnt fordelt blandt de øvrige solceller. Det bør her nævnes, at solcellerne fra Midsummer er tyndfilmssolceller, som dels har et lavere CO<sub>2</sub>-aftryk end monokrystallinske, jf. afsnit 6.1, dels en lavere effekt, jf. afsnit 6.4.

I de følgende afsnit undersøges forskellige parametre for at kortlægge, hvordan disse påvirker solcellens CO<sub>2</sub>-aftryk. De undersøgte parametre omfatter blandt andet solcellematerialet, solcelletypen, levetiden, effektiviteten og monteringsløsningen.

## 6.1 Materiale

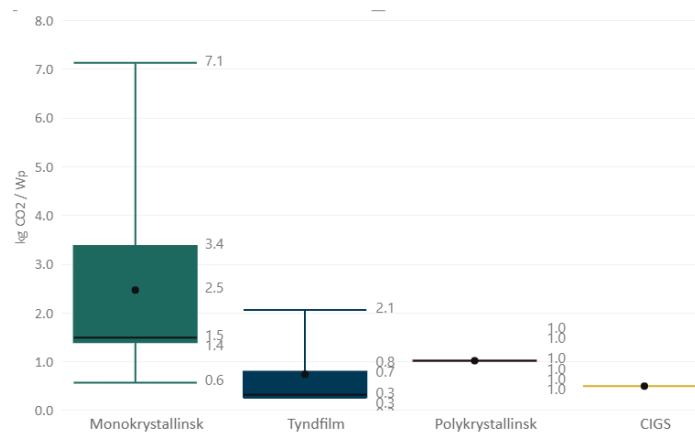
Overordnet kan solceller opdeles i tre primære materialer: monokrystallinske, polykrystallinske og tyndfilmssolceller. Monokrystallinske solceller fremstår oftest sorte og har en ensartet overflade. Det skyldes, at de består af én krystalstruktur, der peger i en bestemt retning. Polykrystallinske solceller adskiller sig særligt fra de monokrystallinske solceller ved, at solcellen består af en masse krystaller, der er støbt i en form og ligger i forskellige retninger. En helt anden tilgang findes i tyndfilmssolcellen, som er karakteriseret ved deres ekstremt tynde lag. De tidligste tyndfilmssolceller blev fremstillet ved hjælp af amorft silicium (a-Si). I nyere tid er der også kommet solceller baseret på materialer som kobber-indium-selen (CIS) og cadmium-tellurid (CdTe). De bruges i nogle tilfælde til bygnings-integrerede solceller. CIS-tyndfilmssolceller er en siliciumfri teknologi.

Materialefordelingen i datasættet



Figur 5 Analyserede solceller fordelt på solcellematerialet

CO<sub>2</sub>-aftryk fordelt på solcellematerialet



Figur 6 Boksplot over CO<sub>2</sub>-aftrykket fordelt på solcellematerialet

Tabel 2 CO<sub>2</sub>-aftrykket ifm. produktion, udskiftning og endt levetid fordelt på hhv. tyndfilm, CIGS, mono- og polykrystallinske solceller

CO <sub>2</sub> -aftryk (kg CO <sub>2</sub> / Wp)	Monokrystallinske	Polykrystallinske	Tyndfilm	CIGS
Minimum	0,6	1,0	0,3	0,5
Nedre kvartil (25 %)	1,4	1,0	0,3	0,5
Median	1,5	1,0	0,3	0,5
Øvre kvartil (75 %)	3,4	1,0	0,7	0,5
Maksimum	7,1	1,0	2,1	0,5
Gennemsnit	2,5	1,0	0,8	0,5

Som det ses af Figur 5, inkluderer analysen 23 monokrystallinske, to polykrystallinske og fire tyndfilmssolceller. Dette resulterer i en markant overrepræsentation af monokrystallinske solceller i forhold til polykrystallinske solceller og tyndfilmssolceller. Solcellernes CO<sub>2</sub>-aftryk fordelt på de tre materialekategorier er vist ved boksplottet i Figur 6 og opsummeret i Tabel 2. Det fremgår tydeligt, at tyndfilmssolcellerne generelt har det laveste CO<sub>2</sub>-aftryk med en median på 0,3 kg CO<sub>2</sub> pr. Watt peak. Til sammenligning har de polykrystallinske og monokrystallinske solceller samt CIGS-solceller en median på henholdsvis 1,0 kg CO<sub>2</sub> pr. Watt peak, 1,5 kg CO<sub>2</sub> pr. Watt peak og 0,5 kg CO<sub>2</sub> pr. Watt peak. Tilsvarende ses også af Figur 6, at der er et begrænset antal polykrystallinske solceller og CIGS-solceller i datasættet. Dette afspejles i spredningen. Spredningen for de monokrystallinske solceller er

markant større end spredningen for tyndfilmssolcellerne. I datasættet er der et monokrystallinsk solcellepanel med et CO<sub>2</sub>-aftryk helt nede på 0,6 kg CO<sub>2</sub> pr. Watt peak, mens et andet solcellepanel er helt oppe på 7,1 kg CO<sub>2</sub> pr. Watt peak.

Økonomisk er der også forskel på, hvilken solcelletype, der investeres i. Der vil altid være prisforskel mellem producenter af samme solcelletype, men som udgangspunkt kan priserne i Tabel 3 anvendes som et estimat til at vise en tendens. Således er tyndfilm generelt den dyreste type solceller, mens polykrystallinske solceller er ca. halvt så dyre. Tilsvarende har tyndfilm en lavere effektivitet pr. m<sup>2</sup> solcelle sammenholdt med de monokrystallinske og polykrystallinske solceller. Se afsnit 6.4 for uddybning af solcellernes effektivitet.

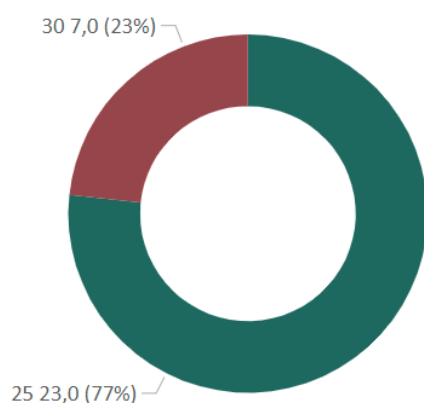
Tabel 3. Prisindikation fordelt på solcelletype

	Monokrystallinske	Polykrystallinske	Tyndfilm
Vejl. enhedspris pr. m <sup>2</sup>	1.800	1.300	900

## 6.2 Levetider

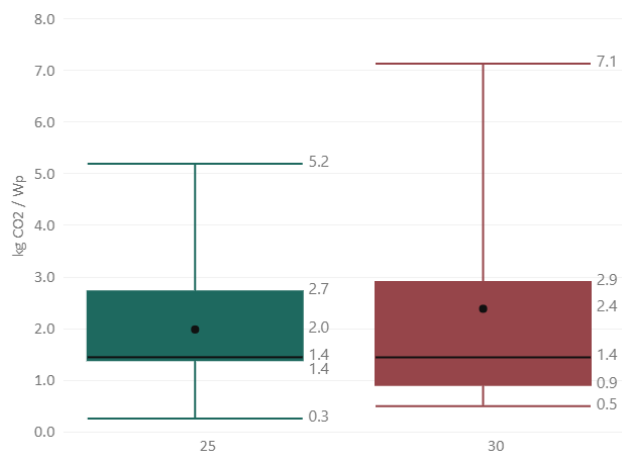
Levetiden af solcellepanelet ligger ofte på 25-30 år. Med nutidens teknologi kan det dog være, at anlægget kan producere strøm i endnu flere år. Når der kigges på solcellernes levetid, skal der dog også huskes, at effektiviteten falder, som tiden går. Solcellerne vil med andre ord ikke være i stand til at levere den samme mængde strøm ved samme solindstråling. Typisk regnes med, at effektiviteten falder med 0,5-1,0 % om året. Det anbefales, at solcellerne har en ydelse på mindst 85 % efter 20 år.

Fordelingen af levetider i datasættet



Figur 7 Analyserede solceller fordelt på deres levetid

CO<sub>2</sub>-aftryk fordelt på levetider



Figur 8 Boksplot over CO<sub>2</sub>-aftrykket fordelt på solcellens levetid

Tabel 4 CO<sub>2</sub>-aftrykket i forbindelse med produktion, udskiftning og endt levetid fordelt på hhv. 25 år og 30 år

CO <sub>2</sub> -aftryk (kg CO <sub>2</sub> / Wp)	Solceller med en levetid på 25 år	Solceller med en levetid på 30 år
Minimum	0,3	0,5
Nedre kvartil (25 %)	1,4	0,9
Median	1,4	1,4
Øvre kvartil (75 %)	2,7	2,9
Maksimum	5,2	7,1
Gennemsnit	2,0	2,4

Som det ses af Figur 7, inkluderer analysen 23 solceller (77 %) med en levetid på 25 år og syv solceller (23 %) med en levetid på 30 år. Størstedelen af datasættet har derfor en levetid på 25 år.

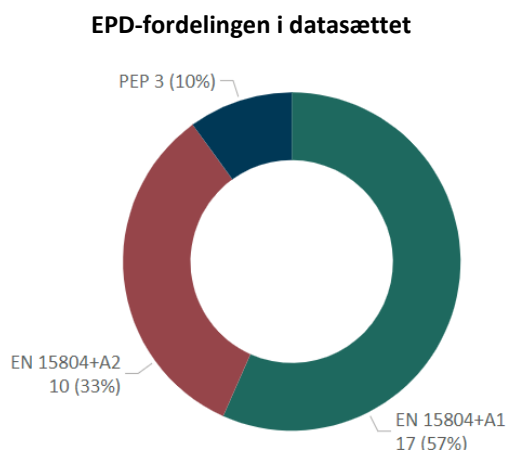
Solcellernes CO<sub>2</sub>-udledning i forbindelse med produktion, udskiftning og endt levetid fordelt på de to levetider fremgår af Figur 8 og opsummeres i Tabel 4. Heraf fremgår det, at medianen er tilnærmelsesvis ens for solcellerne med en levetid på 25 år og solcellerne med en levetid på 30 år. Baseret på det analyserede datagrundlag er solcellernes levetid ubetydelig for solcellernes CO<sub>2</sub>-aftryk. Sammenholdes boksplottet for de to levetider, ligger den øvre kvartil for solcellerne med en levetid på 30 år noget højere end solcellerne med en levetid på 25 år.

### 6.3 EPD-standard

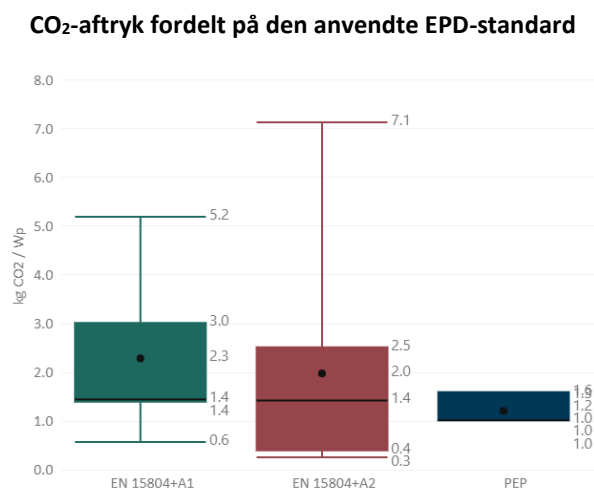
EPD-standardEN15804+A2 Bæredygtighed inden for byggeri og anlæg – Miljøvaredeklarationer – Grundlæggende regler for produktkategorien byggevarer (Dansk Standard, 2019) udkom 1. november 2019 og erstattede 15804+A1. I den nye standard (+A2) er der sket en stramning af minimumskravet til livscyklusfaser dækket i EPD'en samt til formidlingen af resultatet. Minimumskravet til livscyklusfaser ændres fra 'kun' at være faserne A1-A3 til også at inkludere fase C og fase D, der vedrører endt levetid samt potentialer i næste produktsystem. Inkludering af livscyklusstadier efter A3 (dvs. A4+A5, B1-B7, C1-C4, samt D) er efter den gamle udgave af standarden (EN 15804+A1) frivillig, og mange har derfor ikke taget dem med i deklARATIONERNE.

I analysen undersøges det, hvordan miljøvaredeklarationerne udført iht. EN 15804+A1 og EN 15804+A2 performer ift. PEP. Analysen tager udgangspunkt i en betragtningsperiode på 50 år, hvor der medregnes én udskiftning efter endt levetid.





Figur 9 Analyserede solceller fordelt på EPD-standarden

Figur 10 Boksplot over CO<sub>2</sub>-aftrykket fordelt på EPD-standardenTabel 5 CO<sub>2</sub>-aftrykket fordelt på hhv. EN 15801-A1, EN 15801-A og PEP

CO <sub>2</sub> -aftryk (kg CO <sub>2</sub> / Wp)	EN 15801-A1	EN 15801-A2	PEP
Minimum	0,6	0,3	1,0
Nedre kvartil (25 %)	1,4	0,4	1,0
Median	1,4	1,4	1,0
Øvre kvartil (75 %)	3,0	2,5	1,5
Maksimum	5,2	7,1	1,6
Gennemsnit	2,3	2,0	1,2

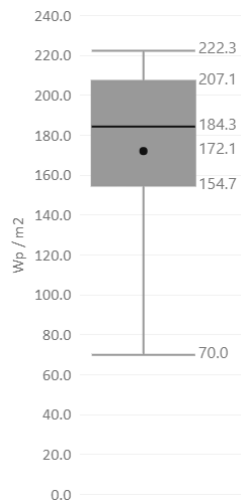
Som det fremgår af Figur 9 er der i analysen en overrepræsentation af EPD'er udført iht. EN 15801-A1. Datagrundlaget for analysen er baseret på 17 EPD'er (57 %), som er beregnet iht. EN 15801-A1, 10 EPD'er (33 %), som er beregnet iht. EN 15801-A2, og tre EPD'er (10 %), som er beregnet iht. PEP.

Solcellernes CO<sub>2</sub>-aftryk fordelt på de tre EPD-standarde fremgår af Figur 10 og opsummeres i Tabel 5. Heraf fremgår det, at medianen er tilnærmelsesvis ens for miljøvaredeklarationerne udført iht. EN 15801-A1 og EN 15801-A2. Medianen for PEP er smule lavere sammenlignet med de to øvrige standarder. Det vurderes derfor ikke at have stor betydning, om solcellernes EPD er udført iht. EN 15801-A1 eller EN 15801-A2.

#### 6.4 Effektivitet

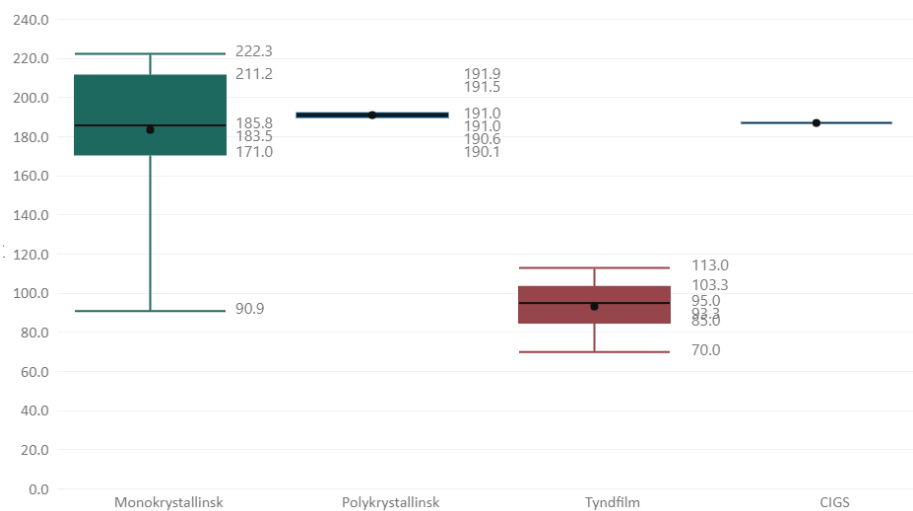
Når man sammenholder CO<sub>2</sub>-aftrykket fra solcellerne, er det vigtigt at tage højde for solcellernes effektivitet. Hvis solcellepanelet har en lav effektivitet, vil det kræve flere solcellepaneler for at opnå samme solcelleydelse sammenlignet med et panel med en høj effektivitet.

Effektivitet for hele datasættet



Figur 11 Bokplot over hele datasættets effektivitet

Effektivitet fordelt på solcellemateriale



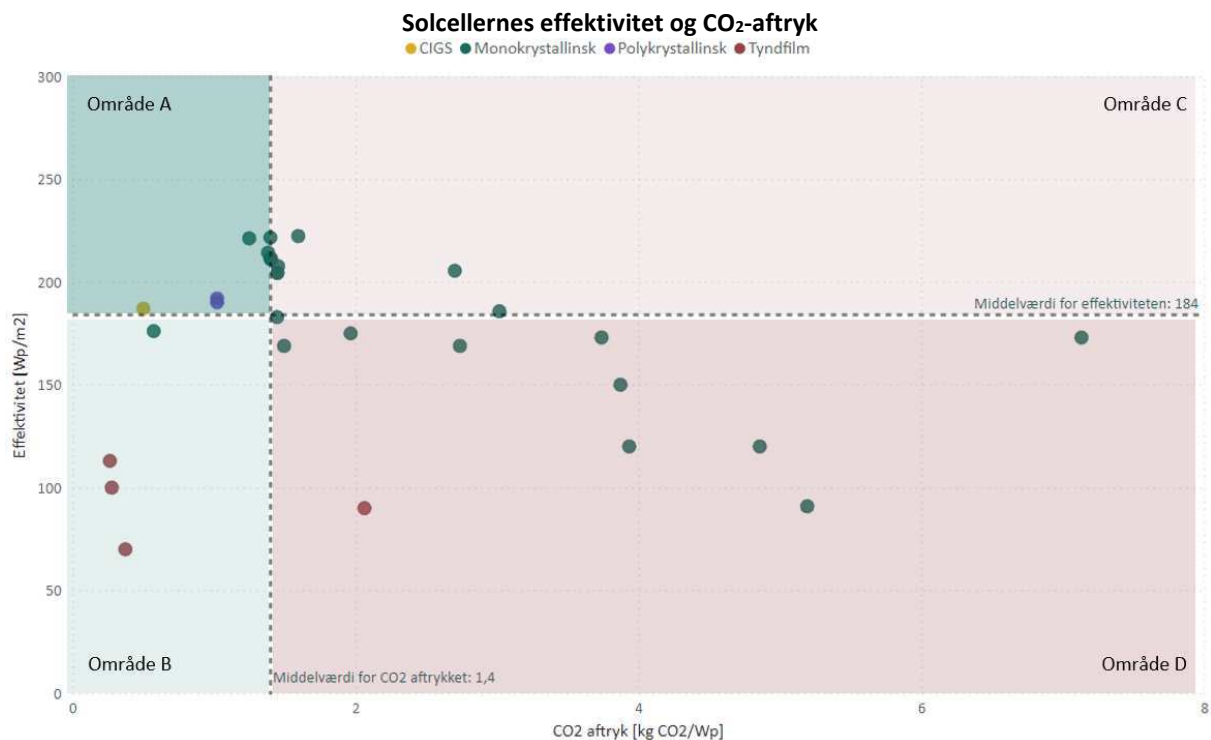
Figur 12 Bokplot over datasættets solcelleeffektivitet fordelt på materialet

Tabel 6 Solcellernes effektivitet fordelt på monokrystallinske, polykrystallinske og tyndfilmssolceller

Effektivitet (Wp /m <sup>2</sup> )	Hele datasættet	Monokrystallinske	Polykrystallinske	Tyndfilm	CIGS
Minimum	70,0	90,9	190,1	70,0	187,0
Nedre kvartil (25 %)	154,7	171,0	190,6	85,0	187,0
Median	184,3	185,8	191,0	95,0	187,0
Øvre kvartil (75 %)	207,1	211,2	191,5	103,3	187,0
Maksimum	222,3	222,3	191,9	113,0	187,0
Gennemsnit	172,1	183,5	191,0	93,3	187,0

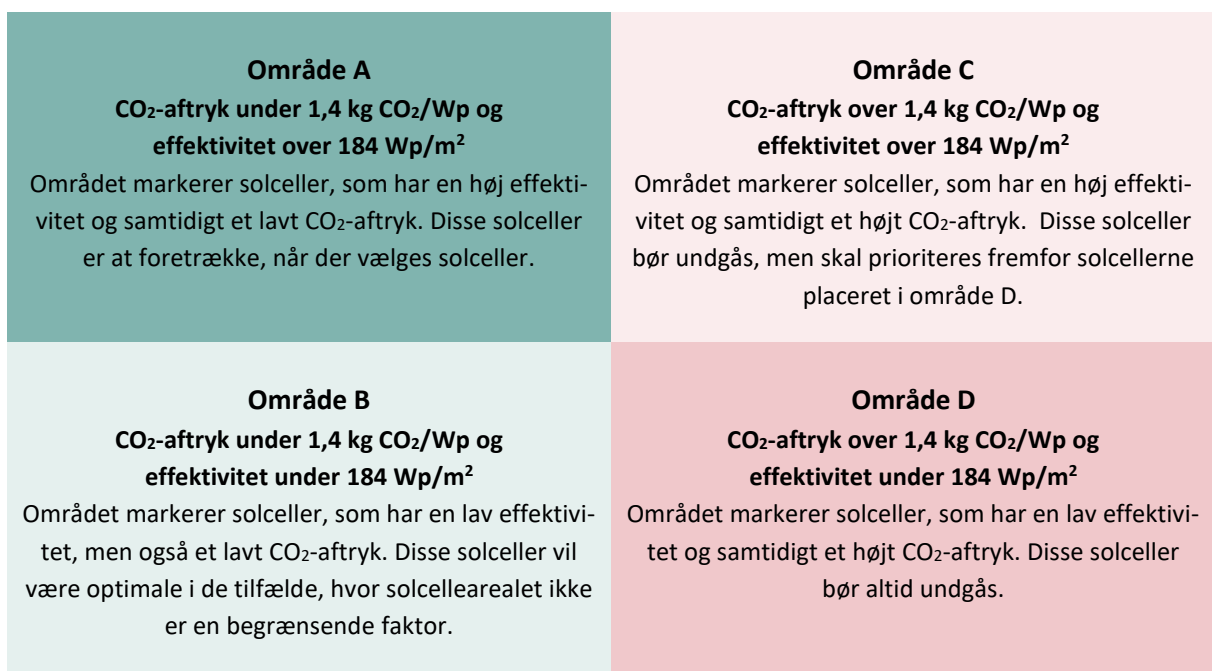
Spredningen i solcellernes effektivitet er vist i bokplottet i Figur 11. I Figur 12 er spredningen opdelt på monokrystallinske, polykrystallinske, tyndfilm- og CIGS-solceller. Resultaterne er opsummeret i Tabel 6.

Af bokplottene er det tydeligt, at der er en sammenhæng mellem solcellernes materiale og effektivitet. Af de fire typer er de monokrystallinske og polykrystallinske solceller samt CIGS-solceller de mest effektive. Spredningen for både de polykrystallinske solceller og CIGS-solcellerne er meget lille, hvilket skyldes et meget lille datagrundlag.



Figur 13 XY-diagram af de undersøgte solcellers effektivitet og CO<sub>2</sub>-aftryk. Grafen er opdelt i fire områder, som separeres af middelværdien for hhv. solcellernes effektivitet opgjort i Wp/m<sup>2</sup> og solcellernes CO<sub>2</sub>-aftryk opgjort i kg CO<sub>2</sub>/Wp.

I figur 15, hvor de undersøgte solceller illustreres i et XY-diagram på baggrund af solcellernes effektivitet og CO<sub>2</sub>-aftryk, fremstår fire områder. Områderne er opdelt i to på y-aksen ud fra middelværdien for solcellernes effektivitet. På x-aksen er området opdelt i to efter middelværdien for solcellernes CO<sub>2</sub>-aftryk, fastlagt i Figur 2. De fire områder kan beskrives som vist i Figur 14.



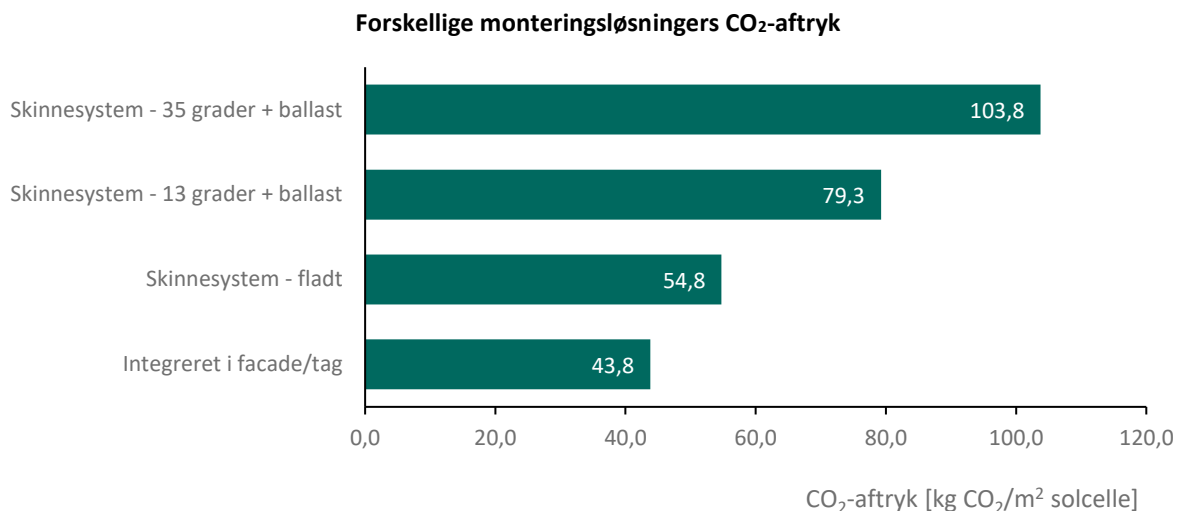
Figur 14 Solcelleområder

## 6.5 Monteringsløsninger

Når man kigger på solcelleanlæggets samlede CO<sub>2</sub>-aftryk, er det af afgørende betydning også at kigge på solcellernes monteringsystem. Der er mange forskellige montagesystemer, også når det gælder montage af systemer, som følger tagfladen. Det reelle CO<sub>2</sub>-aftryk fra monteringsløsningen vil derfor afhænge af tagfladens udformning og materialitet. I dette afsnit undersøges CO<sub>2</sub>-aftrykket ud fra en række generelle forudsætninger ved fire forskellige monteringsløsninger:

- Integreret i facade/tag ved varierende vinkel
- Skinnesystem med en vinkel på 0 grader
- Skinnesystem med en vinkel på 13 grader (øst/vestvendt)
- Skinnesystem med en vinkel på 35 grader (sydvendt).

Monteringsløsningernes CO<sub>2</sub>-aftryk fremgår af Figur 15, mens de medregnede mængder fremgår af Tabel 7. I de undersøgte skinnesystemer er der medregnet systemer med gennemgående skinner. For skinnesystemerne med en vinkel på 13 grader og 35 grader er der medregnet ballast. Selve solcellen indgår ikke i vurderingen.



Figur 15 CO<sub>2</sub>-aftrykket ved forskellige monteringsløsninger opgjort pr. m<sup>2</sup> solcelle

Tabel 7 Medregnede mængder ved de respektive monteringsløsninger

Konstruktion	Integreret i tag/facade	Skinnesystem 0°	Skinnesystem 13°	Skinnesystem 35°
Skinnesystem	2 kg	2,5 kg	3,5 kg	4,5 kg
Ballast	-	-	10 kg	20 kg

Som det fremgår af grafen i Figur 15, har den facade-/tagintegrerede løsning det laveste CO<sub>2</sub>-aftryk af de undersøgte scenarier. Scenariet med det højeste aftryk er skinnesystemet med en hældning på 35 grader, hvilket skyldes den store mængde aluminium til stativ og skinne. Der er dog meget stor forskel på vægt/system alt efter, hvorledes man ønsker at fastgøre systemet, tagfladens materialitet samt vinklen på taghældningen. Den aktuelle løsning i et projekt bør derfor altid undersøges ift. det miljømæssige aftryk.

I Tabel 8 er en prisindikation på de forskellige monteringsløsninger angivet, og som det kan ses, er det markant dyrere at montere solceller på et skinnesystem med en vinkel på 35 grader (sydvendt) frem for at montere solcellerne fladt på tag eller integreret i taget/facaden.

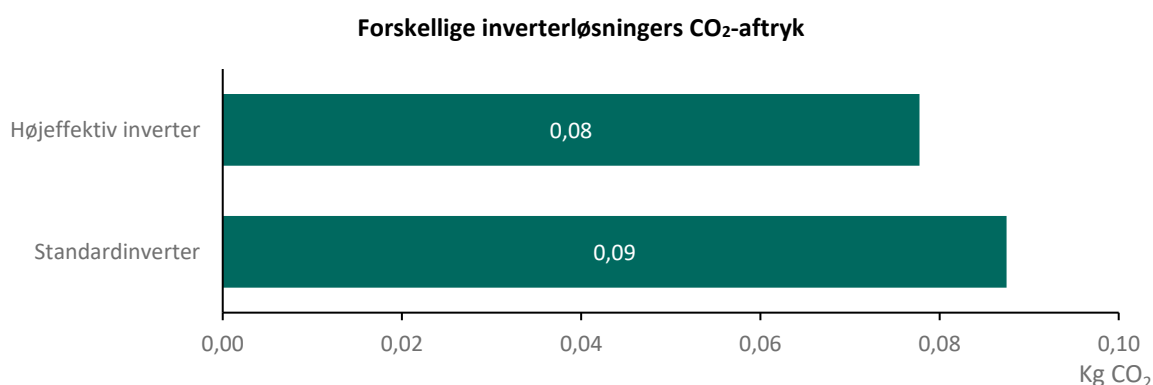
Tabel 8. Prisindikation af nutidsværdien fordelt på monteringsløsning

	Integreret i tag/facade	Skinnesystem 0°	Skinnesystem 13°	Skinnesystem 35°
Vejl. enhedspris pr. m <sup>2</sup>	160	200	280	360

## 6.6 Invertereffektivitet

Invertere til solcelleanlægget vælges efter størrelsen på solcelleanlægget. I forhold til det samlede solcelleanlægs elproduktion, og dermed det nødvendige solcelleareal, har virkningsgraden af anlæggets inverter en stor betydning. En standardinverter har en virkningsgrad på min. 80 %, mens en højeffektiv inverter har en virkningsgrad på ca. 90 %.

Denne forskel i virkningsgrad betyder, at der ved den samme ønskede effekt skal anvendes et 15 % større solcelleareal, hvis der vælges en standardinverter frem for en højeffektiv inverter. Som eksempel skal der således ved et anlæg med en ønsket effekt på 50 kWp installeres et anlæg, der kan levere 62,5 kWp med en standardinverter og 55,6 kWp med en højeffektiv inverter. Hverken solcellen eller ophængningssystemet indgår i vurderingen.



Figur 16 CO<sub>2</sub> aftrykket ved standardinverter (virkningsgrad = 75%) og en højeffektiv inverter (virkningsgrad = 90%)

Af Figur 16 ses, at der er en potentiel CO<sub>2</sub>-besparelse på 11% fra solcellepanelerne ved at vælge en højeffektiv inverter fremfor en standardinverter. Den procentvise CO<sub>2</sub>-besparelse afhænger ligeledes af monteringsløsningen og skyggepåvirkningen.

I Tabel 9 er en prisindikation på de to typer invertere angivet, og som det kan ses, er det dyrere at investere i en højeffektiv inverter, som dog kan reducere det nødvendige solcelleareal.

Tabel 9. Prisindikation fordelt på inverter effektivitet

	Standard inverter	Højeffektiv inverter
Vejl. Enhedspris pr. m <sup>2</sup>	400	600

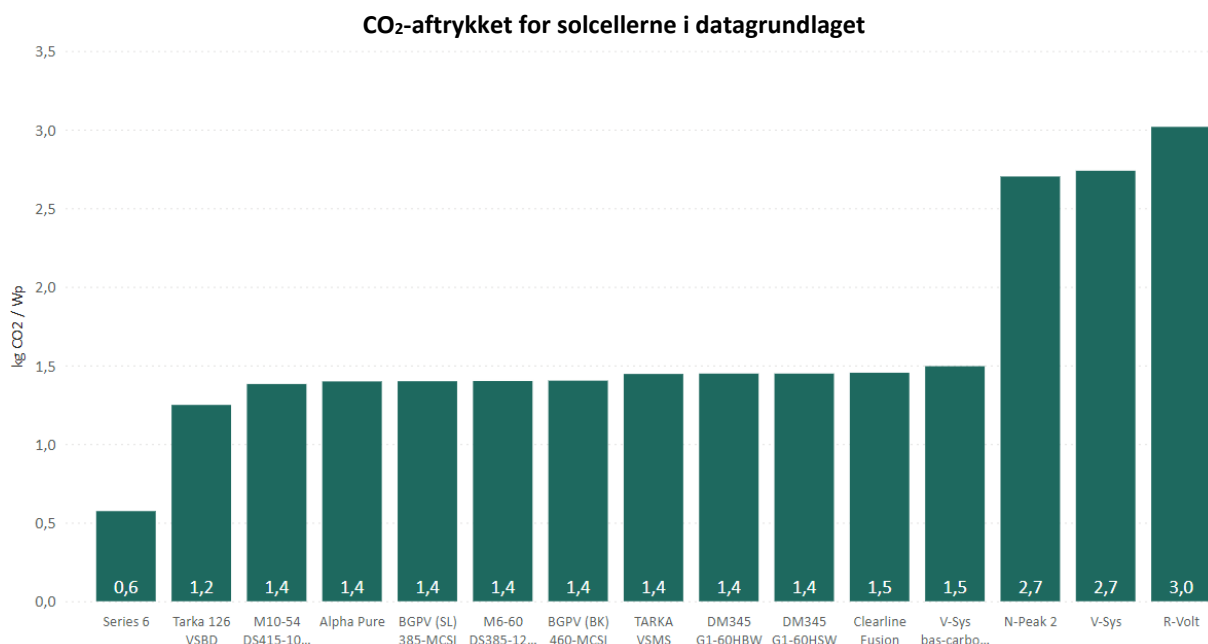
## 6.7 Fastlæggelse af bedste, værste og gennemsnitlige scenarie

I henhold til de udførte analyser i afsnit 6.1-6.4 opstår der en række væsentlige overvejelser ved fastlæggelsen af det bedste, værste og gennemsnitlige scenarie for solcellernes klimaaftryk og energieffektivitet. Som det fremgår af afsnit 6.1, er tyndfilmssolcellerne klart de mest miljøvenlige med en median på 0,3 kg CO<sub>2</sub> pr. Watt peak sammenholdt med poly- og monokrystallinske på hhv. 1,0 kg CO<sub>2</sub> pr. Watt peak og 1,5 kg CO<sub>2</sub> pr. Watt peak. Til gengæld viste analysen i afsnit 6.4, at tyndfilmsolcellernes effektivitet er omkring halvdelen af effektiviteten for hhv. poly- og monokrystallinske solceller. På grund af udfordringerne med at identificere tilstrækkelige solcellearealer på Københavns Kommunes ejendomme fravælges tyndfilmssolceller i denne analyse som en mulighed i fastlæggelsen af de tre scenarier. I dette studie giver det mening at have fokus på de bygningsmonterede solceller, da det er den type, der anvendes mest i Københavns Kommune. Derfor udelades de bygningsintegrerede solceller ved fastlæggelse af scenarierne.

Ud over disse parametre er det væsentligt at overveje, om solcellerne er fremstillet under etisk accepterede forhold som f.eks. uden brug af tvangsarbejde. Ifølge data præsenteret af Crawford & Murphy (Crawford & Murphy, 2023), er der kun to af de undersøgte virksomheder med godkendte forsyningskædeprofiler i denne sammenhæng, nemlig Meyer Burger Technology og REC Group N-PEAK and Alpha. Der findes ikke tilstrækkelige produktspecifikke miljøvaredeklarationer for Meyer Burger Technology. Som følge heraf vil analysens datagrundlag være utilstrækkeligt, hvis der alene inkluderes solceller godkendt i Crawford og Murphys analyse.

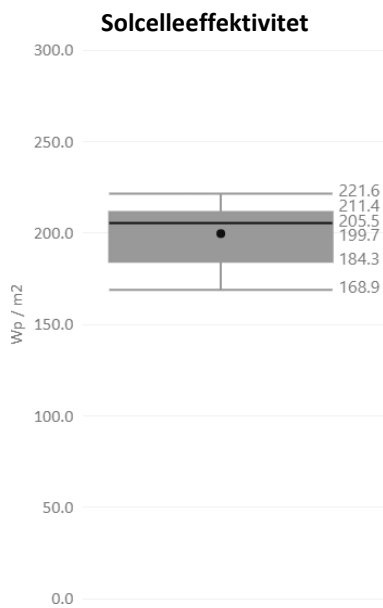
Endelig vurderes den anvendte EPD-standard og levetid for solcellepanelerne som mindre afgørende parameter i fastlæggelsen af de tre scenarier iht. afsnit 6.2 og afsnit 6.3.

Baseret på ovenstående afgrænsning danner 15 miljøvaredeklarationer grundlaget for fastlæggelsen af det bedste, det værste og det gennemsnitlige scenarie. De 15 solcellepaneler fremgår af Figur 17. Datagrundlaget bygger på 19 påmonterede (BAPV) monokrystallinske solceller.

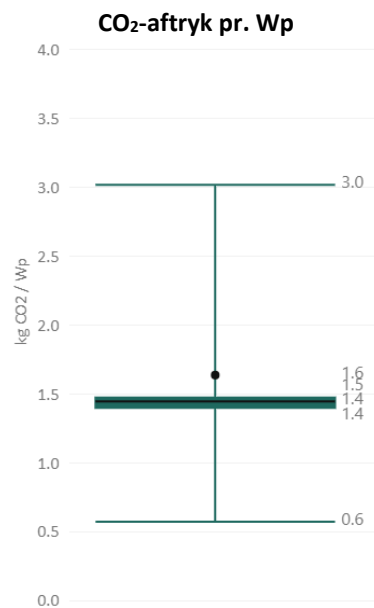


Figur 17 Datagrundlaget for fastlæggelsen af det bedste, værste og gennemsnitlige scenarie. Datagrundlaget bygger på 15 påmonterede (BAPV) monokrystallinske solceller.

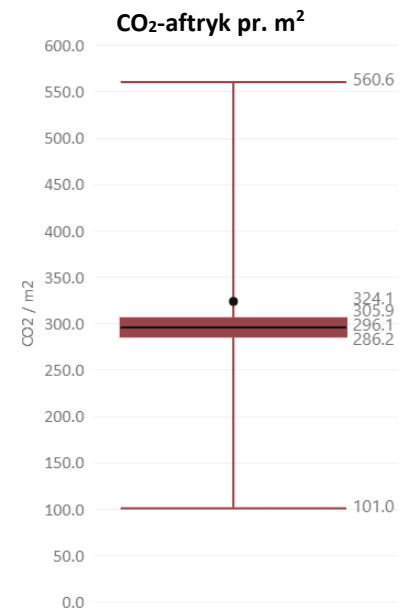
Fordelingen af de undersøgte solcellers CO<sub>2</sub>-aftryk og effektivitet fremgår af boksplottene i Figur 18, Figur 19 og Figur 20. Generelt ses der en stor spredning i solcellernes CO<sub>2</sub>-aftryk, hvilket medfører, at bedste og værste scenarie har en vis usikkerhed. Spredningen af solcellernes effektivitet udgør en mindre del, hvorfor sikkerheden her er noget større. På baggrund af boksplottene fastlægges der et gennemsnitligt scenarie for solcellernes effektivitet på 205,5 Wp/m<sup>2</sup>. Tilsvarende fastlægges der et gennemsnitligt scenarie for solcellernes CO<sub>2</sub>-aftryk pr. Wp på 1,4 kg CO<sub>2</sub> / Wp og CO<sub>2</sub> aftryk pr. m<sup>2</sup> på 296,1 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.



Figur 18 Boksplot over effektivitet pr. m<sup>2</sup>



Figur 19 Boksplot over CO<sub>2</sub>-aftryk pr. Wp



Figur 20 Boksplot over CO<sub>2</sub>-aftryk pr. m<sup>2</sup>

Tabel 10 Bedste, værste og gennemsnitligt scenarie for de undersøgte solcellers effektivitet

Effektivitet (Wp / m <sup>2</sup> )	
Bedste scenarie	221,6
Gennemsnitligt scenarie	205,5
Værste scenarie	168,9

Tabel 11 Bedste, værste og gennemsnitligt scenarie for de undersøgte solcellers CO<sub>2</sub>-aftryk

CO <sub>2</sub> -aftryk (kg CO <sub>2</sub> / Wp)	
Bedste scenarie	0,6
Gennemsnitligt scenarie	1,4
Værste scenarie	3,0

Tabel 12 Bedste, værste og gennemsnitligt scenarie for de undersøgte solcellers CO<sub>2</sub>-aftryk pr. m<sup>2</sup>

CO <sub>2</sub> -aftryk (kg CO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup> )	
Bedste scenarie	101,0
Gennemsnitligt scenarie	296,1
Værste scenarie	560,6

## 7 Energiforsyningen

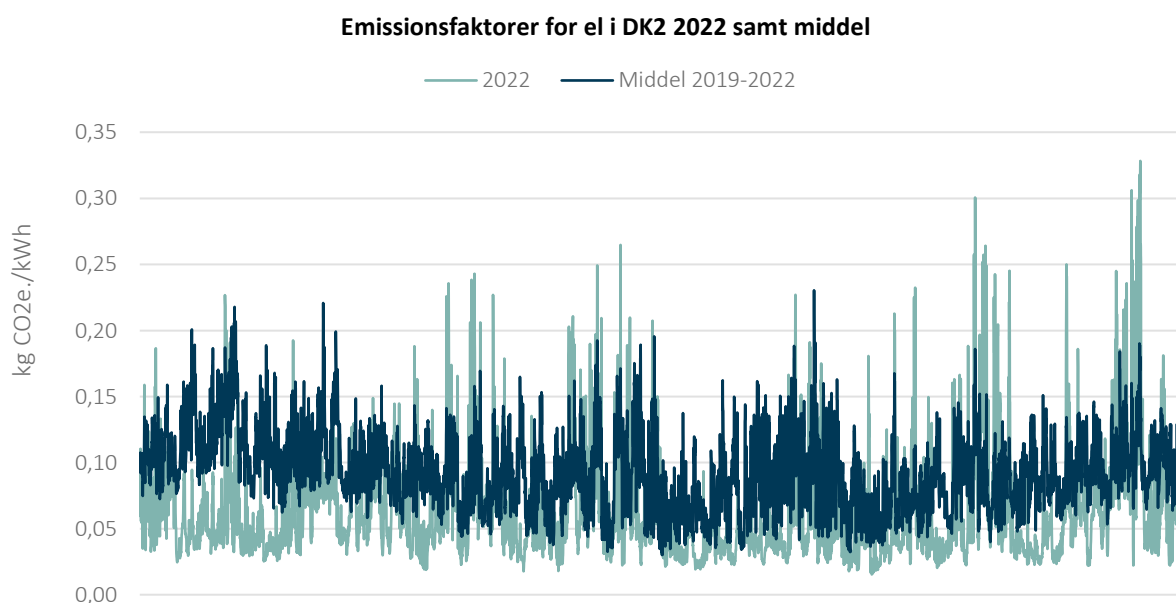
Solcellers økonomiske rentabilitet afhænger af bl.a. elforsyningens elpris ift. den strøm, solcellerne kan producere og evt. afsætte til elnettet. På samme måde er solcellernes klimamæssige rentabilitet afhængig af elnettets emissionsfaktor, som er et udtryk for klimabelastningen pr. kWh. Denne belastning varierer ligesom prisen over året, men også over døgnet, da den afspejler sammensætningen af produktionsformer i elnettet. Eksempelvis vil emissionsfaktoren være lav ved en høj grad af elproduktion med vedvarende energikilder som vindmøller og solceller, mens emissionsfaktoren vil være høj, når der produceres el vha. fossile brændsler som kul og naturgas.

### 7.1 Energiforsyningen i Danmark i dag

I Danmark er strømforsyningen en del af et større netværk, som sikrer, at elproduktionen er afbalanceret med elforbruget. Således importeres og eksporteres el fra nabolande som Tyskland, Holland, Sverige og Norge, og den strøm, som løber i de danske elkabler, er således et miks af produktionsformer på tværs af landegrænser (Artelia, 2023). På grund af elnettets opbygning og det ledningstab, der er i elkablerne, er der en grænse for, hvor langt strømmen transporteres. Dette betyder, at Danmark på trods af den beskedne geografiske udstrækning er opdelt i to zoner: DK1, som repræsenterer Vestdanmark (Jylland og Fyn), og DK2, som repræsenterer Østdanmark (Sjælland og Bornholm).

Selvom der findes en gennemsnitlig emissionsfaktor for Danmark som helhed, betyder opdelingen af elnettet i DK1 og DK2, at både pris og emissionsfaktorer er forskellige på tværs af Storebælt, og for solceller opsat i Københavns Kommune er det således mest relevant at sammenholde den producerede strøm med data fra DK2.

Da emissionsfaktoren som nævnt er afhængig af forhold som vind og vejr, produktionsform og handel med udlandet, varierer emissionsfaktorer over et år fra tæt på 0 g CO<sub>2</sub>/kWh til over 300 g CO<sub>2</sub>/kWh. I nedenstående figur 23 er emissionsfaktorer for DK2 illustreret for hver time i 2022 samt som et gennemsnit pr. time for årene 2019-2022.



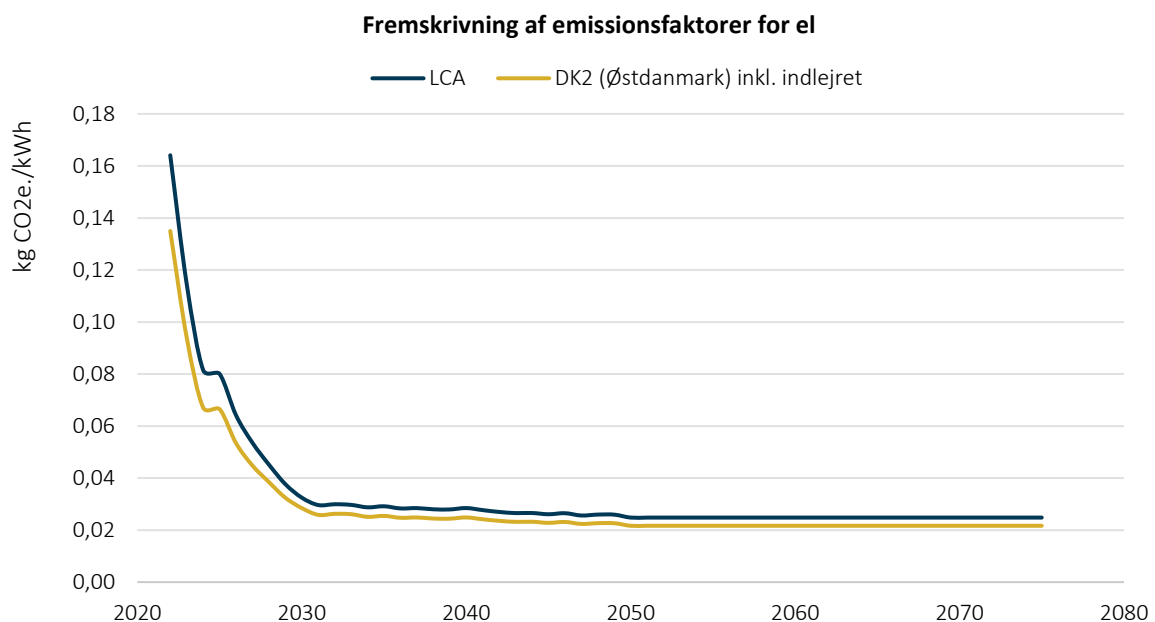
Figur 21. Emissionsfaktor for el i DK2 2022 samt middel for perioden 2019-2022



## 7.2 Energiforsyningen i Danmark i fremtiden

Ovenstående opgørelsesmetode er et udtryk for de rene emissioner fra strømmen i elnettet, men metoden tager ikke højde for, at elnettet udbygges og vedligeholdes, og for transport af brændsler mv. Disse aktiviteter sker alle med en indlejret CO<sub>2</sub>-omkostning, som bør indregnes i forbindelse med beregninger af solcelleanlægs klimamæssige tilbagebetalingstid. Indlejret CO<sub>2</sub> i energiforsyningen medregnes normalt også ved LCA-beregninger på bygningsniveau. For at tage højde for dette er den timebaserede emission tillagt en værdi for den indlejlrede del af forsyningens klimabelastning.

I tillæg til dette er emissionsfaktorerne (middel for 2019-2022) fremskrevet over 50 år baseret på Energistyrelsens forventninger til sammensætningen af fremtidens elproduktion. Nedenstående figur viser den gennemsnitlige emissionsfaktor pr. år for perioden 2022-2075 for både den generelle emissionsfaktor anvendt i Bygnings-LCA iht. Bygningsreglementet og den timebaserede emissionsfaktor for DK2. Som det ses, er klimabelastningen fra 1 kWh el i DK2 lidt lavere end landsgennemsnittet.



Figur 22. Fremskrivning af emissionsfaktoren for el 2022-2075

## 7.3 Solcellers klimamæssig tilbagebetalingstid

De fremskrevne emissionsfaktorer kan anvendes til at vurdere solcellers klimamæssige rentabilitet og miljømæssige tilbagebetalingstid. Når solcellerne producerer strøm, kan strømmen enten bruges direkte i f.eks. en bygning eller sendes ud på nettet. Fælles er dog, at solcellestrømmen substituerer den strøm, man ellers ville have købt, med grøn strøm.

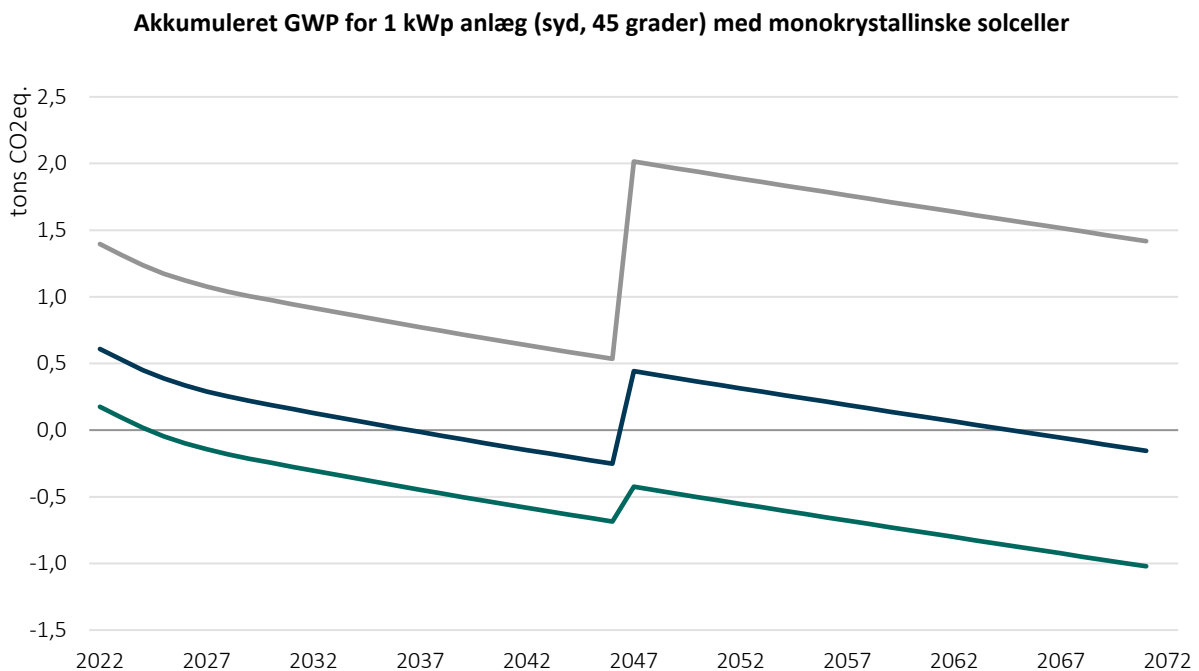
Fordi der regnes over 50 år, og alle solceller har en levetid på enten 25 eller 30 år, er det nødvendigt at udskifte solcellerne i løbet af betragtningsperioden. Over årene reduceres solcellernes effektivitet, ligesom emissionsfaktorerne gradvist bliver lavere. Derfor er det vigtigt at være opmærksom på, hvornår udskiftningen af solcellerne sker, og hvilke data de kommende solceller har.

I nedenstående tabel er klimabelastningen for de tre valgte scenarier angivet for solcellernes levetid i modsætning til delanalyse 1 med Tabel 10 og Tabel 12, hvor klimabelastningen er summeret for 50 år.

Tabel 13. Beregningsforudsætninger for fastlagte scenarier

Monokrystallinske solceller	CO <sub>2</sub> -aftryk kg CO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>	Effektivitet Wp/m <sup>2</sup>	Arealforbrug m <sup>2</sup> /kWp
Bedste scenarie	51	176	5,7
Gennemsnitligt scenarie	148	206	4,9
Værste scenarie	280	186	5,4

Baseret på disse data er den klimamæssige rentabilitet for et solcelleanlæg med en kapacitet på 1 kWp beregnet for de tre scenarier og illustreret i Figur 23. Solcellerne i de tre scenarier er forudsat en levetid på 25 år med start 2023 og en årlig reduktion i effekt på 0,25 %. Levetiden er fastsat til 25 år, da det repræsenterer størstedelen af de undersøgte solceller, se afsnit 6.7.



Figur 23. Akkumuleret GWP for 1 kWp anlæg med monokrystallinske solceller orienteret mod syd i en hældning på 45 grader, 50 år.

Som det ses af Figur 23, har det bedste scenarie en klimamæssig tilbagebetalingstid på tre år ved en orientering mod syd og en hældning på 45 grader, mens det gennemsnitlige scenarie har en miljømæssig tilbagebetalingstid på 15 år ved en orientering mod syd og en hældning på 45 grader. Efter 25 år udskiftes solcellerne, men samlet set efter 50 år har det bedste og gennemsnitlige scenarie været en klimamæssig gevinst for planeten ved en orientering mod syd og en hældning på 45 grader. I modsætning til dette betaler det værste scenarie sig aldrig hjem i en klimamæssig kontekst ved en orientering mod syd og en hældning på 45 grader.

Analysen er som beskrevet regnet for et anlæg med en kapacitet på 1 kWp, men resultatet er det samme uanset anlæggets kapacitet, da produceret og substitueret el er lineært sammenhængende.

### 7.4 Solcellers klimamæssige tilbagebetalingstid som funktion af orientering og hældning

Solcellens akkumulerede klimabelastning efter 25 år og dermed solcellens miljømæssige tilbagebetalingstid vil afhænge af solcellens orientering og hældning. Solcellens akkumulerede klimabelastning efter 25 år som funktion af orientering og hældning er vist i Tabel 14 for det gennemsnitlige scenarie, Tabel 16 for det bedste scenarie og Tabel 18 for det værste scenarie.

Solcellens miljømæssige tilbagebetalingstid som funktion af orientering og hældning er vist i Tabel 15 for det gennemsnitlige scenarie, Tabel 17 for det bedste scenarie og Tabel 19 for det værste scenarie. Som vist i Tabel 15 vil det gennemsnitlige solcellescenarie oftest betale sig hjem miljømæssigt ved en orientering mod sydvest, syd og sydøst. Modsat vil den ikke have en positiv indvirkning på miljøet ved orienteringer mod nordvest, nord og nordøst. Det bedste solcellescenarie vil stort set altid betale sig hjem miljømæssigt, mens det værste solcellescenarie aldrig vil betale sig hjem miljømæssigt.

Akkumuleret klimabelastning ved det gennemsnitlige scenarie efter 25 år

Orientering	N	NV	V	SV	S	SØ	Ø	NØ	N
0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
35	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
40	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
45	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
50	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
55	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
60	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
65	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
70	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
75	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
80	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
85	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
90	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1

Tabel 14 Gennemsnitsscenarie – akkumuleret klimabelastning i tons CO<sub>2</sub>e efter 25 år

Klimamæssig tilbagebetalingstid ved det gennemsnitlige scenarie

Orientering	N	NV	V	SV	S	SØ	Ø	NØ	N
0	22	22	22	22	22	22	22	22	22
5	23	23	23	23	22	22	22	22	22
10	N/A	N/A	N/A	N/A	24	24	23	22	22
15	N/A	N/A	N/A	N/A	24	24	23	22	22
20	N/A	N/A	N/A	N/A	23	22	21	20	20
25	N/A	N/A	N/A	N/A	24	22	21	20	20
30	N/A	N/A	N/A	N/A	24	22	21	20	20
35	N/A	N/A	N/A	N/A	23	21	19	18	17
40	N/A	N/A	N/A	N/A	23	21	19	18	17
45	N/A	N/A	N/A	N/A	23	21	19	18	17
50	N/A	N/A	N/A	N/A	23	21	19	18	16
55	N/A	N/A	N/A	N/A	24	21	19	18	16
60	N/A	N/A	N/A	N/A	24	21	19	18	16
65	N/A	N/A	N/A	N/A	22	20	18	17	16
70	N/A	N/A	N/A	N/A	23	20	18	17	16
75	N/A	N/A	N/A	N/A	23	21	19	18	17
80	N/A	N/A	N/A	N/A	22	20	19	18	17
85	N/A	N/A	N/A	N/A	23	21	20	19	18
90	N/A	N/A	N/A	N/A	23	21	20	20	20

Tabel 15 Gennemsnitlige scenarie – klimamæssig tilbagebetalingstid i år



**Klimamæssig tilbagebetalingstid ved det værste scenarie**

Orientering	N		NV		V		SV		S		SØ		Ø		NØ		N
0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
15	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
20	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
25	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
30	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
35	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
40	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
45	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
55	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
60	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
65	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
70	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
75	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
80	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
85	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
90	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tablet 19 Værste scenarie – klimamæssig tilbagebetalingstid i år

## 8 Cases fra Københavns Kommune

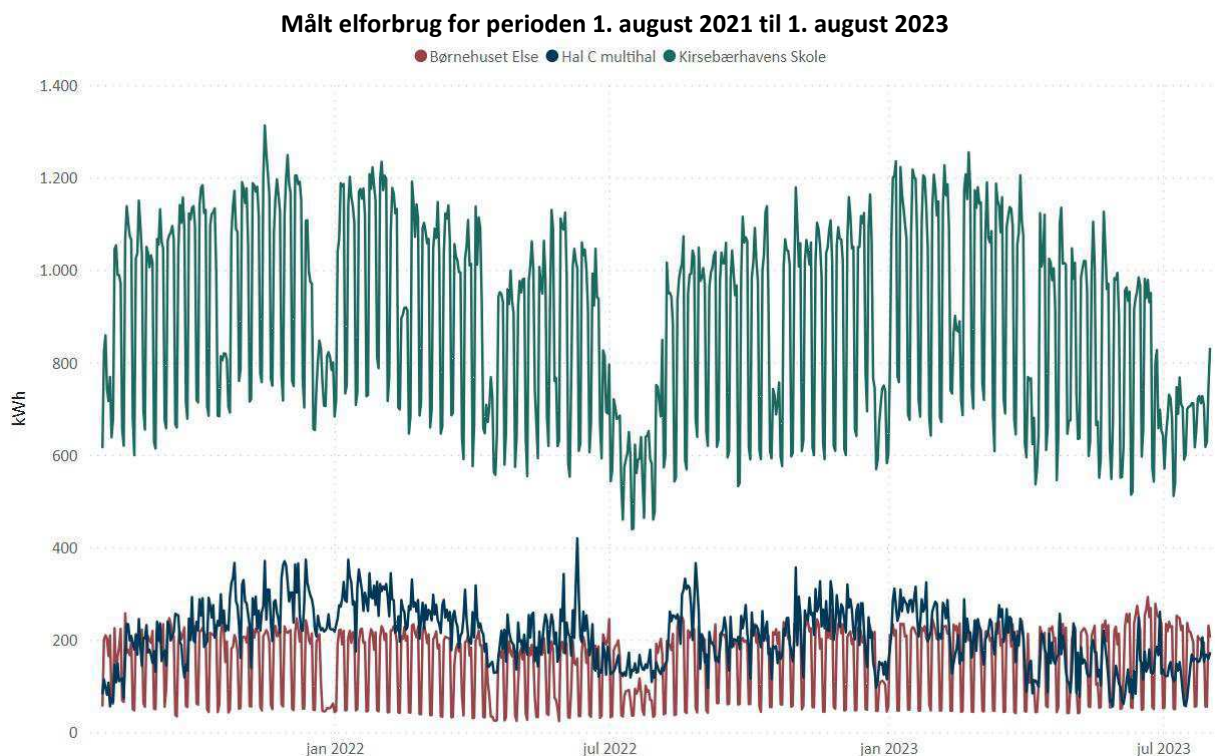
For at vælge den optimale solcelleløsning til en bygning er det afgørende at tage højde for flere faktorer, herunder bygningens energiforbrug på både daglig og årlig basis. Ved at tage udgangspunkt i de unikke energibehov for hver bygningstype kan der opnås mere effektive og energirigtige løsninger, der sparer omkostninger og reducerer den miljømæssige påvirkning.

Nærværende delanalyse undersøger det aktuelle elforbrug (målt) og det mulige solcellepotentiale på tre specifikke bygninger i Københavns Kommune: en eksisterende skole (Kirsebærhavens Skole), en nybygget daginstitution (Børnehuset Else) og en nybygget sportshal (Hal C multihal). De udvalgte cases fremgår af Tabel 20. Analysen undersøger, om det er muligt at opsætte flere solceller end det, der maksimalt kan medregnes i energirammen, uden at producere mere strøm, end hvad der maksimalt forbruges pr. time i dagtimerne.

Tabel 20 Oversigt over cases

Case	Adresse	Bygningstype	Kategori	Etageareal
Børnehuset Else	Else Alfelts Vej 69, 2300 København S	Daginstitution	Nybyg	1.894 m <sup>2</sup>
Kirsebærhavens Skole	Kirsebærhaven 23-25, 2500 Valby	Skole	Eksisterende	15.034 m <sup>2</sup>
Hal C multihal	Arsenalvej 6, 1436 København	Sportshal	Nybyg	2.358 m <sup>2</sup>

Timeforbruget for de undersøgte bygninger indeholder timeværdier pr. bygning for perioden 1. august 2021 til 1. august 2023. Timevariationen over hele perioden fremgår af Figur 24 og er opgjort i Tabel 21.



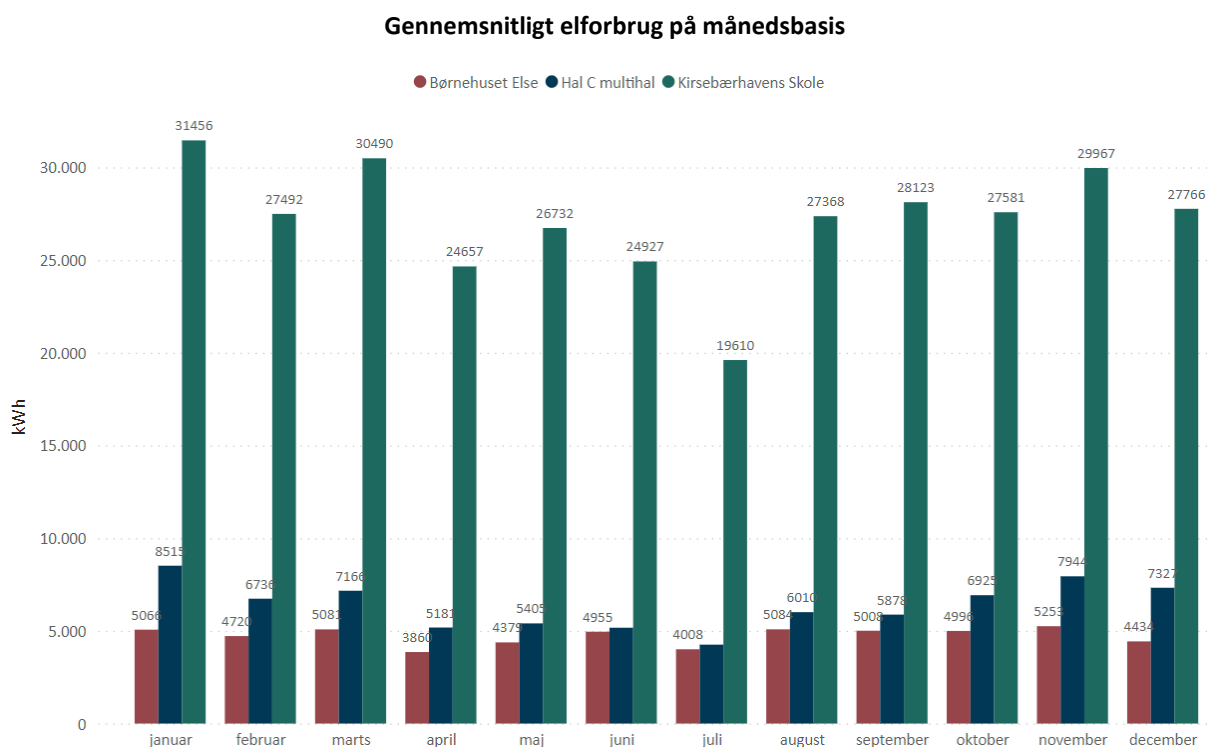
Figur 24 Målt elforbrug for perioden 1. august 2021 til 1. august 2023. Målepunkts ID for de enkelte cases fremgår af Tabel 21.

Tabel 21 Oversigt over anvendt målepunkts ID og samlet målt elforbrug i perioden 1. august 2021 til 1. august 2023 for hver case

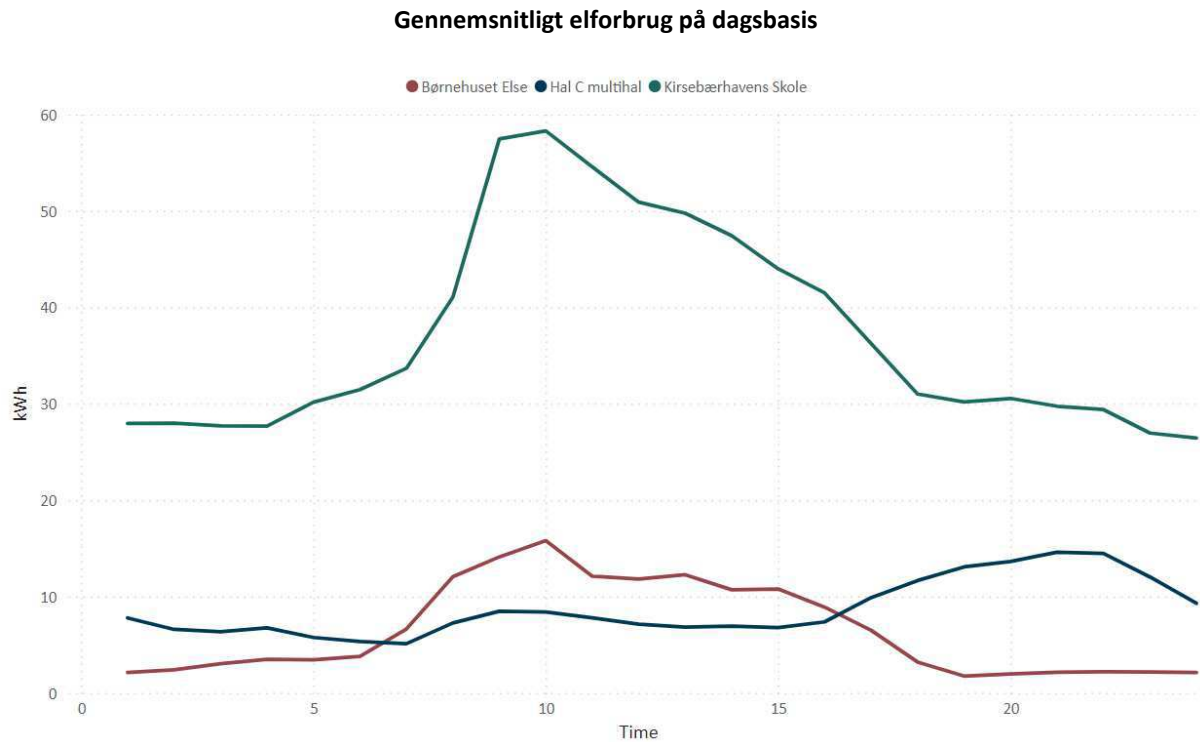
Case	Målepunkts ID	Måleperiode	Målt elforbrug i perioden
Børnehuset Else	571313179101701812	01.08.2021 – 01.08.2023	113.685,4 kWh
		01.08.2021 – 31.12.2022	24.311,1 kWh
		01.01.2022 – 31.12.2023	53.687,8 kWh
		01.01.2023 – 01.08.2023	35.686,1 kWh
Kirsebærhavens Skole	571313179100300719	01.08.2021 – 01.08.2023	652.338,8 kWh
		01.08.2021 – 31.12.2022	145.998,2 kWh
		01.01.2022 – 31.12.2023	319.368,1 kWh
		01.01.2023 – 01.08.2023	186.972,5 kWh
Hal C multihal	571313161170169327	01.08.2021 – 01.08.2023	153.026,4 kWh
		01.08.2021 – 31.12.2022	34.833,0 kWh
		01.01.2022 – 31.12.2023	80.118,7 kWh
		01.01.2023 – 01.08.2023	38.074,7 kWh

Det gennemsnitlige elforbrug pr. måned og dag er vist i hhv. Figur 25 og Figur 26. Gennemsnitsforbruget er baseret og beregnet på de målte timeværdier.

Af Figur 25 ses, at elforbruget for alle tre cases er højest i vintermånederne. Elforbruget er lavest om sommeren med det laveste forbrug målt i juli, hvor både skoler og daginstitutioner i Københavns Kommune afholder sommerferie.



Figur 25 Gennemsnitligt elforbrug per måned for de tre cases for perioden 01.08.2021 til 01.08.2023



Figur 26 Gennemsnitligt elforbrug over et døgn for de tre cases for perioden 01.08.2021 til 01.08.2023

Elforbruget på både skolen og daginstitutionen er størst i timerne fra klokken 6 til klokken 18, som vist på Figur 26. For skolen og daginstitutionen ligger det største forbrug omkring klokken 10. For Hal C multihal er forbrugsmønstret anderledes end de to øvrige bygningstyper, idet elforbruget er størst efter klokken 16.

Af Figur 25 og Figur 26 er det tydeligt, at det aktuelle elforbrug i skolen er betydeligt højere end både daginstitutionen og sportshallen. Her er det vigtigt at notere, at skolen er syv-otte gange større end daginstitutionen og multihallen, så hvis man sammenligner elforbruget pr. m<sup>2</sup> etageareal, ligger skolens elforbrug lavest. Dette fremgår af Tabel 22.

Tabel 22 Målt elforbrug for de tre cases i perioden 01.08.2021 – 01.08.2023

Case	Måleperiode	Etageareal	Målt elforbrug i perioden
Børnehuset Else	01.08.2021 – 01.08.2023	1.894 m <sup>2</sup>	113.685,4 kWh
Kirsebærhavens Skole	01.08.2021 – 01.08.2023	15.034 m <sup>2</sup>	652.338,8 kWh
Hal C multihal	01.08.2021 – 01.08.2023	2.358 m <sup>2</sup>	153.026,4 kWh

I de kommende afsnit kigges der specifikt på elforbruget og den potentielle elproduktion i casene.



## 8.1 Målt elforbrug vs. maksimal elproduktion iht. BR18

I dette afsnit tages der udgangspunkt i det gældende bygningsreglement, BR18. Energirammen for andre bygninger end boliger er 41,0 kWh/m<sup>2</sup> pr. år, tillagt 1.000 kWh pr. år divideret med det opvarmede etageareal, jf. BR18 §260. For alle bygninger kan der højst medregnes en elproduktion fra vedvarende energianlæg som solceller og vindmøller svarende til en reduktion af behovet for tilført energi på 25 kWh/m<sup>2</sup> pr. år i energirammen, jf. BR18 §265. Denne omregnes til en maksimal elproduktion fra vedvarende energikilder på 13,2 kWh/m<sup>2</sup> ved en primærenergifaktor på 1,9, jf. BR18 §252.

I Tabel 23 er der opgjort den maksimale elproduktion fra solceller, der kan medregnes i energirammen for hver af de tre cases, samt det modsvarende solcelleareal ved en orientering mod syd og en hældning på 45 grader. Der er ikke taget højde for det solcelleareal, der er placeret på bygningerne i dag.

Tabel 23 Maksimal årlig elproduktion iht. BR18 §265.

Case	Måleperiode	Etageareal	Max elproduktion, BR18 §265	Solcelle
Børnehuset Else	01.08.2021 – 01.08.2023	1.894 m <sup>2</sup>	25.000 kWh	105 m <sup>2</sup> Orientering: Syd Hældning: 45°
Kirsebærhavens Skole	01.08.2021 – 01.08.2023	15.034 m <sup>2</sup>	198.400 kWh	850 m <sup>2</sup> Orientering: Syd Hældning: 45°
Hal C multihal	01.08.2021 – 01.08.2023	2.358 m <sup>2</sup>	31.100 kWh	130 m <sup>2</sup> Orientering: Syd Hældning: 45°

Solcellernes elproduktion beregnes ud fra solindstrålingen i København, solcelleeffektiviteten er baseret på det gennemsnitlige solcellescenarie fastlagt i Tabel 11, side 31 ved en systemvirkningsgrad på 0,9 og ingen skyggepåvirkning.

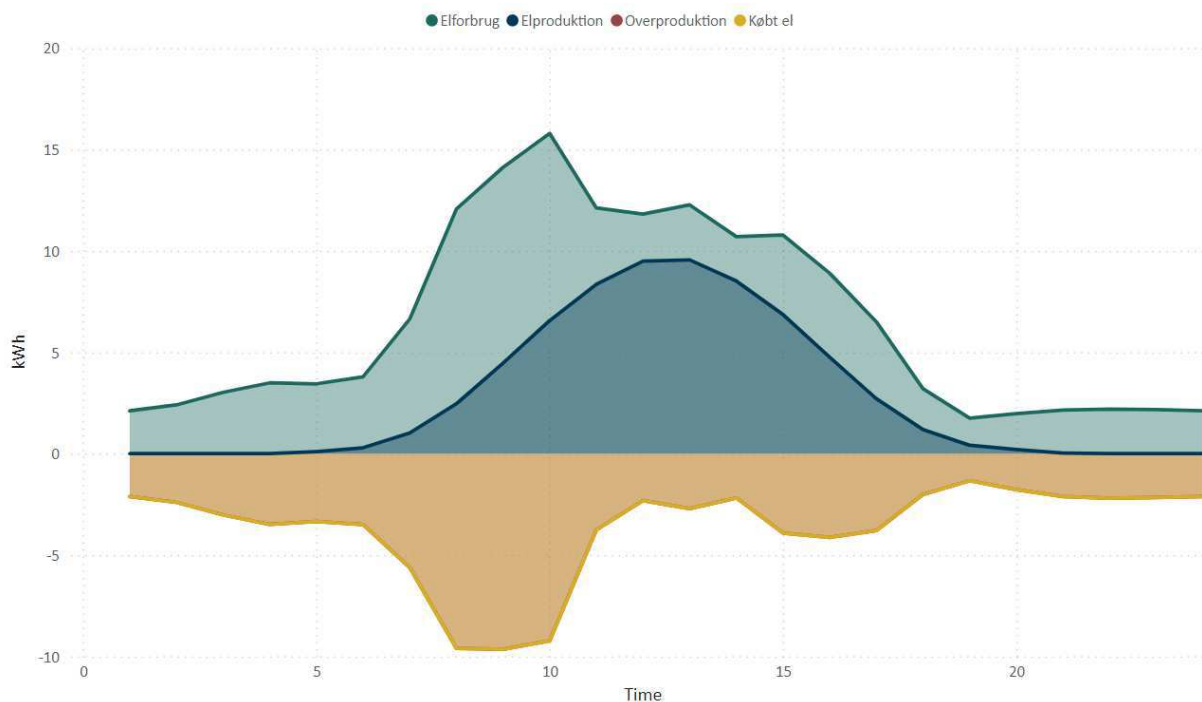
Elproduktionen sammenholdt med det målte elforbrug for et gennemsnitligt døgn fremgår af oversigten i Tabel 24 og vist for Børnehuset Else, Kirsebærhavens Skole og Hal C multihal i hhv. Figur 27, Figur 28, og Figur 29. Heraf fremgår også overproduktion og købt el for et gennemsnitligt døgn. Købt el er beregnet som elforbruget fratrukket elproduktionen, mens overproduktionen af el beregnes som elproduktion minus elforbrug. Ved både Kirsebærhavens Skolen og Hal C ses en overproduktion af strøm, som vil skulle sælges til nettet.

I Tabel 24 introduceres også begrebet dækningsgrad (DG %). Dækningsgraden beskriver, hvor meget af bygningens forbrug, der dækkes af solcelleproduktionen. Ved en elproduktion iht. BR18 er dækningsgraden højest i Kirsebærhavens Skole og lavest i Hal C multihal. Det skyldes blandt andet, at energiforbruget for Hal C multihal ligger om eftermiddagen og aftenen, hvor elproduktionen fra solcellerne er lavere.

Tabel 24 Elforbrug, elproduktion, overproduktion og købt el over et gennemsnitligt døgn ved maksimal elproduktion iht. BR18

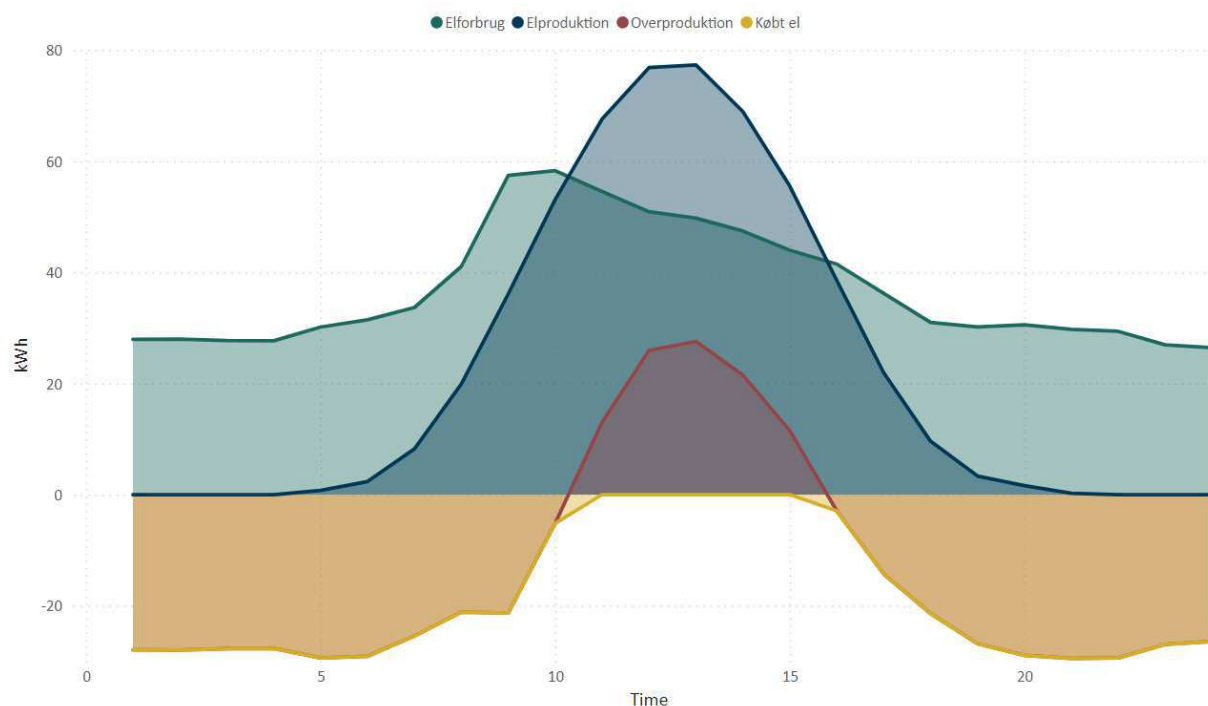
Case	Solcelle	Elforbrug	Elproduktion	Overproduktion	Købt el	DG%
Børnehuset Else	105 m <sup>2</sup>	155,5 kWh	66,98 kWh	0 kWh	88,5 kWh	40 %
	Orientering: Syd Hældning: 45°					
Kirsebærhavens Skole	850 m <sup>2</sup>	892,4 kWh	542,0 kWh	99,6 kWh	449,8 kWh	40 %
	Orientering: Syd Hældning: 45°					
Hal C multihal	130 m <sup>2</sup>	209,3 kWh	82,9 kWh	17,5 kWh	143,9 kWh	24 %
	Orientering: Syd Hældning: 45°					

For Børnehuset Else er elforbruget højere end elproduktionen fra solcellerne, hvorfor der ikke er nogen overproduktion. Det bør bemærkes, at graferne og opgørelsen afspejler det gennemsnitlige døgn. Der vil være perioder i løbet af året, hvor elforbruget er lavere end det anviste, og perioder, hvor elproduktionen er højere end det anviste.

Børnehuset Else, elforbrug og -produktion over et gennemsnitligt døgn ved 105 m<sup>2</sup> solceller

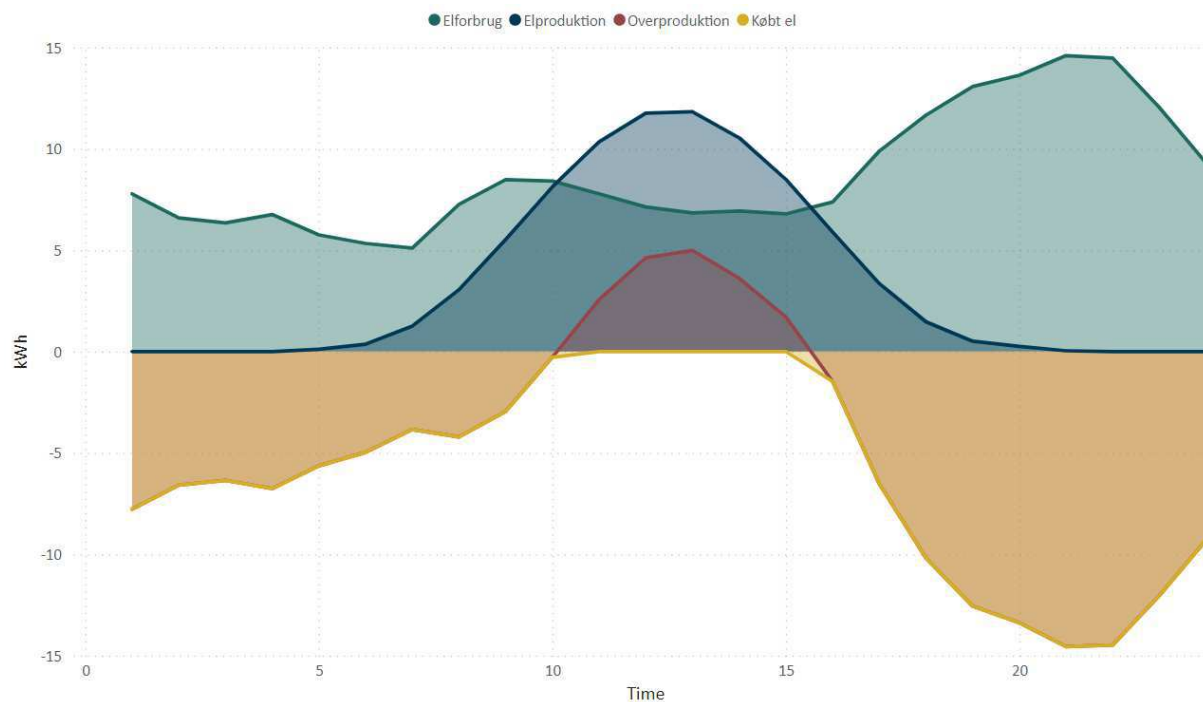
Figur 27 Børnehuset Else, fordelingen mellem elforbrug, elproduktion, overproduktion og købt el over et gennemsnitligt døgn ved 105 m<sup>2</sup> solceller (syd, 45 grader). Solcellernes elproduktion dækker 40 % af bygningens elforbrug.

Kirsebærhavens Skole, elforbrug og -produktion over et gennemsnitligt døgn ved 850 m<sup>2</sup> solceller



Figur 28 Kirsebærhavens Skole, fordelingen mellem elforbrug, elproduktion, overproduktion og købt el over et gennemsnitligt døgn ved 850 m<sup>2</sup> solceller (syd, 45 grader). Solcellernes elproduktion dækker 40 % af bygningens elforbrug.

Hal C multihal, elforbrug og -produktion over et gennemsnitligt døgn ved 130 m<sup>2</sup> solceller



Figur 29 Hal C multihal, fordelingen mellem elforbrug, elproduktion, overproduktion og købt el over et gennemsnitligt døgn ved 130 m<sup>2</sup> solceller (syd, 45 grader). Solcellernes elproduktion dækker 24 % af bygningens elforbrug.

Ved en solcellepris på 2.700 kr. pr. m<sup>2</sup> solcelle og en elforsyning på 1,8 kr./kWh opnås der en simpel tilbagebetalingstid på otte år for Børnehuset Else, hvor 100 % af den totale elproduktion fra solcellerne bruges inden for den aktuelle time. Der er derfor ikke nogen overproduktion af strøm, som skal sælges til nettet. For både Kirsebærhavens Skole og Hal C multihal er der en mindre overproduktion af strøm, hvorfor der ikke udnyttes 100 % af den strøm, der produceres, jf. Tabel 25. Tilbagebetalingstiden her er ni år. Tilbagebetalingstiden øges ved øget overproduktion. Betragtningen er forsimplet, og der ses derfor bort fra øvrige udgifter og eventuelle afgifter forbundet med overproduktionen. Den beregnede tilbagebetalingstid kan derfor ikke perspektiveres til andre studier eller projekter.

Den ens tilbagebetalingstid skyldes, at 100 % af den totale elproduktion fra solcellerne bruges inden for den aktuelle time. Der er derfor ikke nogen overproduktion.

Tabel 25 Forsimplede tilbagebetalingstider ved en solcelleproduktion iht. BR18

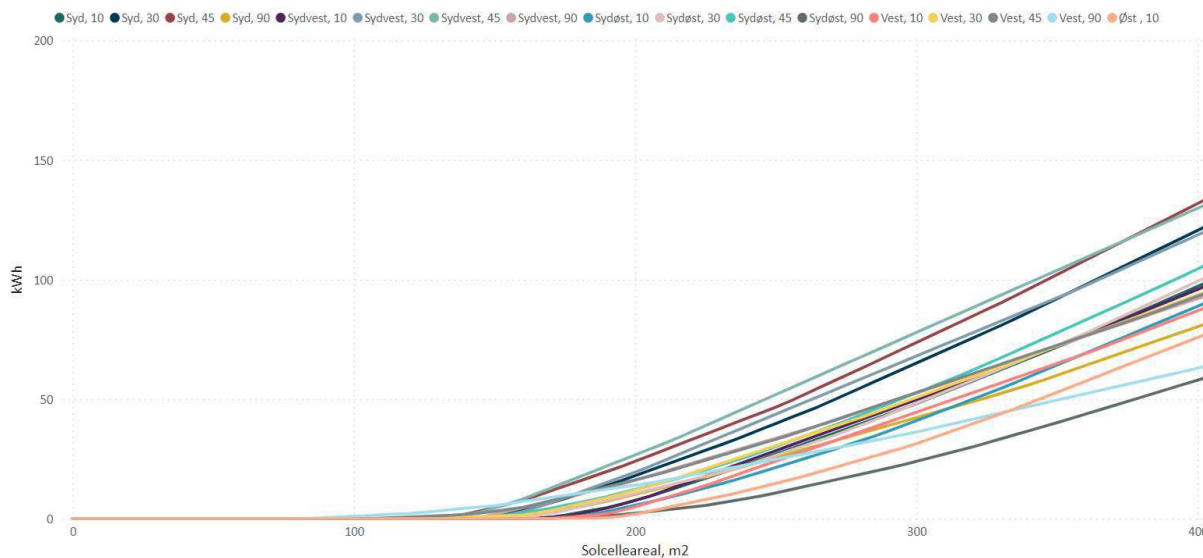
Case	Solcelle	Årlig elproduktion	Brugt inden for timen / total produktion	Simpel tilbagebetalingstid
Børnehuset Else	105 m <sup>2</sup> Orientering: Syd Hældning: 45°	24.500 kWh	100 %	8 år
Kirsebærhavens Skole	850 m <sup>2</sup> Orientering: Syd Hældning: 45°	198.400 kWh	82 %	9 år
Hal C multihal	130 m <sup>2</sup> Orientering: Syd Hældning: 45°	31.100 kWh	79 %	9 år

## 8.2 Optimeret solcelleareal

Døgn- og årsprofilen for elforbruget i de tre bygninger afspejler brugen af bygningen. Som det fremgår af Figur 27, Figur 28 og Figur 29, ligger det primære elforbrug for Hal C multihal om eftermiddagen og om aftenen, mens det primære elforbrug for Kirsebærhavens Skole og Børnehuset Else ligger om formiddagen og strækker sig hen over middag. Solcellernes orientering og hældning bør derfor tilpasses således, at solcellernes elproduktion er størst, når energiforbruget er højest. Tilsvarende bør arealet af solcellerne tilpasses således, at der opnås den maksimale dækningsgrad uden overproduktion. For at fastlægge det optimale solcelleareal, orientering og hældning ønsker vi at producere så meget strøm som muligt, samtidig med at overproduktionen af strøm holdes så lille som mulig.

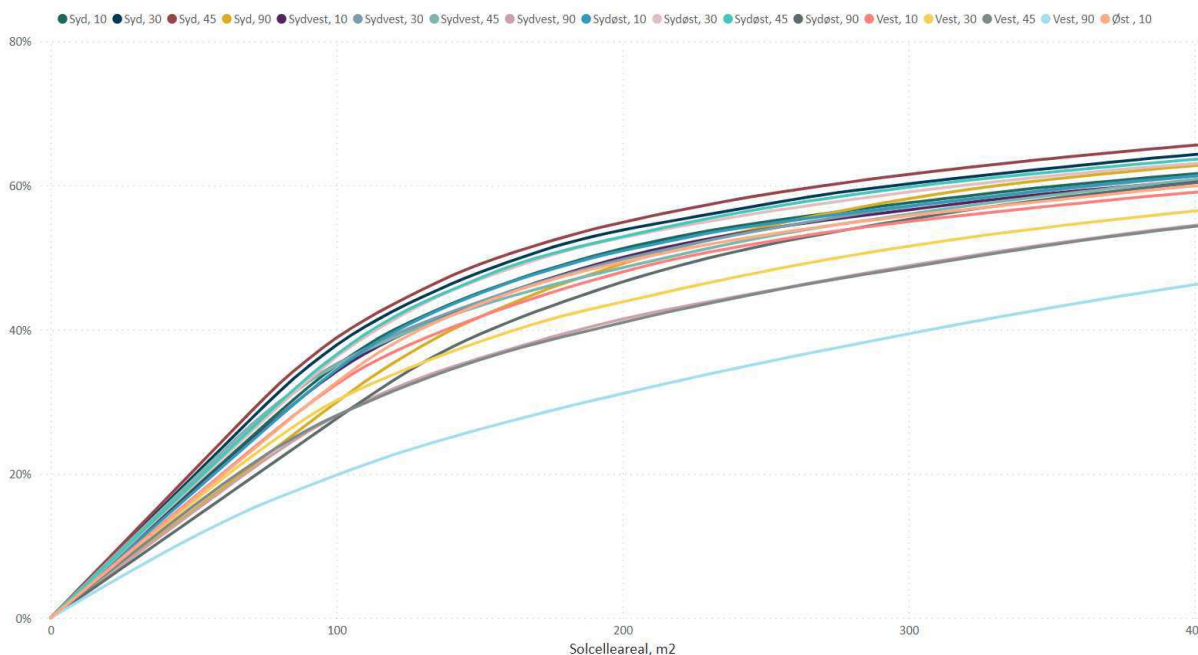
Figur 30 viser, hvor mange m<sup>2</sup> solceller, der skal etableres på Børnehuset Else, før vi begynder at overproducere strøm og leverer til nettet. Graferne afspejler resultatet ved forskellige orienteringer og hældninger. Heraf ses det, at vi skal over 130 m<sup>2</sup> solceller, før overproduktionen stiger. Tilsvarende ses det af Figur 31, at dækningsgraden er konvergerende mod 80 %. Den største dækningsgrad ved 130 m<sup>2</sup> solceller opnås ved en orientering mod syd og en 45° hældning.

**Børnehuset Else, Overproduktion af strøm**



Figur 30 Børnehuset Else, overproduktion af strøm som funktion af solcelleareal ved varierende orientering og hældning.

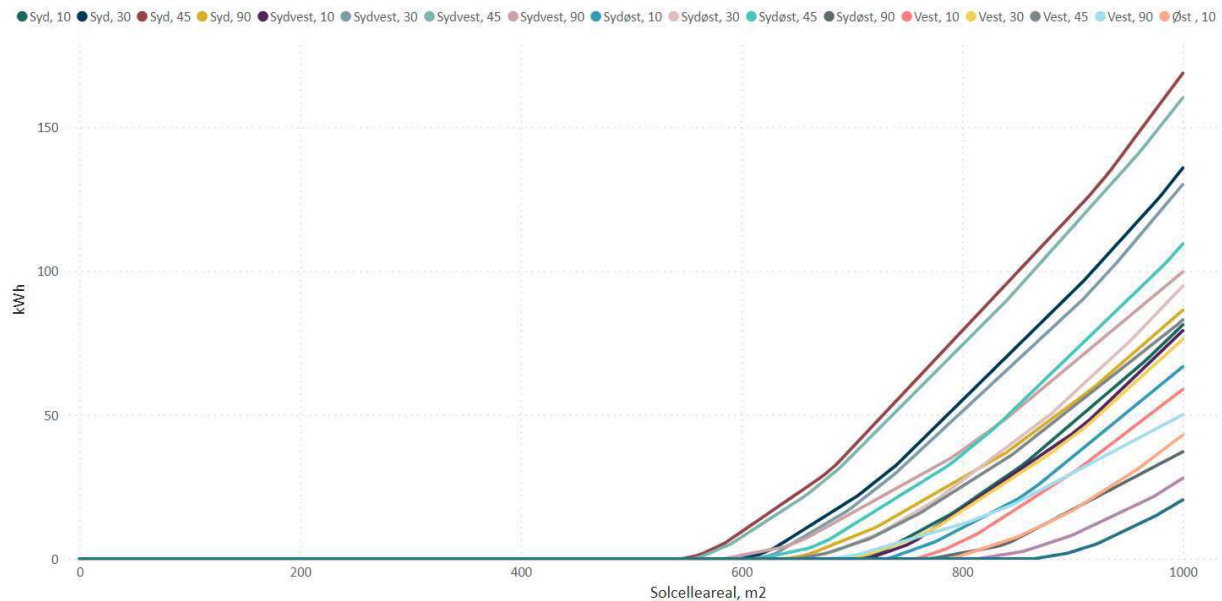
**Børnehuset Else, Dækningsgrad %**



Figur 31 Børnehuset Else, dækningsgrad DB% som funktion af solcelleareal ved varierende orientering og hældning.

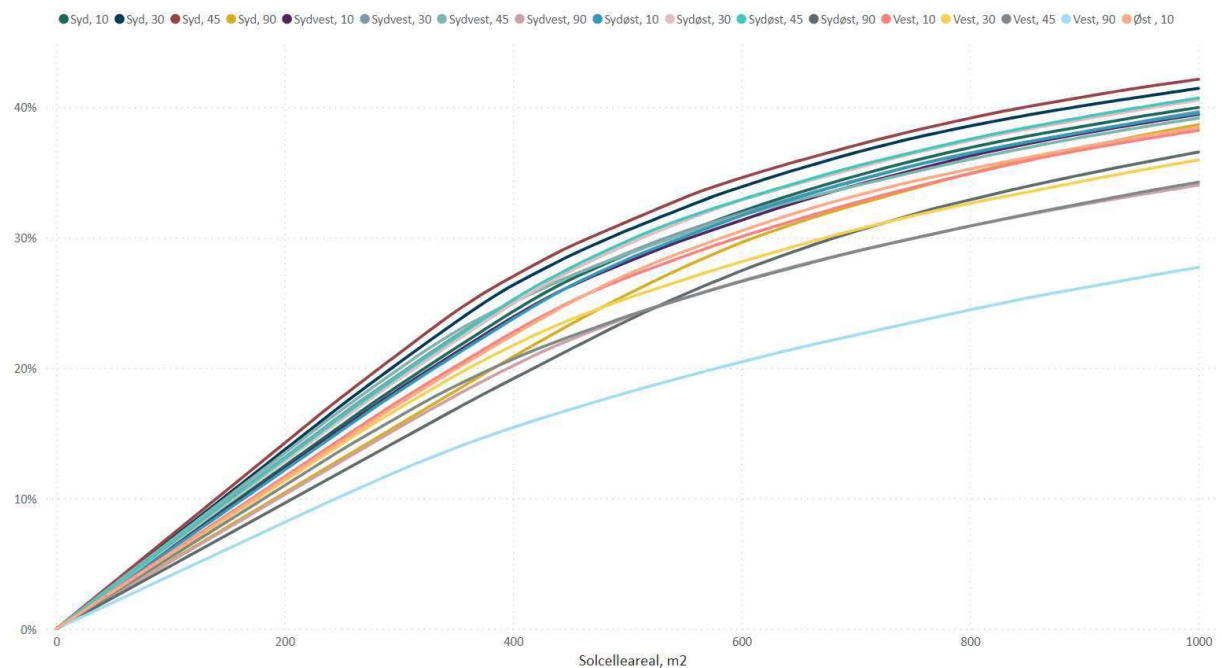
Figur 32 viser, hvor mange m<sup>2</sup> solceller der skal etableres på Kirsebærhavens Skole, før vi begynder at overproducere strøm og dermed sælger til nettet. Grafer afspejler resultatet ved forskellige orienteringer og hældninger. Heraf ses det, at vi skal over 540 m<sup>2</sup> solceller, før andelen af overproduceret el stiger. Tilsvarende ses det af Figur 33, at dækningsgraden er konvergerende mod 50 %. Den største dækningsgrad ved 540 m<sup>2</sup> solceller opnås ved en orientering mod syd og en 45° hældning.

### Kirsebærhavens Skole, Overproduktion af strøm



Figur 32 Kirsebærhavens Skole, overproduktion af strøm som funktion af solcelleareal ved varierende orientering og hældning.

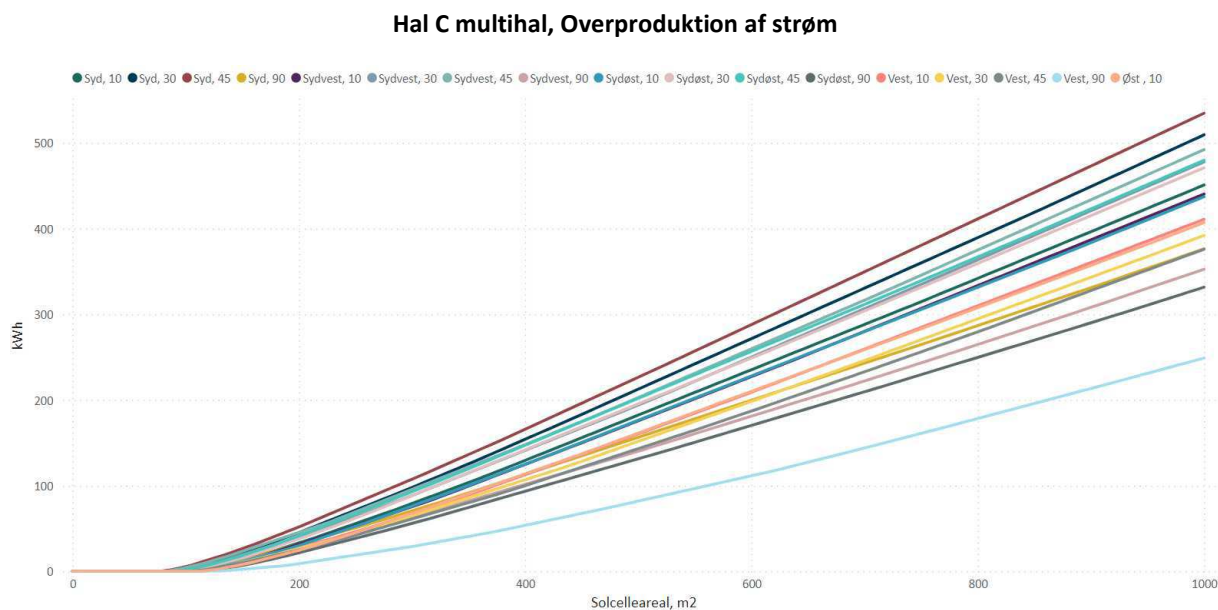
### Kirsebærhavens Skole, Dækningsgrad %



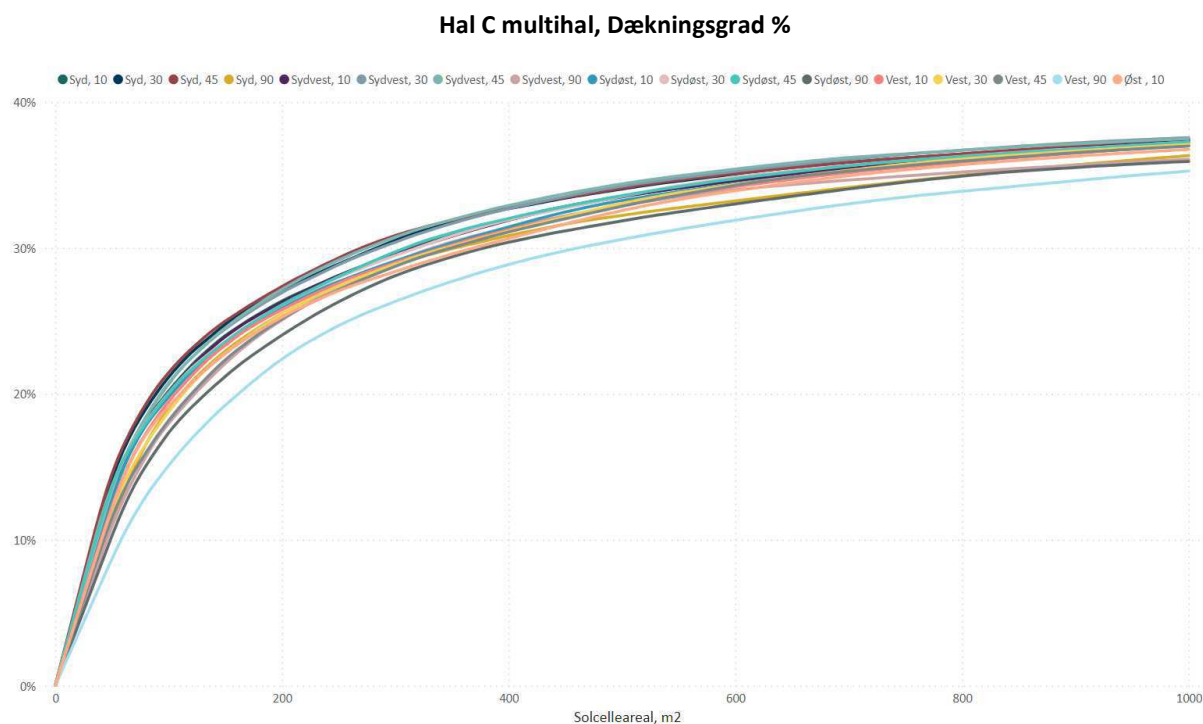
Figur 33 Kirsebærhavens Skole, dækningsgrad DB% som funktion af solcelleareal ved varierende orientering og hældning.



Figur 34 viser, hvor mange m<sup>2</sup> solceller der skal etableres på Hal C multihal, før vi begynder at overproducere strøm og leverer til nettet. Graferne afspejler resultatet ved forskellige orienteringer og hældninger. Heraf ses det, at vi skal over 75 m<sup>2</sup> solceller, før andelen af overproduceret el stiger. Tilsvarende ses det af Figur 35, at dækningsgraden er konvergerende mod 40 %. Den største dækningsgrad ved 75 m<sup>2</sup> solceller opnås ved en orientering mod syd og en 45° hældning.



Figur 34 Hal C multihal, overproduktion af strøm som funktion af solcelleareal ved varierende orientering og hældning.



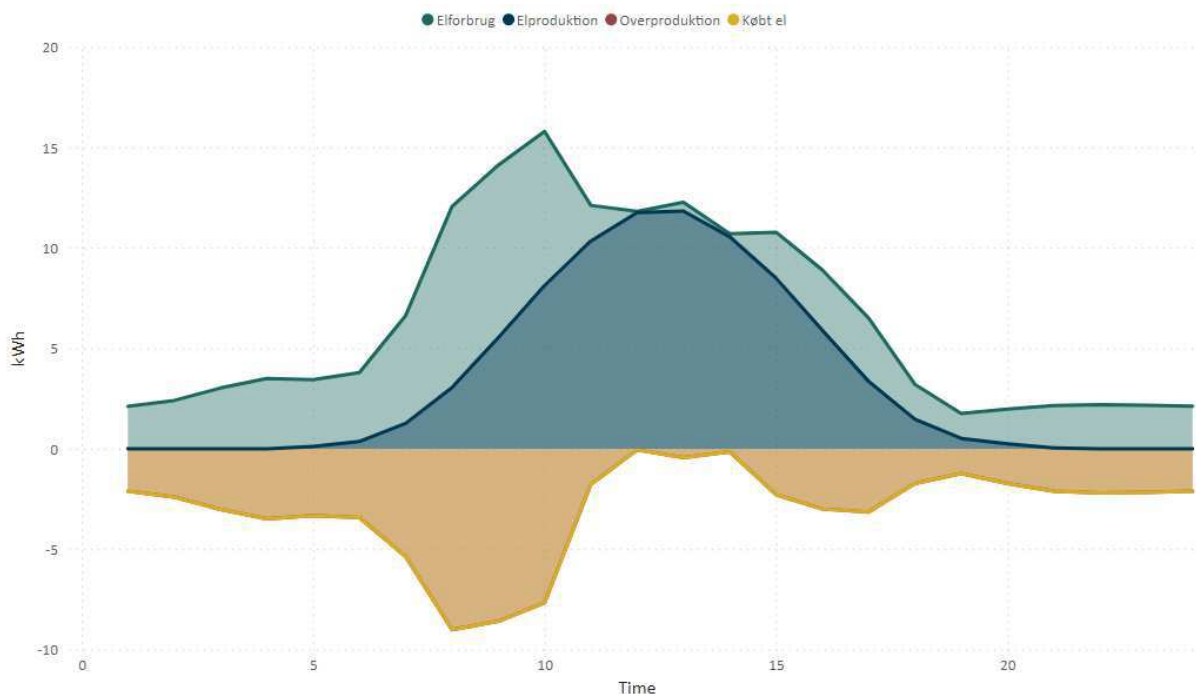
Figur 35 Hal C multihal, dækningsgrad DB% som funktion af solcelleareal ved varierende orientering og hældning.

Elproduktionen ved de optimerede solcellearealer sammenholdt med det målte elforbrug for et gennemsnitligt døgn fremgår af oversigten i Tabel 26 og er vist for Børnehuset Else, Kirsebærhavens Skole og Hal C multihal i hhv. Figur 36, Figur 37 og Figur 38. Heraf fremgår også overproduceret og købt el for et gennemsnitligt døgn. Købt el er beregnet som elforbruget fratrukket elproduktionen, mens overproduktionen beregnes som elproduktion minus elforbrug.

Tabel 26 Elforbrug, elproduktion, overproduceret og købt el over et gennemsnitligt døgn ved maksimal elproduktion uden overproduktion

Case	Solcelle	Elforbrug	Elproduktion	Overproduktion	Købt el	DG%
Børnehuset Else	130 m <sup>2</sup>	155,5 kWh	82,9 kWh	0 kWh	72,6 kWh	46 %
	Orientering: Syd Hældning: 45°					
Kirsebærhavens Skole	540 m <sup>2</sup>	892,4 kWh	344,5 kWh	0 kWh	547,9 kWh	33 %
	Orientering: Syd Hældning: 45°					
Hal C multihal	75 m <sup>2</sup>	209,3 kWh	42,8 kWh	0 kWh	161,5 kWh	19 %
	Orientering: Syd Hældning: 45°					

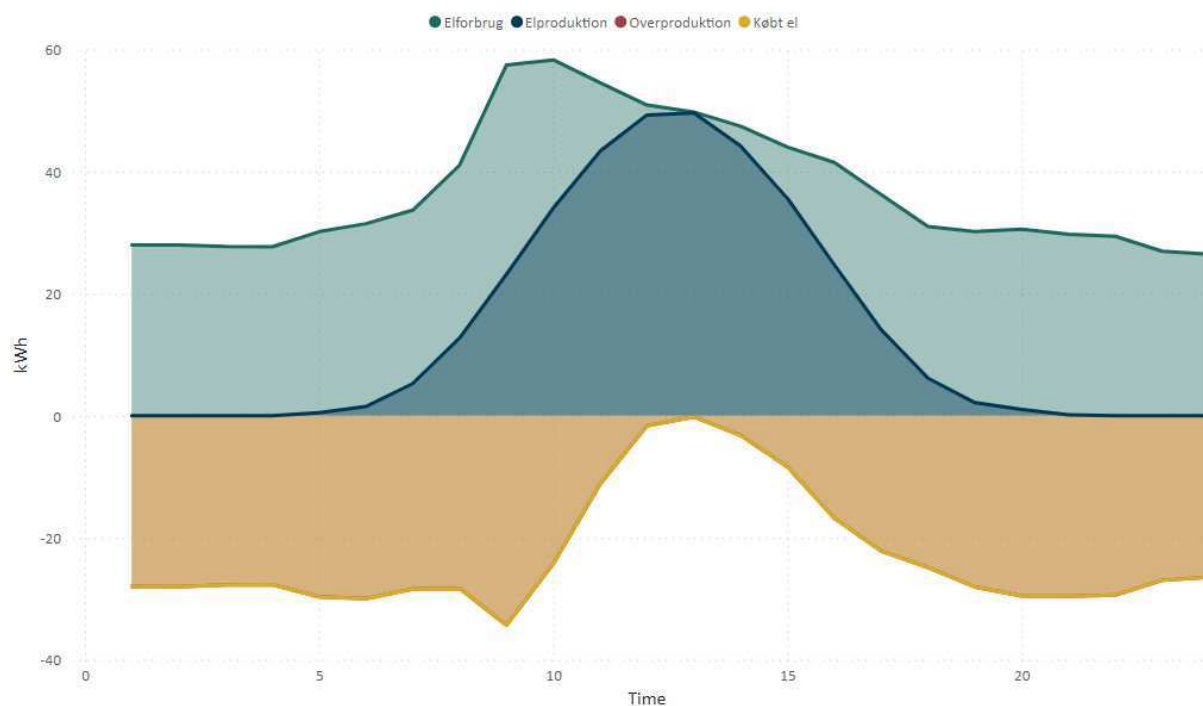
Børnehuset Else, elforbrug og -produktion over et gennemsnitligt døgn ved 130 m<sup>2</sup> solceller



Figur 36 Børnehuset Else, fordelingen mellem elforbrug, elproduktion, overproduceret og købt el over et gennemsnitligt døgn ved 130 m<sup>2</sup> solceller (syd, 45 grader). Solcellernes elproduktion dækker 46 % af bygningens elforbrug.

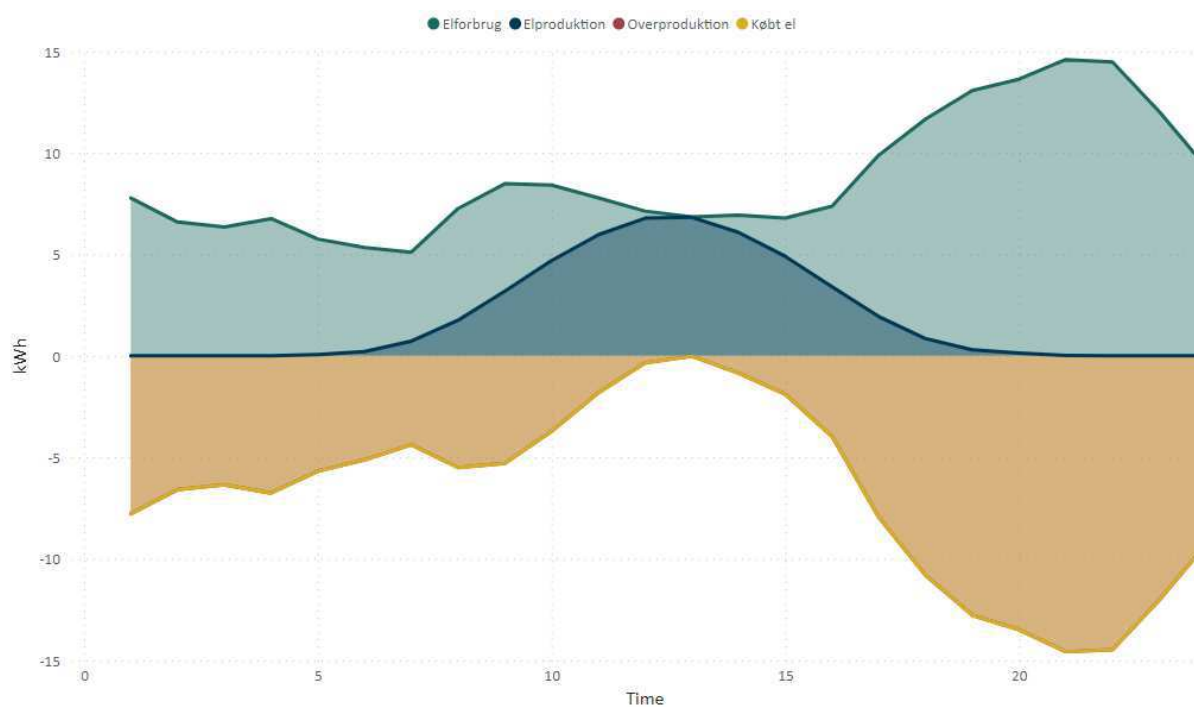


Kirsebærhavens Skole, elforbrug og -produktion over et gennemsnitligt døgn ved 540 m<sup>2</sup> solceller



Figur 37 Kirsebærhavens Skole, fordelingen mellem elforbrug, elproduktion, overproduceret og købt el over et gennemsnitligt døgn ved 540 m<sup>2</sup> solceller (syd, 45 grader). Solcellernes elproduktion dækker 33 % af bygningens elforbrug.

Hal C multihal, elforbrug og -produktion over et gennemsnitligt døgn ved 75 m<sup>2</sup> solceller



Figur 38 Hal C multihal, fordelingen mellem elforbrug, elproduktion, overproduceret og købt el over et gennemsnitligt døgn ved 75 m<sup>2</sup> solceller (syd, 45 grader). Solcellernes elproduktion dækker 19 % af bygningens elforbrug.

Ved en solcellepris på 2.700 kr. pr. m<sup>2</sup> solcelle og en elforsyning på 1,8 kr./kWh opnås der en simpel tilbagebetalingstid på otte år for både Børnehuset Else, Kirsebærhavens Skole og Hal C multihal, jf. Tabel 25. Igen er betragtningen forsimplet, hvor der ses bort fra bl.a. øvrige udgifter og eventuelle afgifter forbundet med overproduktion. Den beregnede tilbagebetalingstid kan derfor ikke perspektiveres til andre studier eller projekter.

Den ens tilbagebetalingstid skyldes, at 100 % af den totale elproduktion fra solcellerne bruges inden for den aktuelle time. Der er derfor ikke noget el, som sælges til nettet.

Tabel 27 Forsimplede tilbagebetalingstider ved en solcelleproduktion med optimerede solcellearealer

Case	Solcelle	Årlig elproduktion	Brugt inden for timen / total produktion	Simpel tilbagebetalingstid
Børnehuset Else	130 m <sup>2</sup> Orientering: Syd Hældning: 45°	30.300 kWh	100 %	8 år
Kirsebærhavens Skole	540 m <sup>2</sup> Orientering: Syd Hældning: 45°	125.700 kWh	100 %	8 år
Hal C multihal	75 m <sup>2</sup> Orientering: Syd Hældning: 45°	17.500 kWh	100 %	8 år

### 8.3 Solcellepotentialet for cases

Sammenholdes tilbagebetalingstiden fra solcellearealet dimensioneret efter den maksimale solcelleeffekt, der kan medregnes i BR18 i Tabel 25, og solcellearealet, som er optimeret i forhold til det målte energiforbrug, Tabel 26, opnås den kortere tilbagebetalingstid i det optimerede scenarie. Årsagen til dette ligger i, at solcellernes elproduktion udnyttes 100 % inden for timen i det optimerede scenarie.

I de undersøgte cases er solcellearealet øget, indtil anlægget begynder at overproducere strøm, og strømmen derfor skal sælges til systemet. For daginstitutionen kan solcelleareal øges til en dækningsgrad på 46 % uden at medføre overproduktion af strøm. For skolen kan solcellearealet øges 33 % uden at medføre overproduktion af strøm. For hallen kan solcellearealet øges til en dækningsgrad på 19 % uden at medføre overproduktion af strøm. Forskellen i den mulige dækningsgrad for de tre cases ligger i, hvornår elforbruget i casen finder sted. Den lave dækningsgrad for hallen skyldes et højt forbrug om aftenen, hvor elproduktionen fra solcellerne er lav. Den høje dækningsgrad for daginstitutionen skyldes, at elforbruget er højt midt på dagen, hvor elproduktionen fra solcellerne er højest.

En forøgelse af solcellearealet ud over det i Tabel 27 vil forøge tilbagebetalingstiden betydeligt. Det skyldes, at elproduktionen i perioder vil være højere end elforbruget. Det vil derfor være nødvendigt at sælge el i de perioder, hvor elforbruget er lavere end elproduktionen. Forskellen mellem el brugt inden for timen og den total produktion vokser, og tilbagebetalingstiden stiger.

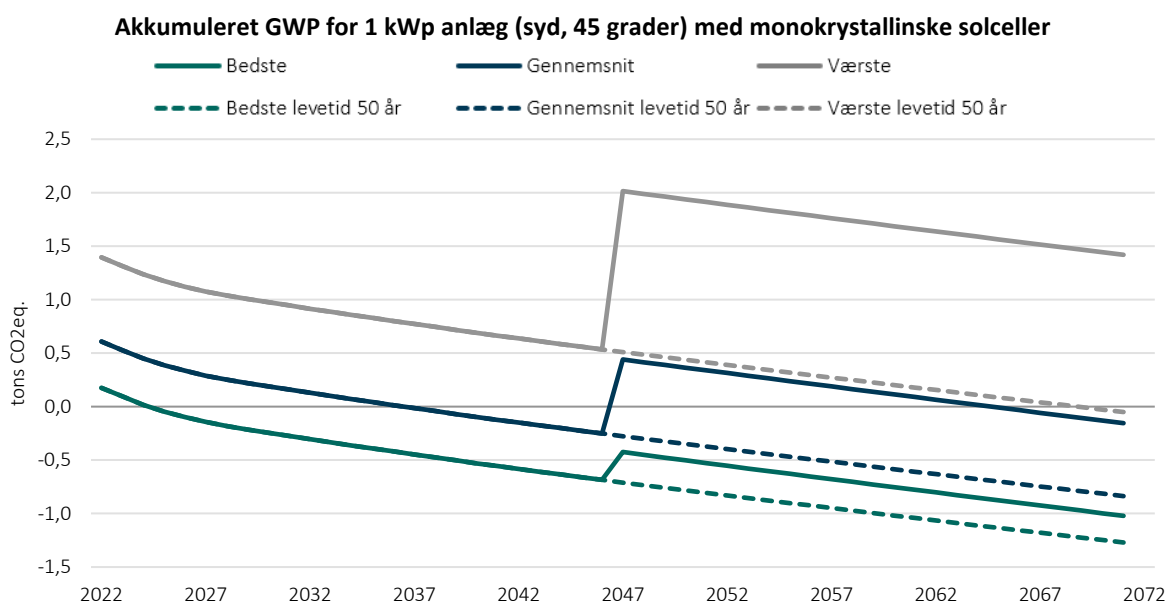
## 9 Diskussion

Solceller, deres rentabilitet, samfundsmæssige betydning og klimamæssige belastning er komplekse emner. Derfor skal rapporten ses som en vejledning til, hvilke analyser og forhold der med fordel kan overvejes eller undersøges for at vurdere, om opsætning af solcelleanlæg med fordel kan igangsættes, og hvilke krav, der kan stilles til anlægget.

### 9.1 LCA-beregningsmetode

En af de største problemstillinger er, hvorvidt solceller er en klimamæssig fordel for planeten eller ej. I Danmark har vi, som beskrevet under metodeafsnittet, en fast defineret metode til at beregne, hvor meget et produkt som en solcelle belaster planeten, men metoden har sine begrænsninger og kan i værste tilfælde føre til forkerte konklusioner. I metoden forudsættes, at klimabelastningen skal evalueres over en 50-årig betragtningsperiode, hvor solcellen udskiftes efter 25-30 år. Denne udskiftning indregnes med samme klimaaftryk som ved opsætningen i år 1, idet der antages en udskiftning til præcis samme model. Dette er et meget usandsynligt scenarie, da solceller er under konstant udvikling og således må forventes at have en markant højere effektivitet om 25-30 år, ligesom den indlejrede CO<sub>2</sub> må forventes at være markant lavere pga. den grønne omstilling. Derfor kan der med fordel laves en analyse af den klimamæssige tilbagebetalingstid, som udelukkende anskuer de første 25-30 år.

I tillæg til ovenstående definerer metoden, at solcellerne SKAL udskiftes i løbet af betragtningsperioden. Der er ingen mulighed for at lade solceller blive siddende eller blot undlade at opsætte nye solceller, hvis forholdene i fremtiden ikke fordrer dette. En tillægsanalyse kunne således være at regne med, at solcellerne ikke udskiftes, men bliver siddende og fortsætter med at producere strøm blot med en lavere virkningsgrad, som illustreret i Figur 39. Her ses, at solcellerne med fordel kan blive siddende, fordi emissionsfaktoren om 25-30 år er så lav, at udskiftningen af solceller ikke betaler sig hjem.



Figur 39. Akkumuleret GWP for 1 kWp monokrystallinske, 50 år.

## 9.2 Energiforsyning

I lighed med ovenstående er de anvendte emissionsfaktorer i LCA-beregningen en forsimpning af virkeligheden. Med den elproduktion, vi har i Danmark, anvendes kul, olie og gas til at producere strøm, når vedvarende energikilder eller biomasse ikke er tilstrækkeligt. Denne produktion foregår i modsætning til vindmøller og solceller på anlæg, som man kan skrue op og ned for efter behov. Det betyder, at en øget solcelleproduktion som resultat af nye anlæg reducerer behovet for elproduktion med fossile brændsler. Derfor vil solcellestrøm som hovedregel substituere "sort strøm" og ikke det elmiks, som vi regner med i LCA-beregningerne. Dette ville føre til en markant højere klimamæssig rentabilitet og en kortere tilbagebetalingstid for flere typer af solceller.

## 9.3 Energiforbrug

Solcellers produktion i forhold til elforbruget i den bygning, solcellerne er placeret på, er afgørende for, hvornår solcellerne er tilbagebetalt i et økonomisk perspektiv. Pga. elforsyningens gældende afregneregler skal produceret strøm bruges inden for en time. Kan dette ikke lade sig gøre, sælges strømmen til nettet til en pris, som er markant under prisen for købt strøm. Dette gør det fordelagtigt at dimensionere sit anlæg til at have en størrelse, der passer til ens forbrug, så man undgår at overproducere strøm.

I en LCA-sammenhæng regnes der ikke med time-time afregning, da elforbruget som udgangspunkt evalueres over et år. Dette er en væsentlig fejlkilde i forhold til, hvordan virkeligheden er, hvorfor nærværende rapport netop har regnet både den økonomiske og klimamæssige tilbagebetalingstid på timebasis og desuden regnet med emissionsfaktorer for Østdanmark.

I tillæg til dette er der i Bygningsreglementet fastlagt en øvre grænse for, hvor stor en elproduktion fra vedvarende energikilder, der kan modregnes i bygningens energiforbrug ved fastlæggelse af energirammen. Ved et anlæg, som producerer mere end afsat i Bygningsreglementet vil effekten hverken fremgå i energirammen eller LCA-beregningen, men skal evalueres i en økonomisk betragtning.

## 9.4 Batterier

De gældende afregneregler og den store prisforskel på købt og solgt strøm medfører en overvejelse af en batteriløsning i kombination med et solcelleanlæg. Denne løsning gør det muligt at lagre overskudsstrøm til senere, hvor solcelleproduktionen er lavere end forbruget. For at evaluere, hvorvidt denne løsning er rentabel ift. både økonomi og klima, kræves en detaljeret beregning af, hvornår det er muligt at lade batteriet, hvornår batteriet aflades, samt hvornår batteriet er fuldt opladet og dermed ikke kan modtage mere strøm, og hvornår batteriet er fuldt afladet og således ikke kan bruges til at dække et energiforbrug. En sådan betragtning bør også tage højde for batteriernes korte levetid på ca. 10 år. De skal derfor skiftes to-tre gange under solcelleanlæggets levetid. Desuden er batterier dyre og når ikke nødvendigvis at tjene sig hjem økonomisk, idet solcelleanlægget skal være tilsvarende større for at oplade batteriet.

Som beskrevet i afsnit 4.1 er en analyse af batteriløsninger ikke medtaget i nærværende rapport pga. manglende miljødata på batterier. Både klimamæssigt og økonomisk er det dog en interessant

Løsning at undersøge nærmere, og særligt på bygninger som har et større forbrug om morgenen og aftenen, hvor elproduktionen fra solceller er mindst. En batteriløsning kan eventuelt undersøges i en sportshal som Hal C multihal, hvor solcellernes maksimale dækningsgrad ikke overstiger 20 %. Dette skyldes en forskydning mellem solcellernes elproduktion og bygningens aktuelle elforbrug.

## 10 Referencer

- Artelia. (2023). *Emissionsfaktorer for el fjernvarme og ledningsgas for 2025-2075*. Aarhus.
- Crawford, A., & Murphy, L. T. (2023). *Over exposed: Uyghur Region Exposure Assessment for Solar Industry Sourcing*. Sheffield Hallam University.
- Danmarks Meteorologiske Institut. (04. September 2023). *DMI vejrarkiv*. Hentet fra <https://www.dmi.dk/vejrarkiv/>
- Dansk Standard. (2012). *DS/EN 15978:2012 - Bæredygtighed inden for byggeri og anlæg - Vurdering af bygningers miljømæssige kvalitet - Beregningsmetode*.
- Dansk Standard. (2019). *DS/EN 15804:2012+A2:2019 - Bæredygtighed inden for byggeri og anlæg – Miljøvaredeklarationer – Grundlæggende regler for produktkategorien byggevarer*.
- Electricity maps. (04. September 2023). *Electricity maps*. Hentet fra <https://www.electricitymaps.com/data-portal/denmark>
- Energinet. (04. September 2023). *Energi data service*. Hentet fra <https://www.energidataservice.dk/tso-electricity/DeclarationEmissionHour>
- Energinet Group. (04. September 2023). *TSO Electricity*. Hentet fra [https://github.com/electricitymaps/electricitymaps-contrib/blob/master/DATA\\_SOURCES.md](https://github.com/electricitymaps/electricitymaps-contrib/blob/master/DATA_SOURCES.md)
- InnoBYG. (2014). *Branchevejledning for energiberegninger*.
- P.E.P, A. (03. 11 2023). *Pep-ecopassport*. Hentet fra Pep-ecopassport: [www.pep-ecopassport.org](http://www.pep-ecopassport.org)
- Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet. (2016). *SBi 2016:09 Forskellen mellem målt og beregnet energiforbrug til opvarmning af parcelhuse*.
- Teknik og Miljøforvaltningen. (2012). *KBH 2025 Klimaplanen*.

## **11 Bilagsoversigt**

Bilag A: Oversigt over medregnede solcellepaneler



Bilag A  
Undersøgte solceller

Produkt	Producent	Produktionsland	Materiale	Type	Samlet LCA (A1+A2+B4+C3-C4) pr. 1 Wp pr. år [kg CO2-ækv. pr. år]	Samlet LCA (A1+A2+B4+C3-C4) pr. 1 Wp [kg CO2-ækv.]	Samlet LCA (A1+A2+B4+C3-C4) pr. 1 Wp [kg CO2-ækv.]	LCA (A1-A3) pr. 1 Wp [kg CO2-ækv.]	LCA (C3-C4) pr. 1 Wp [kg CO2-ækv.]	Biogen carbon (A4-A5) pr. 1 Wp [kg CO2-ækv.]	EPD	Bemærkninger	Gyldig indtil	Standard EN 15804+A1 /A2	Levetid [år]	Deklarationsnummer	Udgangseffekt [Wp]	Panelareal [m2]	Effektivitet [Wp/m2] af areal
TARKA VSM format 60 cellules	Vottec Solar	N/A	Monokrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,02	1,23	7,23E-01	7,18E-01	5,25E-03	N/A	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2024	EN 15804+A1	30	VSOL-00001-V01.01-FR	300	1,64	183
Tarka 126 VSBD	Vottec Solar	Kina	Monokrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,02	1,08	6,33E-01	6,22E-01	1,11E-02	N/A	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2026	EN 15804+A1	30	VSOL-00004-V01.01-FR	423	1,91	221
Clearline Fusion PV16	Viridian Solar	N/A	Monokrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,03	1,45	7,27E-01	7,11E-01	1,59E-02	-3,69E-03	EPD	Ekst. Inverter Ikst. Monteringsystem og kabler	2028	EN 15804+A2	25	S-P-06949	405	1,95	208
R-Volt	Systovi	Norge	Monokrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,06	3,02	1,51E+00	1,48E+00	2,85E-02	N/A	EPD	Ikst. Inverter Ikst. Monteringsystem og kabler	2025	EN 15804+A1	25	SYST-00002-V01.01-FR	300	1,62	186
V-Sys	Systovi	Norge	Monokrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,05	2,74	1,37E+00	1,35E+00	1,95E-02	N/A	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2025	EN 15804+A1	25	SYST-00001-V01.01-FR	300	1,78	169
V-Sys bas-carbone	Systovi	Tyskland	Monokrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,03	1,50	7,48E-01	7,28E-01	1,95E-02	N/A	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2026	EN 15804+A1	25	SYST-00003-V01.01-FR	300	1,78	169
Tuiles photovoltaïques Coloris Noir, structure de pose en bois	SunStyle	N/A	Monokrystalinsk	Bygningsintegrerede (BIPV)	0,06	3,18	1,87E+00	1,68E+00	1,88E-01	-7,17E-03	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2027	EN 15804+A2	30	STIL-00001-V01.01-FR	173	1	173
Tuiles photovoltaïques Coloris Noir, structure de pose en acier	SunStyle	N/A	Monokrystalinsk	Bygningsintegrerede (BIPV)	0,06	3,15	1,85E+00	1,67E+00	1,80E-01	N/A	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2027	EN 15804+A1	30	STIL-00002-V01.01-FR	173	1	173
Maxeon 3	Sunpower	Filippinerne	Monokrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,01	0,69	3,43E-01	3,42E-01	5,79E-04	N/A	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2026	EN 15804+A1	25	NEPD-3087-1726-EN	400	1,77	226
Wysips Cameleon	Sunpartner	Tyskland	Tyndfilm	Bygningsmonterede (BAPV)	0,04	1,77	1,04E+00	1,03E+00	9,52E-03	N/A	EPD	Ikst. Inverter Ikst. Monteringsystem og kabler	2023	EN 15804+A1	30	SUNP-00001-V01.01-FR	94	1,04	90
N-Peak 2	REC Solar	Singapore	Monokrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,05	2,70	1,35E+00	1,34E+00	1,11E-02	7,30E-03	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2027	EN 15804+A2	25	NEPD-3422-2033-EN	375	1,83	205
Alpha Pure	REC Solar	Singapore	Monokrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,03	1,40	6,90E-01	6,89E-01	1,03E-02	5,31E-03	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2027	EN 15804+A2	25	NEPD-3420-2033-EN	410	1,85	222
Alpha-Pure R 430 Wc	REC Solar	Tyskland	Polyrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,03	1,60	7,98E-01	7,69E-01	2,85E-02	4,77E-03	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2028	EN 15804+A1	25	RECS-00002-V01.01-FR	430	1,93	222
PW72LHT-C420Wc	PhotoWatt	Kina	Polyrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,02	1,02	5,11E-01	5,01E-01	1,02E-02	N/A	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2027	EN 15804+A1	25	PHOT-00003-V01.01-FR	420	2,21	190
PW60LHT-C 355Wc	PhotoWatt	Kina	Polyrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,02	1,02	5,11E-01	5,01E-01	1,01E-02	N/A	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2027	EN 15804+A1	25	PHOT-00001-V01.01-FR	355	1,85	192
Wave	Midsummer	Sverige	Tyndfilm	Bygningsintegrerede (BIPV)	0,01	0,37	1,87E-01	1,56E-01	3,06E-02	-1,25E-02	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2027	EN 15804+A2	25	S-P-06692	55	0,79	70
Slim	Midsummer	Sverige	Tyndfilm	Bygningsintegrerede (BIPV)	0,01	0,28	1,39E-01	1,17E-01	2,15E-02	-6,88E-03	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2027	EN 15804+A2	25	S-P-06691	65	0,65	100
Bold	Midsummer	Sverige	Tyndfilm	Bygningsmonterede (BAPV)	0,01	0,26	1,32E-01	1,13E-01	1,88E-02	-5,24E-03	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2027	EN 15804+A2	25	S-P-06690	190	1,68	113
Series 6	First Solar	USA	Monokrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,01	0,49	2,87E-01	2,67E-01	1,98E-02	-4,22E-03	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2026	EN 15804+A1	30	NEPD-2993-1671-EN	435	2,47	176
BIPV modul ERS-0191 (130W)	Ennogie	Danmark	Monokrystalinsk	Bygningsintegrerede (BIPV)	0,04	1,97	9,93E-01	9,46E-01	3,70E-02	-1,19E-02	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2028	EN 15804+A2	25	MD-23028-EN	130	0,74	175
Système Tuile FAG 10 SOLAIRE	Edilians	Tyskland	Monokrystalinsk	Bygningsintegrerede (BIPV)	0,08	3,93	1,97E+00	1,97E+00	8,25E-04	N/A	EPD	Ikst. Inverter Ikst. Monteringsystem og kabler	2024	EN 15804+A1	25	EDIL-00001-V02.02-FR	32	0,26	120
Système Tuile FAG 10 SOLAIRE ROUGE	Edilians	Litauen	Monokrystalinsk	Bygningsintegrerede (BIPV)	0,08	3,93	1,97E+00	1,97E+00	8,25E-04	N/A	EPD	Ikst. Inverter Ikst. Monteringsystem og kabler	2025	EN 15804+A1	25	EDIL-00004-V01.01-FR	24	0,26	120
Kit Tuile Photovoltaïque TPVS & TPVXL ROUGE	Edilians	Litauen	Monokrystalinsk	Bygningsintegrerede (BIPV)	0,05	2,43	1,21E+00	1,21E+00	2,13E-03	N/A	EPD	Ikst. Inverter Ikst. Monteringsystem og kabler	2025	EN 15804+A1	25	EDIL-00005-V01.01-FR	120	0,50	240
Kit Tuile Photovoltaïque TPVS & TPVXL	Edilians	Litauen	Monokrystalinsk	Bygningsintegrerede (BIPV)	0,04	1,94	9,68E-01	9,67E-01	1,71E-03	N/A	EPD	Ikst. Inverter Ikst. Monteringsystem og kabler	2025	EN 15804+A1	25	EDIL-00002-V02.01-FR	150	0,50	300
M6-60 DS385-120M6-02-V	Dualsun	Kina	Monokrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,03	1,34	6,72E-01	6,67E-01	5,02E-03	N/A	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2027	EN 15804+A1	25	DUAL-00002-V01.01-FR	385	1,82	211
M10-54 DS415-108M10-02	Dualsun	Kina	Monokrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,03	1,33	6,63E-01	6,58E-01	4,95E-03	N/A	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2027	EN 15804+A1	25	DUAL-00001-V01.01-FR	415	1,94	214
DM345 G1-60HSW	DMEGC Solar	Kina	Monokrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,03	1,39	6,95E-01	6,90E-01	5,18E-03	N/A	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2026	EN 15804+A1	25	DMEG-00001-V01.01-FR	345	1,69	204
DM345 G1-60HBW	DMEGC Solar	Kina	Monokrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,03	1,39	6,95E-01	6,90E-01	5,18E-03	N/A	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2026	EN 15804+A1	25	DMEG-00001-V01.01-FR	345	1,69	204
BGPV (BK) 460-MCSI	Bourgeois-Global	Kina	Monokrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,03	1,35	6,73E-01	6,68E-01	5,02E-03	N/A	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2026	EN 15804+A1	25	BOUR-00002-V01.01-FR	460	2,18	211
BGPV (SL) 385-MCSI	Bourgeois-Global	Kina	Monokrystalinsk	Bygningsmonterede (BAPV)	0,03	1,34	6,71E-01	6,66E-01	5,01E-03	N/A	EPD	Ekst. Inverter Ekst. Monteringsystem og kabler	2026	EN 15804+A1	25	BOUR-00001-V01.01-FR	385	1,82	212