

**KLIMATEFFEKTIV SOLENERGI**

# **Jämförelse av klimatpåverkan från tillverkning av olika solcellsmoduler**

**Detta är en kunskapssammanställning för projektet Klimateffektiv Solenergi av klimatpåverkan som uppstår i samband med tillverkning av solcellsmoduler. Resultaten kan användas i hållbarhetsarbete och vid upphandling av solcellsmoduler.**

**RISE RAPPORT 2021:78**

Hanna Askemar  
Michiel van Noord

Division Samhällsbyggnad,  
Avdelning Energi och resurser

# Jämförelse av klimatpåverkan från tillverkning av olika solcellsmoduler

Hanna Askemar, Michiel van Noord

# Förord

Denna rapport har tagits fram av RISE Research Institutes of Sweden inom ramen för projektet Klimateffektiv Solenergi. Projektet syftar till att bidra till ökad kunskap om och hänsyn till solcellers klimatprestanda hos marknadsaktörer. Därtill ska projektet sammanställa kunskapsläget om solcellsmodulers klimatpåverkan, ta fram och testa upphandlingskriterier som utvärderar solcellers klimatprestanda samt ta fram vägledning för klimatoptimerad förvaltning av solcellsanläggningar.

Kunskapsläget som sammanfattas i denna rapport har tagits fram genom en litteraturgenomgång av aktuell forskning på klimatpåverkan från solceller. Målsättningen har varit att få en överblick över vilka solcellstekniker som har störst respektive lägst klimatpåverkan samt att urskilja de mest betydande valmöjligheterna som gynnar en låg klimatpåverkan genom att identifiera processer eller tillverkningssteg med intensiv klimatpåverkan. Kunskaperna som samlats i rapporten ska ligga till grund för vidare arbete med bland annat upphandlingskriterier i projektet Klimateffektiv solenergi.

I arbetet med litteraturstudien har en dialog skett med projektets referensgrupp som har gett synpunkter på inriktning och användbarhet av preliminära resultat, innan denna slutgiltiga rapport. I referensgruppen ingick representanter från Aktea Energy, Becquerel Sweden, Energimyndigheten, Förbo, Högskolan i Gävle, Naturvårdsverket, Swedish Life Cycle Centre, Svensk Solenergi och Svenska Naturskyddsföreningen.

Projektet Klimateffektiv Solenergi leds av Energikontoret Storsthlm och utförs i ett samarbete mellan Energikontor Storsthlm, RISE Research Institutes of Sweden och allmännyttans inköpscentral HBV. Finansiering av projektet kommer från Energimyndigheten (programmet El från Solen) och HBV.



Hanna Askemar, Michiel van Noord

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport 2021:78

ISBN: 978-91-89385-68-9

Borås 2021

# Innehåll

<b>Sammanfattning .....</b>	<b>3</b>
<b>Ord- och begreppslista .....</b>	<b>4</b>
<b>1 Solcellsmarknaden.....</b>	<b>6</b>
1.1 Vanligaste tillverkningsländer .....	7
1.1.1 Tillverkningslandets betydelse för klimatpåverkan.....	8
1.2 De vanligaste solcellsteknologierna.....	8
<b>2 En solcellsmoduls livscykel .....</b>	<b>10</b>
2.1 Från råvaruvinning till återvinning.....	10
2.2 Vikten av livscykelns olika steg för climateffektivitet .....	10
2.3 Tillverkningssteg för kristallina kisel-solcellsmoduler.....	11
2.3.1 Relativ klimatpåverkan från olika tillverkningssteg för kiselmoduler.....	12
<b>3 Jämförelse av klimatpåverkan för olika teknikval.....</b>	<b>14</b>
3.1 Tunnfilm jämfört med kisel-solceller .....	14
3.2 Multikristallint jämfört med monokristallint kisel .....	15
3.3 Dagens och morgondagens kiselteknologi .....	16
3.3.1 PERx, heterojunction och dubbelsidiga moduler .....	16
3.3.2 Högradigt kisel – olika processer .....	18
3.4 Hög eller låg verkningsgrad.....	19
3.5 Olika modulkonstruktioner .....	20
3.5.1 Fram- och baksidan av glas eller polymer.....	20
3.5.2 Solcellsmoduler med eller utan ram .....	20
3.5.3 Resurseffektiviseringspotential genom byggnadsintegrering.....	22
<b>4 Svårigheter vid bedömning av klimatpåverkan .....</b>	<b>23</b>
4.1 Avsaknad av aktuell data .....	23
4.2 Olika funktionella enheter .....	23
4.2.1 Betydelse av årlig instrålning, prestanda, degradering och livslängd.....	23
4.3 Klimatpåverkan från el i tillverkningssteget och elen som ersätts av solel.....	25
<b>5 Råd för climateffektiv solenergi.....</b>	<b>28</b>
5.1 Slutsatser litteraturstudie .....	28
5.2 Pågående initiativ för kravställning och utvärdering .....	28
5.2.1 Förenklad klimatbedömning i Frankrike .....	28
5.2.2 Ecodesignkrav inom EU .....	29
5.2.3 Environmental Product Declarations (EPD).....	30
5.3 Behov av vidare arbete och forskning.....	31

# Sammanfattning

Denna första rapport från projektet Klimateffektiv solenergi sammanställer kunskapsläget om klimatpåverkan från solcellsmoduler och lägger grunden för vidare projektarbete med utformning av upphandlingskriterier.

Litteraturgenomgången täcker både en marknadsöversikt över dagens solcellsmarknad samt en genomgång av klimatpåverkan från olika teknologier och konstruktioner för solcellsmoduler. Litteraturgenomgången avgränsas genom att projektet fokuserar på miljöpåverkanskategorin klimatpåverkan. Vidare har tillverkningskedet varit centralt i arbetet då tidiga resultat från analyser av klimatpåverkan över solcellers hela livscykel påvisar att övervägande klimatpåverkan sker under tillverkningen av solceller.

Centrala utmaningar vid bedömning av klimatpåverkan från solceller är brist på aktuella data, att olika studier redovisar resultat i olika enheter (koldioxidequivaler per kWh, per modul eller per kWp) samt hur årlig instrålning, prestanda, degradering och livslängd hanteras i de olika studierna.

Resultatet påvisar att dagens dominerande solcellsteknik, kristallina kiselceller, har större klimatpåverkan jämfört med tunnfilmstekniker. Vidare har monokristallina kiselceller större klimatpåverkan från produktion än multikristallina kiselceller, men vilken kiselteknik som producerar el med lägst klimatpåverkan beror på verkningsgradsförhållandena. Nyare cellteknologier såsom PERC- och dubbelsidiga solceller kan minska klimatpåverkan från solet genom att elproduktionen per solcell ökar utan att utsläppen vid tillverkning ökar markant. Slutligen finns andra teknologier och modulkonstruktioner (exempelvis flexibla moduler) med potential att minska klimatpåverkan från solceller, både genom lägre klimatpåverkan från tillverkningen och genom att öka solcellernas effektivitet.

Klimatpåverkan från tillverkning orsakas huvudsakligen av energianvändning i olika processer och därmed blir elmixen vid tillverkning avgörande för klimatpåverkan. Elmixen är starkt kopplad till det lokala elsystemet, vilket innebär att tillverkningsland för kiselråvaran, solceller, solcellsmoduler med mera kan bli en nyckelfaktor för att åstadkomma klimateffektiva solcellsmoduler. Eftersom tillverkningen idag sker främst i Kina och övriga asiatiska länder, som har en betydande andel kolkraft i elmixen, orsakas en stor del av klimatpåverkan från dagens solceller av den fossilbaserade elen i dessa länder.

## RAPPORTEN I 10 MENINGAR

- Störst växthusgasutsläpp i en solcellsmoduls livscykel sker vid tillverkningen.
- Klimatpåverkan från den el som används i tillverkningen är den tyngst vägande faktorn i livscykelanalysen.
- Tillverkning av kisel-moduler medför större klimatpåverkan än tunnfilmsmoduler.
- Tillverkning av mono-kristallina kiselmoduler medför större klimatpåverkan än multi-kristallina.
- Nya kiselcellsteknologier såsom PERC minskar klimatpåverkan jämfört med standardteknik.
- Dubbelsidiga kiselceller kan ge minskad klimatpåverkan jämfört med enkelsidiga.
- Flexibla och ramlösa moduler kan ge minskad klimatpåverkan.
- Ännu lägre klimatpåverkan är möjligt med nya tillverknings-teknologier.
- Vid likvärdig tillverkning bör produkter och tillämpningar med högre elproduktion premieras.
- Vid jämförelse mellan produkter är klimatpåverkan per nominell effekt (kWp) bästa måttet.

# Ord- och begreppslista

Ord/Begrepp	Förklaring
Al-BSF	Aluminum-Back Surface Field (ungefär: Aluminium-baksida yt-fält)  Beteckning på en teknologi för (eller typ av) kiselceller. Al-BSF solceller var under många år de-facto standarden för kiselceller, men tappar nu marknadsandelar till PERC m.m.
Dubbelsidiga solceller eller moduler (eng. Bifacials)	Solceller respektive solcellsmoduler som omvandlar ljus från både fram- och baksida till el.
CdTe	Cadmium Telluride, kadmium-tellurid  Halvledarmaterial som används som fotoaktivt material i en viss typ av tunnfilmssolceller. Denna typ kallas då vanligen CdTe-solceller.
CIGS, eller CIS	Copper Indium (Gallium) Selenide, koppar-indium-(gallium-)selenid  Halvledarmaterial som används som fotoaktivt material i en viss typ av tunnfilmssolceller. Denna typ kallas då vanligen CIGS-solceller eller CIS-solceller.
EPD	Environmental Product Declaration, miljövarudeklaration  Deklaration av miljöpåverkan från en produkts livscykel, enligt ISO 14025.
Heterojunctionceller	Solceller som kombinerar två olika halvledarmaterial, vanligtvis för att få till en högre verkningsgrad.
IEA PVPS	International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme
PEF	Product Environmental Footprint, produkters miljöavtryck  Europeiska Unionens rekommenderade metod för livscykelanalys av produkter.
PERC	Passivated Emitter and Rear Cell/Contact  Beteckning på en teknologi för (eller typ av) kiselceller. Se även förklaring under PERx.
PERL	Passivated Emitter and Rear Locally diffused

Ord/Begrepp	Förklaring
	Beteckning på en teknologi för (eller typ av) kiselceller. Se även förklaring under PERx.
PERT	Passivated Emitter and Rear Totally diffused  Beteckning på en teknologi för (eller typ av) kiselceller. Se även förklaring under PERx.
PERx	Samlingsnamn för ett antal snarlika tekniker för högeffektiva kiselceller. Omfattade tekniker är PERC, PERL, PERT och ibland även TOPCon. Samtliga dessa tekniker appliceras på kiselcellernas baksida och ökar verkningsgraden.  Se även (RISE, 2019) avsnitt 2.3.1.3
SGS	Solar Grade Silicon, ungefär: solcellskvalitet kisel
TOPCon	Tunnel Oxide Passivated Contact  Beteckning på en teknologi för (eller typ av) kiselceller. Se även förklaring under PERx.
UMG	Upgraded Metallurgical Grade, uppgraderad metallurgisk kvalitetsklass

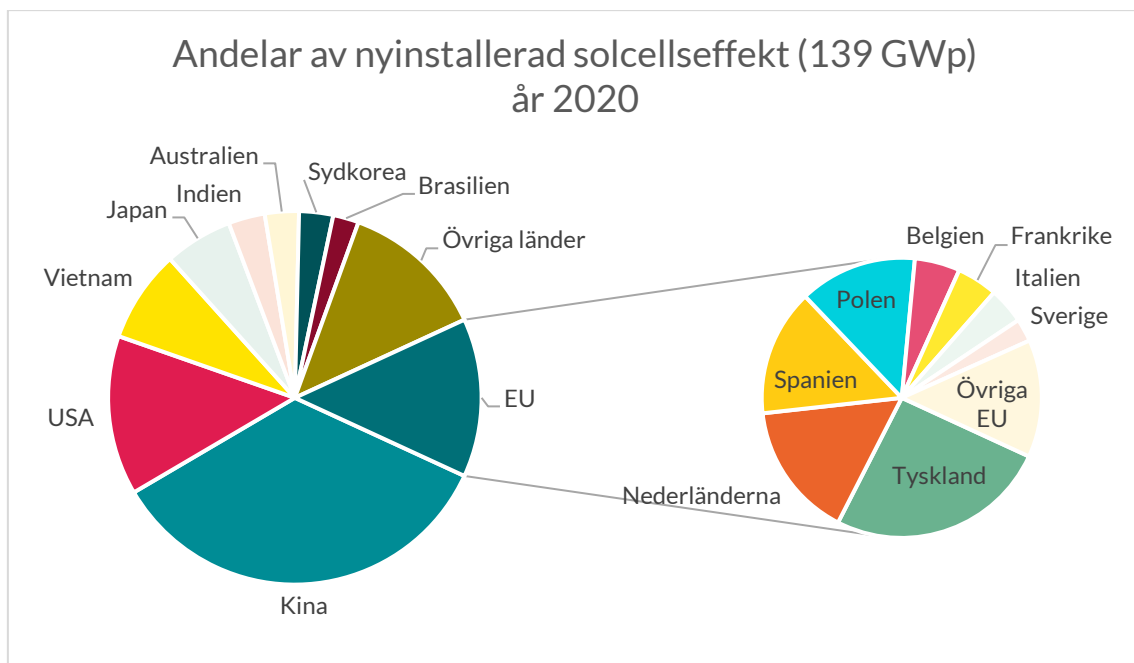
Referenser för detta avsnitt:

RISE, Energi och cirkulär ekonomi. 2019. "[Marknadsöversikt för solcellsmoduler, växelriktare, infästningsanordningar och kompletta system](#)". 9P04225-03. Borås: RISE Research Institutes of Sweden

# 1 Solcellsmarknaden

En analys av klimatpåverkan från solcellsmodulers tillverkning skapar praktisk nytta först när den relaterar till utbudet på solcellsmarknaden. Dominerande solcellsteknologier bör finnas med i jämförelser, medan teknologier med små eller marginella marknadsandelar främst är intressanta ifall deras klimatpåverkan skiljer sig väsentligt från de dominerande teknologiernas påverkan. På liknande sätt är det relevant att ta hänsyn till i vilka länder tillverkning av solcellsmoduler och delprodukter sker. Årliga marknadsrapporter för den svenska marknaden publiceras inom IEA PVPS (International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme), men dessa innehåller inga specifika uppgifter kring marknadsandelar för olika cellteknologier eller tillverkningsländer. I denna rapport utgår vi därför från globala marknadsuppgifter och antar att denna data är representativ även för Sverige.

Eftersom analysen i denna rapport syftar till att stödja svenska inköpare i att ställa klimatkrav på solcellsmoduler är det även intressant att betrakta Sveriges andel av den globala solcellsmarknaden. Rimligen så har inköparkollektivet på stora marknader lättare att få gehör för sina krav eller önskemål från tillverkarna än vad inköpare på små marknader har. Olika länders andel av den globala marknaden för solcellsmoduler visas i Figur 1 och där framgår tydligen att Sverige är en liten marknad med en andel som uppskattas vara knappt 0,4 % av världsmarknaden (IEA-PVPS, 2021). För svenska inköpare kan det därför underlätta vid kravställning om det går att använda initiativ som pågår på större eller över flera olika marknader (se avsnitt 5.2).



Figur 1 Marknadsandelar per land för nyinstallerad solcellseffekt år 2020 för de största marknaderna i världen (vänstra cirkeldiagram) och EU (höger cirkeldiagram). Källa: IEA-PVPS (2021)

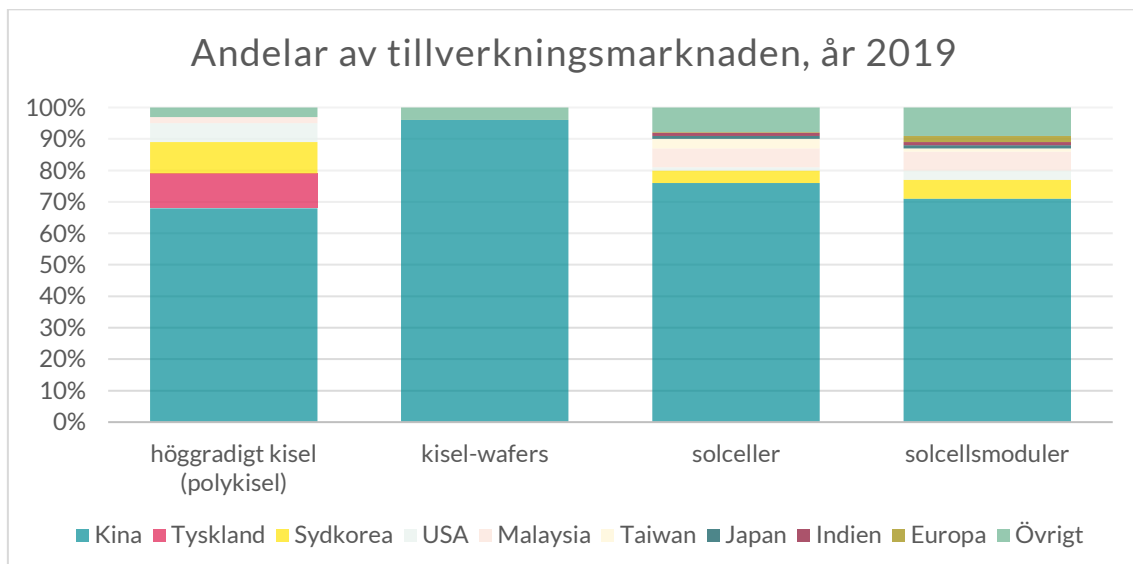


### Referenser för detta avsnitt:

IEA PVPS. 2021. "Snapshot of Global PV Markets - 2021". IEA-PVPS T1-39: 2021. Paris, France: IEA PVPS, International Energy Agency. [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA\\_PVPS\\_Snapshot\\_2021-V3.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA_PVPS_Snapshot_2021-V3.pdf).

## 1.1 Vanligaste tillverkningsländer

Tillverkningen av solcellsmoduler sker till största del i Kina, som år 2019 stod för ungefär 71 % av den sammanlagda modultillverkningen i världen (ca 140 GWp). Av de resterande 29 % sker en stor del i andra asiatiska länder och Europa står för endast 2 % av global modultillverkning (Masson & Kaizuka, 2020). I Sverige fanns 2019 två modultillverkare, SweModule och Midsummer, som producerade 1 MWp kiselmoduler respektive 0,36 MWp CIGS-tunnfilmsmoduler. Sveriges andel av global modultillverkning var därmed ganska exakt 10 miljondelar (Lindahl m.fl., 2020).



Figur 2 Marknadsandelar per land för tillverkning av solcellsmoduler och delprodukter år 2019 för de största marknaderna i världen. Källa: Masson & Kaizuka (2020)

Figur 2 visar olika länders marknadsandelar för delprodukter och solcellsmoduler. Sett till tillverkning av solceller och kisel-solcellernas delprodukter polykisel (höggradigt kisel) och kisel-wafers så dominerar kinesisk tillverkning även där, med marknadsandelar på omkring 75 %, 95 % respektive 68 %. Europeiska länder har marginella marknadsandelar, med undantag för Tysklands andel (ca 10 %) i tillverkning av polykisel (Masson & Kaizuka, 2020). Mer om delprodukter och tillverkningssteg vid tillverkning av kisel-solcellsmoduler finns beskrivet i avsnitt 2.3.

### Referenser för detta avsnitt:

Lindahl, Johan, Mårten Dahlberg Rosell, och Amelia Oller Westerberg. 2020. "National Survey Report of PV Power Applications in Sweden 2019". IEA PVPS. [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/08/NSR\\_Sweden\\_2019.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/08/NSR_Sweden_2019.pdf).

Masson, G., och I Kaizuka. 2020. "Trends in Photovoltaic Applications 2020". T1-38:2020. Paris, France: IEA PVPS, International Energy Agency.

### 1.1.1 Tillverkningslandets betydelse för klimatpåverkan

I vilket land eller vilken region en solcellsmodul, solcell eller annan delprodukt tillverkas får betydelse för klimatpåverkan genom den elmix som används vid tillverkningen. Elmixen beskriver vilka olika produktionsslag som används för att framställa elen och används för att beräkna hur stor andel varje produktionsslag bidrar med till klimatpåverkan. Elmixen i Sverige och Norden domineras av produktionsslag med låga växthusgasutsläpp (bl.a. vattenkraft, kärnkraft, vindkraft) och andelen el från fossila källor är mycket liten. Andra länder, som exempelvis Kina, har en betydande andel fossil elproduktion, som kolkraft, i elmixen. Per kilowattimme (kWh) el är den genomsnittliga klimatpåverkan därför betydligt större för Kinas elmix än för Sveriges eller Nordens elmix. Ju mer energikrävande en viss tillverkningsprocess är desto större blir genomslaget av att kunna använda en elmix med låga växthusgasutsläpp.

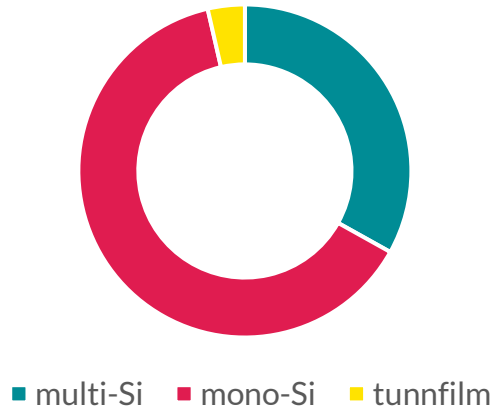
Mer om vikten och utmaningar i att välja en representativ elmix vid beräkning av klimatpåverkan finns att läsa i avsnitt 4.3.

## 1.2 De vanligaste solcellsteknologierna

Inom solcellsbranschen pratas det ofta om tre generationer solcellsteknologi: den första generationen består av kristallina kiselsolceller (mono- och multikristallint kisel); den andra generationen omfattar olika tunnfilmssolceller (CIGS eller CIS, CdTe, amorft och mikroamorft kisel); och den tredje generationen används främst för att beskriva nya teknologier (t.ex. grätzelceller, perovskiter, organiska solceller) som inte har fått något kommersiellt genomslag än förutom möjligen i mycket begränsade nischmarknader (RISE, 2019).

Världsmarknaden för solcellsmoduler utgörs till cirka 96 % av kristallina kiselsolceller, där monokristallina solcellsmoduler är vanligare än multikristallina. Den pågående trenden, som började omkring 2017 och förväntas fortsätta, är att monokristallina kiselsolceller tar marknadsandelar på bekostnad av multikristallina kiselsolceller (Fischer m.fl., 2021). Samtliga tunnfilmsteknologier tillsammans står för de resterande 4 % (Masson & Kaizuka, 2020). Tunnfilmens andel av modulproduktionen har varit låg i både absoluta och relativa tal och har i flera år legat omkring 5 % (Masson & Kaizuka, 2020).

## Solcellsteknologiers andel på världsmarknaden, år 2019



Figur 3 Olika solcellsteknologiers andel av den totala tillverkade kapaciteten solcellsmoduler för 2019. Källa: Masson & Kaizuka (2020).

En annan trend som pågår inom kristallina kiselceller (både monokristallina och multikristallina sådana) är att teknologier som PERC, PERL, PERT och TOPCon (vidare kallade för PERx-tekniker), som alla ökar cellverkningsgraden, fortsätter att vara den dominerande celltypen i minst tio år framåt. Under samma period förväntas heterojunctionceller öka marknadsandelar till ca 18 %. På modulnivå förväntas dubbelsidiga solcellsmoduler bli allt vanligare och öka från ca 20 % år 2020 till ca 70 % år 2031 (Fischer m.fl., 2021). För en mer ingående förklaring av de olika teknologierna nämnda här hänvisas till marknadsöversikten som RISE tagit fram på uppdrag av Energimyndighetens Testlab (RISE, 2019).

### Referenser för detta avsnitt:

- Fischer, Markus, Michael Woodhouse, Susanne Herritsch, och Jutta Trube. 2021. "International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV), 2020 Results". VDMA e.V., Photovoltaic Equipment. [itrpv.vdma.org](http://itrpv.vdma.org).
- Masson, G., och I Kaizuka. 2020. "Trends in Photovoltaic Applications 2020". T1-38:2020. Paris, France: IEA PVPS, International Energy Agency.
- RISE, Energi och cirkulär ekonomi. 2019. "Marknadsöversikt för solcellsmoduler, växelriktare, infästningsanordningar och kompletta system". 9P04225-03. Borås: RISE Research Institutes of Sweden. <https://www.energimyndigheten.se/globalassets/tester/marknadsoversikt-for-solcellsmoduler-vaxelriktare-infastningsanordningar-och-kompletta-system-191121-sigenerad.pdf>.

## 2 En solcellsmoduls livscykel

### 2.1 Från råvaruvinning till återvinning

I en livscykelanalys (LCA) beräknas miljöpåverkan för en produkt eller en tjänst under hela eller delar av dess livscykel. En produkts livscykel startar med råvaruutvinning och avslutas med avfallshantering och återvinning. Miljöpåverkan från produkter och processer delas in i flera olika miljöpåverkanskategorier, till exempel klimatpåverkan eller övergödning. Inom det här projektet ligger fokus på solcellernas klimatpåverkan men det är viktigt att vara medveten om att miljöpåverkan kan se olika ut i de olika miljöpåverkanskategorierna. I en jämförande studie kan en produkt med minst klimatpåverkan i stället ha störst miljöpåverkan i en annan miljöpåverkanskategori, och vilken miljöpåverkanskategori som är viktigast att ta hänsyn till är en bedömnings- och värderingsfråga.

I standarden SS-EN 15978:2011 "Hållbarhet hos byggnader" definieras hur en LCA ska genomföras för byggnader. Tabell 1 visar de olika delarna av en byggnad eller byggprodukts livscykel.

Tabell 1 Byggnader och byggprodukters livscykelsteg i enlighet med SS-EN 15978:2011

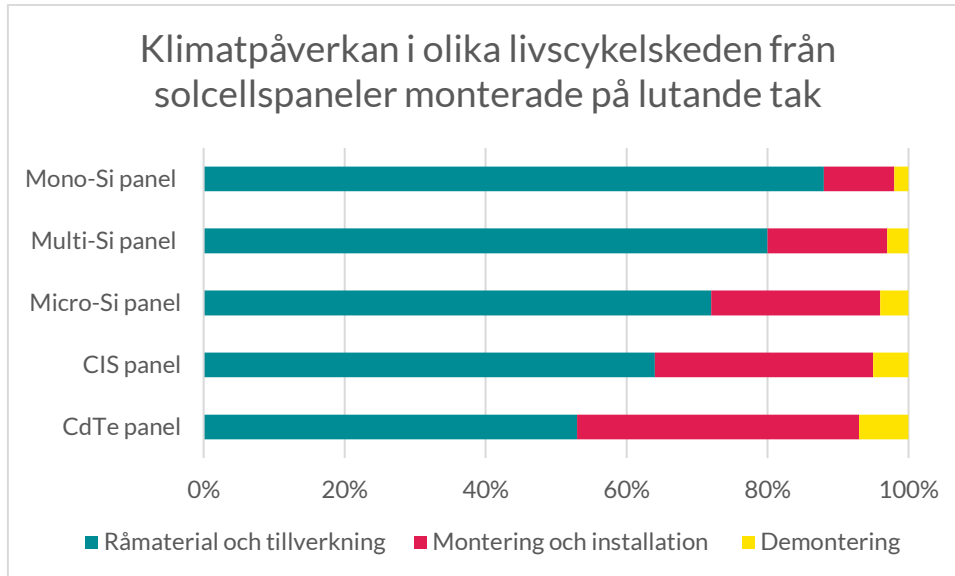
Manufacturing stage			Distribution stage	Installation stage	Use								De-Installation stage	End-of-life stage			Resource recovery stage
Raw Material	Transport	Manufacturing	Transport	Assembly/Install	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	De-construction and demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse-Recovery Recycling-potential	
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	

### 2.2 Vikten av livscykelnas olika steg för klimateffektivitet

En livscykelanalys kan beakta hela eller delar av en produkts livscykel. I detta kapitel läggs fokus på klimatpåverkan från solceller över hela livscykeln samt i olika tillverkningssteg.

Då solcellers klimatpåverkan studeras över hela produktens livscykel pekar resultaten tydligt mot att huvuddelen av klimatpåverkan sker i de tidiga stegen i solcellernas livscykel, under tillverkning (Stolz, Frischknecht, Wyss & de Wild-Scholten 2016). Se Figur 4. För kiselbaserade solcellstekniker (mono-Si och multi-Si) är tillverkningsstadiet mycket dominerande för klimatpåverkan över livscykeln. Det beror delvis på att dessa

tekniker är mer materialintensiva än teknikerna för att tillverka tunnfilmsolceller (CI(G)S och CdTe).



Figur 4 Klimatpåverkan från solceller över hela livscykeln (Stolz m.fl., 2016).

För att kunna fokusera på processerna och teknologierna med störst klimatpåverkan behöver vi betrakta tillverkningsprocessens olika steg. Nästa avsnitt beskriver dessa steg och tillhörande relativ klimatpåverkan för den marknadsdominerande solcellsteknologin kristallina kiselmoduler. Tillverkning av tunnfilmsmoduler beskrivs inte i mer detalj, men kan något förenklat beskrivas med endast ett steg: modultillverkning.

#### Referenser för detta avsnitt:

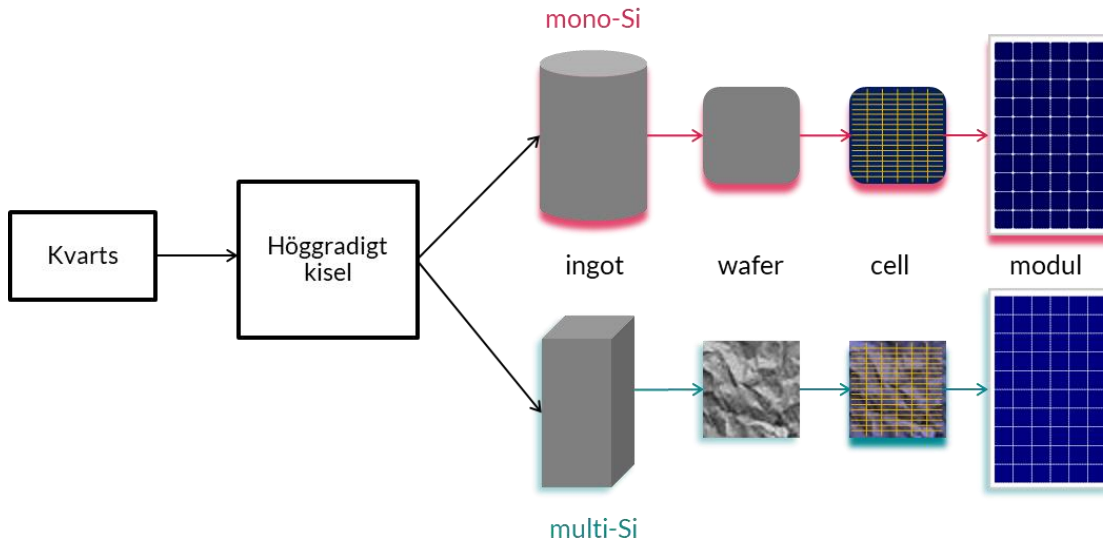
Stolz, Philippe, Rolf Frischknecht, och Franziska Wyss. 2016. "PEF Screening Report of Electricity from Photovoltaic Panels in the Context of the EU Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) Pilots, v 2.0".

## 2.3 Tillverkningssteg för kristallina kisel-solcellsmoduler

Tillverkningsprocesserna för att tillverka mono- och multikristallina solceller har flera likartade produktionssteg. En schematisk bild av tillverkningsprocessen för mono- och multikristallina solceller visas i Figur 5.

Processen för att tillverka både mono- och multikristallina solcellsmoduler börjar med att kvartssand reduceras till metallurgiskt kisel (Mertens 2014). Metallurgiskt kisel behöver ytterligare rening för att uppnå den kvalitet som krävs för användning i solceller. Kisel med önskad renhetsgrad kallas i denna rapport för höggradigt kisel. Beroende på vilken process som används för att framställa höggradigt kisel används olika benämningar. Siemens-processen är en vanligt förekommande process för framställning av höggradigt kisel och slutprodukten kallas då solar grade silicon (SGS).

För att framställa monokristallina kiselceller används Czochralskiprocessen, eller CZ-processen (Mertens 2014). Högradigt kisel smälts och en frökristall doppas långsamt och roterande i smältan. Flytande kisel kristalliserar på ytan och monokristallina kiselstavar formas, vilka kallas ingot.



Figur 5 Schematisk bild över tillverkningsstegen för att producera kristallina solceller. Mono-Si står för monokristallint kisel. Multi-Si står för multikristallint kisel.

Multikristallint kisel har en enklare tillverkningsprocess (Mertens 2014). Högradigt kisel smälts och gjuts i en form där det sedan tillåts att svalna nedifrån, på ett sådant sätt att en multikristallin struktur bildas i en kiselstav, som även denna kallas ingot.

Både mono- och multikristallina ingots klyvs till tunna blad (wafers). Tillverkningen av solceller från wafers genomförs därefter i flera steg och är relativt energikrävande. Solceller seriekopplas och fram- och baksida skyddas med glas eller polymerskikt. Slutligen förses solcellsmodulen vanligen med en ram, även om ramfria moduler förekommer.

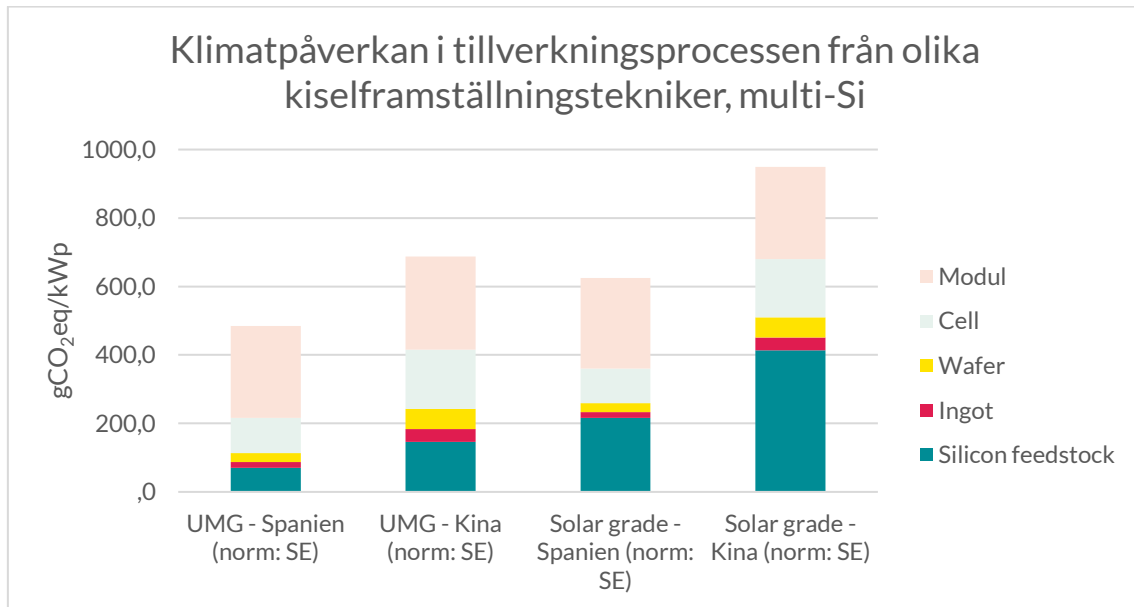
#### Referenser för detta avsnitt:

Mertens, Konrad. 2014. *Photovoltaics: fundamentals, technology and practice*. Chichester, West Sussex, UK: Wiley.

### 2.3.1 Relativ klimatpåverkan från olika tillverkningssteg för kiselmoduler

Vid en detaljerad livscykelanalys i tillverkningskedet av en multikristallin kiselcell ser fördelningen av klimatpåverkan i olika tillverkningssteg ut enligt Figur 6. I figuren visas solceller tillverkade med Solar Grade Silicon i Spanien (SGS-ES) och Solar Grade Silicon i Kina (SGS-CN). Under tillverkningens första steg är det kisel framställning (silicon feedstock) som har störst klimatpåverkan. Därefter ger både celltillverkning och modultillverkning väsentliga bidrag till klimatpåverkan. Både kisel framställning och celltillverkning är energiintensiva processer och har således stor klimatpåverkan. Modultillverkning är inte en lika energiintensiv process men däremot finns bidrag från bland annat aluminium, glas och solcellsmodulens baksida.

This work by RISE Research Institutes of Sweden is, except where otherwise noted, licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



Figur 6 Klimatpåverkan från solceller i olika tillverkningssteg (Méndez et al 2021)

I Figur 6 är det också tydligt att tillverkningsland påverkar klimatpåverkan från tillverkningen av solcellsmoduler. Det beror på att energianvändningen under tillverkningen är så pass hög att klimatpåverkan från elmixen som används i produktionen är avgörande för slutlig klimatpåverkan.

Referenser för detta avsnitt:

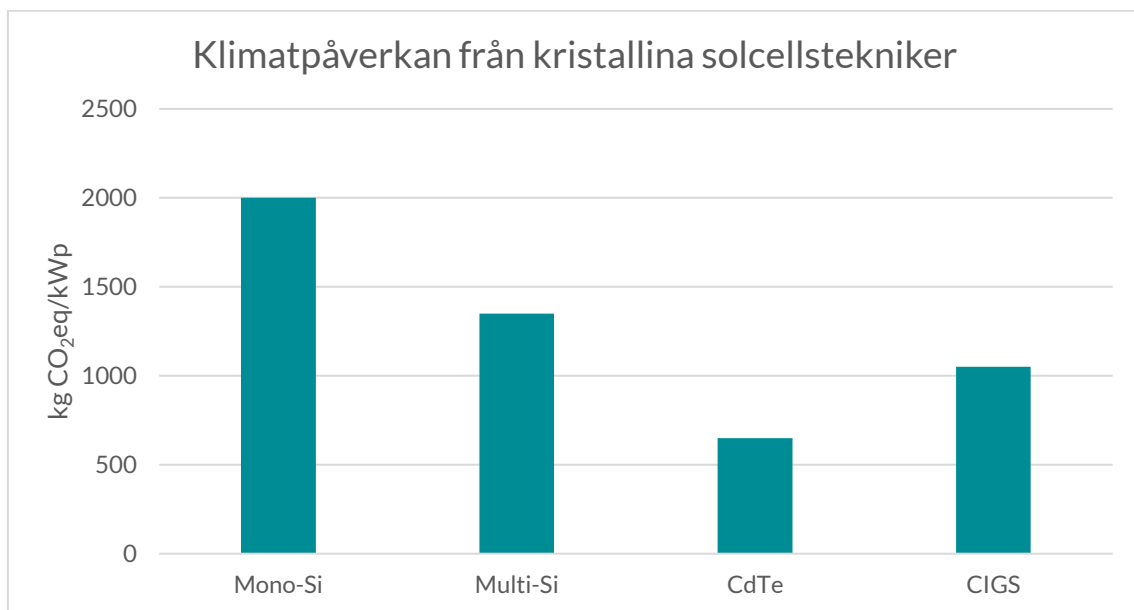
Méndez, Laura, Eduardo Forniés, Daniel Garrain, Antonio Pérez Vázquez, Alejandro Souto, och Timur Vlasenko. 2021. "Upgraded metallurgical grade silicon and polysilicon for solar electricity production: A comparative life cycle assessment". *Science of The Total Environment* 789 (oktober): 147969. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147969>.

## 3 Jämförelse av klimatpåverkan för olika teknikval

I detta kapitel presenteras ett antal jämförelser av klimatpåverkan från olika solcellsteknologier samt några resonemang kring teknologi- och konstruktionsval som har betydelse för den slutliga klimatpåverkan från solcellsmoduler. Omfattning och urval av teknologier baserar sig på vilka teknologier som är vanliga på marknaden (se Avsnitt 1.2) samt på vilka teknologier som har väsentligt olika klimatpåverkan.

### 3.1 Tunnfilm jämfört med kiselceller

Valet mellan tunnfilmssolceller eller kiselbaserade solceller görs ofta beroende på tillämpningsområde och önskat utseende efter montering av solcellerna. Ser man till klimatpåverkan har tunnfilmstekniker generellt lägre klimatpåverkan jämfört med de båda kristallina solcellsteknikerna (Fthenakis, 2018; Dodd m.fl., 2020). I Figur 7 illustreras klimatpåverkan över hela livscykeln för mono- och multikristallina solceller tillsammans med två olika tunnfilmstekniker, CdTe och CIGS. Att tunnfilmsteknikerna har lägre klimatpåverkan beror i hög grad på att de är mycket materialsnåla, i och med att de aktiva materialen består av så tunna skikt.



Figur 7 Klimatpåverkan från kristallina solcellstekniker jämfört med tunnfilmstekniker (Fthenakis 2018).

#### Referenser för detta avsnitt:

Dodd, Nicholas, Nieves Espinosa, Paul Van Tichelen, Karolien Peeters, Ana Soares, European Commission, och Joint Research Centre. 2020. *Preparatory Study for Solar Photovoltaic Modules, Inverters and Systems: Final Report*. [https://op.europa.eu/publication/manifestation\\_identifier/PUB\\_KJNA30468ENN](https://op.europa.eu/publication/manifestation_identifier/PUB_KJNA30468ENN).



Fthenakis, Vasilis M. 2018. "Life Cycle Analysis of Photovoltaics: Strategic Technology Assessment". I *A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems*, 427–42. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811479-7.00022-1>.

## 3.2 Multikristallint jämfört med monokristallint kisel

Monokristallina och multikristallina solceller är relativt lika men har vissa skillnader. Verkningsgraden brukar vara högre för monokristallina kiselsolceller än för multikristallina. Förutom verkningsgraden kan skillnader i utseende vara viktiga vid val av en viss cellteknik. Som följd av skillnader i tillverkningsätt och materialsammansättning har monokristallina solceller nämligen en mer enhetlig och mörkare blå färg och rundade hörn, medan multikristallina solceller har olika blåa nyanser och helt raka hörn. Gällande klimatpåverkan från de olika kiselsolcellerna har monokristallina solceller en mer energikrävande tillverkningsprocess vilket generellt resulterar i högre klimatpåverkan för monokristallina (mono-Si) solceller jämfört med multikristallina (multi-Si) solceller, då de tillverkas under i övrigt jämförbara förutsättningar (Fthenakis 2018). Se Figur 7.

På senare år har ytterligare en variant av kiselsolceller dykt upp på marknaden, dock i mycket liten skala (Dodd m.fl., 2020), som framöver kallas för "quasi-mono". I andra sammanhang refereras till samma teknik som "cast-mono" eller "mono-like". Ingoten för denna typ av solceller tillverkas i en process som liknar multikristallina kiselringot, fast med en grundplatta av monokristallint kisel. En del av den resulterande ingoten som tillverkas från den får då en kristallstruktur som är (mycket) lik monokristallint kisel och den ingotdelen används till att göra wafers. Solcellerna som görs från dessa wafers blir quasi-mono kiselsolceller. I verkningsgrad närmar sig dessa celler prestandan från riktiga monokristallina solceller, medan energianvändning och växthusgasutsläpp från tillverkningen närmar sig den för multikristallina solceller. Klimatpåverkan för quasi-mono ingottillverkning är cirka 77% lägre än för monokristallina ingots (Riepe, 2020; Fthenakis, 2018). På grund av ökat spill i tillverkning av wafers från quasi-mono ingots är åtgången av höggradigt kisel större (Riepe, 2020). Övriga tillverkningssteg för quasi-mono solcellsmoduler har liknande klimatpåverkan som för andra kiselsolcellsmoduler. Studierna på quasi-mono solceller som refererats till ger inte något uttömmande svar till var denna teknik hamnar i jämförelse med mono- och multikristallina solceller. Svaret kommer också att vara beroende på verkningsgradsskillnader (se Avsnitt 3.4). Studierna pekar dock mot att tillverkning av quasi-mono solcellsmoduler troligen har lägre klimatpåverkan per kWp än av mono-kristallina moduler.

### Referenser för detta avsnitt:

Dodd, Nicholas, Nieves Espinosa, Paul Van Tichelen, Karolien Peeters, Ana Soares, European Commission, och Joint Research Centre. 2020. *Preparatory Study for Solar Photovoltaic Modules, Inverters and Systems: Final Report*. [https://op.europa.eu/publication/manifestation\\_identifier/PUB\\_KJNA30468ENN](https://op.europa.eu/publication/manifestation_identifier/PUB_KJNA30468ENN).

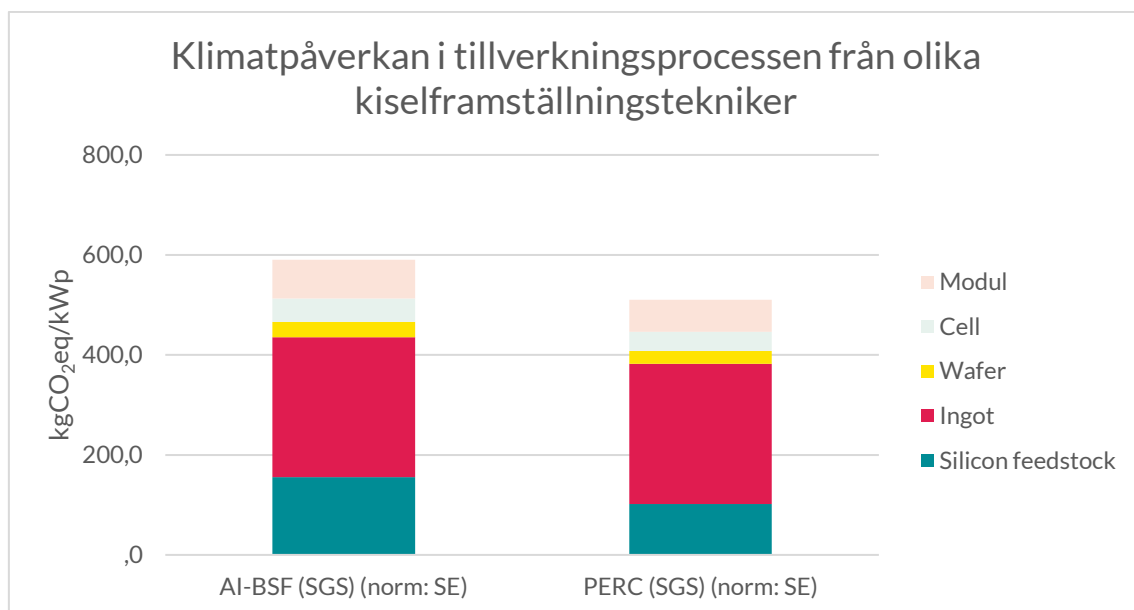
Fthenakis, Vasilis M. 2018. "Life Cycle Analysis of Photovoltaics: Strategic Technology Assessment". I *A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems*, 427–42. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811479-7.00022-1>.

Riepe, S., S. Nold, P. Brailovsky, P. Krenckel, L. Friedrich, S. Janz, och R. Preu. 2020. "Cast-Mono Silicon Wafers for a Sustainable PV Market Growth". Application/pdf. *37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 121-125*, 5 pages, 3107 kb. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20202020-2AO.4.3>.

## 3.3 Dagens och morgondagens kiselteknologi

### 3.3.1 PERx, heterojunction och dubbelsidiga moduler

De allra flesta befintliga LCA-studierna studerar Al-BSF cellteknologin som dominerade marknaden för ett antal år sedan. Som beskrivits i avsnitt 1.2 är det numera PERx-celler som har störst marknadsandel. Figur 8 och Figur 9 visar resultat från studier som jämför klimatpåverkan från PERC-solcellsmoduler med bland annat den tidigare standardcellen av typ Al-BSF. För PERC-cellerna baseras resultaten på data för Al-BSF-moduler med tillägg av tillkommande delprocessteg i celltillverkningen (Lunardi m.fl., 2018; Dodd m.fl., 2020). De absoluta siffrorna skiljer sig mellan studier på grund av olika antaganden om bl.a. tillverkningsland och elmix, men viktigt här är att fokusera på de relativa skillnaderna.

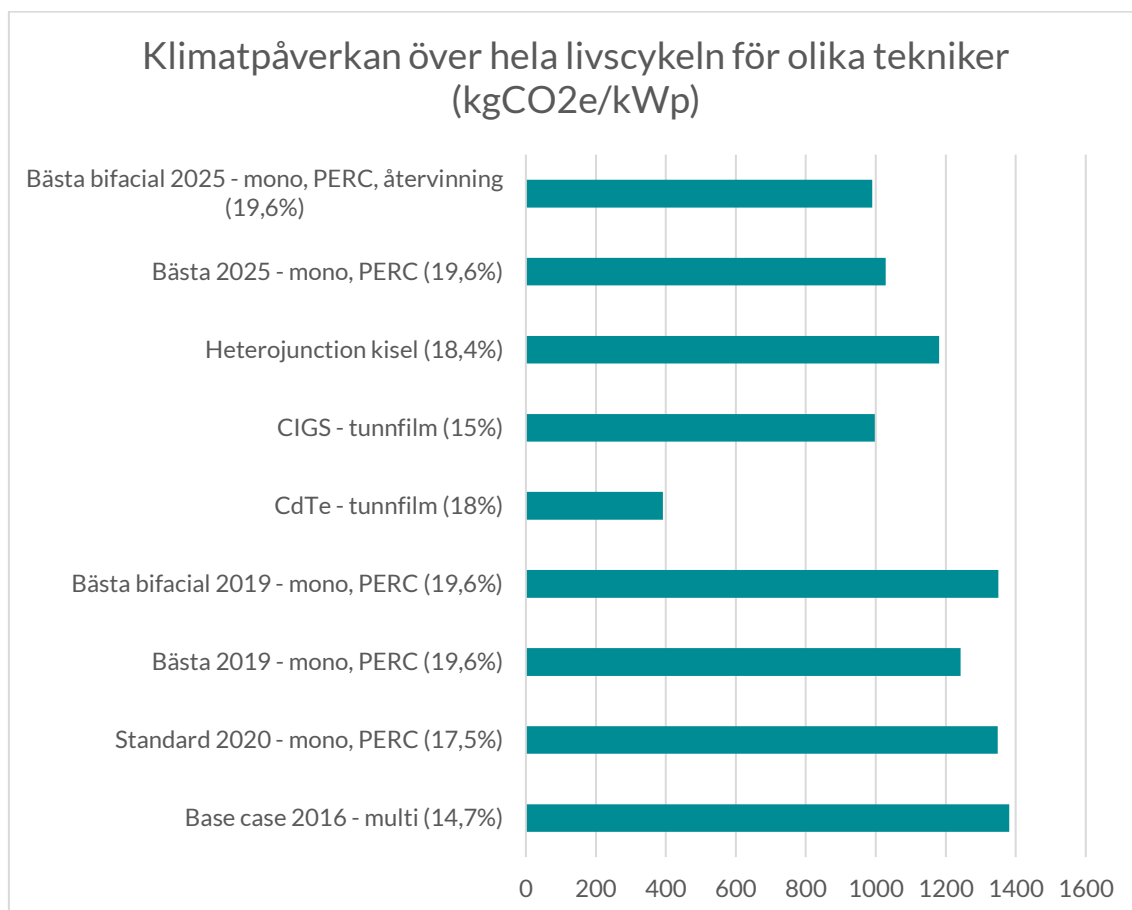


Figur 8 Jämförelse av klimatpåverkan från monokristallina kiselmoduler med PERC eller Al-BSF-solceller. Bearbetning av data från Lunardi m.fl. (2018).

De extra delprocesstegen för PERC-solcellerna ökar visserligen resursanvändningen och därmed även klimatpåverkan per solcellsmodul, men PERC-teknologins uppsida genom en högre verkningsgrad på solcellerna kompenserar för detta, så att PERC-moduler har en lägre klimatpåverkan per kWp än Al-BSF-moduler ("Al-BSF (SGS) i Figur 8; "Base case 2016 – multi" i Figur 9).

Andra teknologier som förväntas ta allt större marknadsandelar (se avsnitt 1.2) är dubbelsidiga (bifacial) solcellsmoduler och heterojunction-solceller. Klimatpåverkan från tillverkning med dessa teknologier redovisas också i Figur 9. Heterojunction kisel-solcellmoduler uppskattas åstadkomma lägre klimatpåverkan från tillverkning än

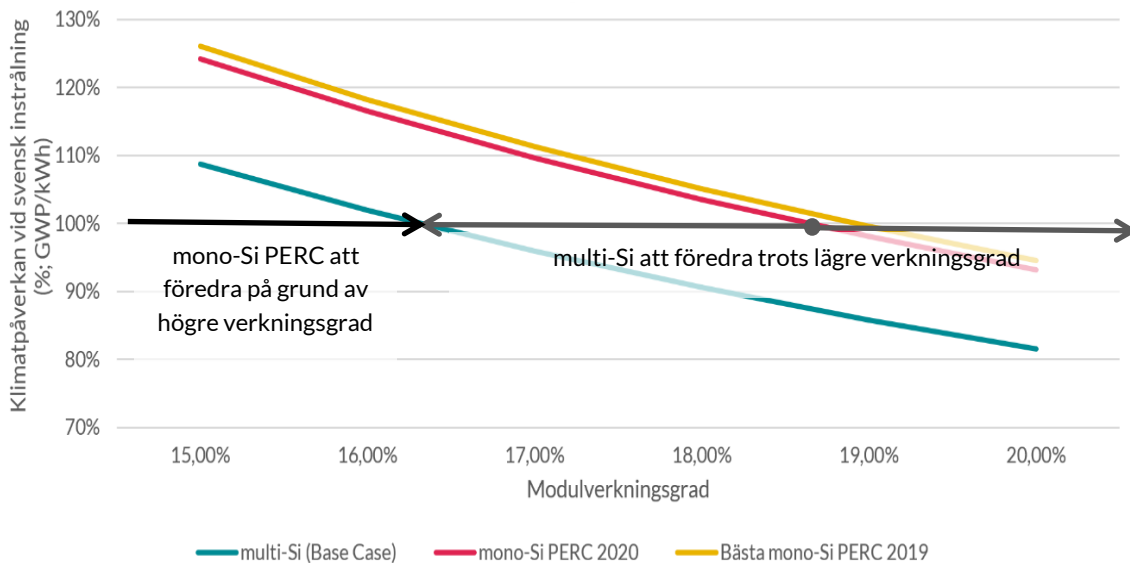
dagens PERC-moduler. Samtidigt förväntas ytterligare minskning av koldioxidavtryck med teknologiförbättringar fram till 2025. Gällande dubbelsidiga moduler så har dessa högre klimatpåverkan per nominell effekt om endast framsidans effekt räknas (som i Figur 9), men beroende på hur mycket extra instrålning som tas emot på baksidan så kan den effektiva klimatpåverkan bli lägre. I fallet för 2019 års bästa tillgängliga teknologi har dubbelsidiga moduler en något bättre klimatprestanda än enkelsidiga redan vid 10 % instrålning på baksidan.



Figur 9 Jämförelse av teoretiskt uppskattad klimatpåverkan för solceller från olika modultyper och cellteknologier. "Bästa" antyder bästa tillgängliga teknologi för angivet årtal. Modulverkningsgrader anges i parentes. Nominell effekt för dubbelsidiga (bifacial) moduler inkluderar endast framsidan. Bearbetning av data från Dodd et al. (2020)

Valet mellan multikristallina solceller och dagens mono-kristallina (PERC) solceller behöver inte alltid vara till de multikristallina cellernas nackdel. Resultatet beror nämligen på hur stor verkningsgradskillnaden är. Figur 10 illustrerar detta med ett exempel där den relativa klimatpåverkan per producerad kWh från multikristallina solcellsmoduler jämförs med den för två monokristallina PERC-moduler. Klimatpåverkan per modul antas här vara oberoende av verkningsgraden. Grafen visar då att den multikristallina modulen (med lägst klimatpåverkan från modultillverkningen) är det klimateffektivaste valet så länge verkningsgraden endast är dryga 2 % lägre än för PERC-modulerna. Vid större skillnad i verkningsgrad är någon av PERC-modulerna att föredra. Vilken PERC-modul som är klimateffektivast beror återigen på skillnaden i verkningsgrad, men här räcker det med en skillnad på mindre än 0,5 % för att 2019 års bästa modul bör väljas över 2020 års standardmodul. Kom dock ihåg att detta exempel är baserat på för solcellsmarknaden representativa val av

tillverkningsätt och elmix och att förhållandena för enstaka moduler troligen ser annorlunda ut.



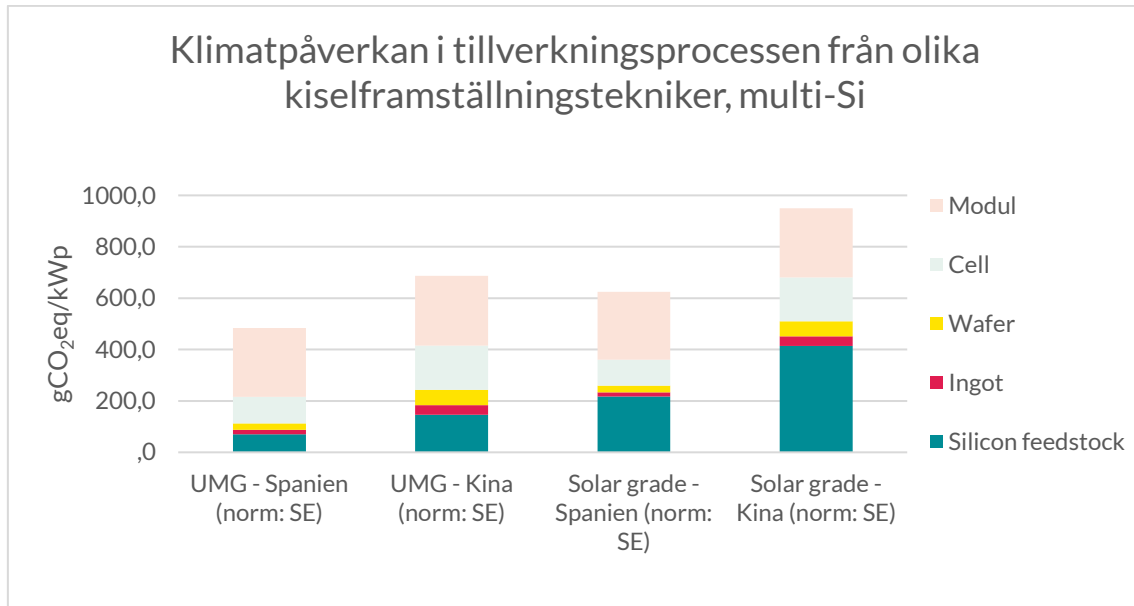
Figur 10 Exempel som visar samband mellan klimatpåverkan per producerad elmängd (kWh) och modulverkningsgrad för en solcellsteknologi med lägre klimatpåverkan från tillverkning (multi-Si) och två solcellsteknologier med högre klimatpåverkan från tillverkning (mono-Si PERC). Bearbetning av data från Dodd et al. (2020)

#### Referenser för detta avsnitt:

- M. Lunardi, Marina, J.P. Alvarez-Gaitan, Nathan L. Chang, och Richard Corkish. 2018. "Life Cycle Assessment on PERC Solar Modules". *Solar Energy Materials and Solar Cells* 187 (december): 154–59.  
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.08.004>.
- Dodd, Nicholas, Nieves Espinosa, Paul Van Tichelen, Karolien Peeters, Ana Soares, European Commission, och Joint Research Centre. 2020. *Preparatory Study for Solar Photovoltaic Modules, Inverters and Systems: Final Report*.  
[https://op.europa.eu/publication/manifestation\\_identifier/PUB\\_KJNA30468ENN](https://op.europa.eu/publication/manifestation_identifier/PUB_KJNA30468ENN).

### 3.3.2 Högradigt kisel – olika processer

På grund av att framställning av höggradigt kisel är en mycket energiintensiv process finns en strävan efter att utveckla andra, mindre energikrävande processer för att tillverka kisel med tillräckligt hög reningsgrad för användning i solceller. UMG står för upgraded metallurgical grade och är en teknik med lägre energianvändning för att framställa höggradigt kisel. Klimatpåverkan från kiselframställning (silicon feedstock) är lägre för solceller med UMG jämfört med solceller med traditionellt solar grade kisel (SGS), se Figur 11. Lägre energianvändning för framställning av UMG uppnås genom lägre renhetsgrad på kisel, men tillräcklig renhetsgrad för applikation för solceller. I exempelstudien i figuren antas solceller med UMG -ha verkningsgrad på 18,43 % medan verkningsgraden på solceller med SGS antas vara endast marginellt högre, på 18,55 %.



Figur 11 Klimatpåverkan från solcellsmoduler med UMG och SGS (Méndez et al 2021)

#### Referenser för detta avsnitt:

Méndez, Laura, Eduardo Forniés, Daniel Garrain, Antonio Pérez Vázquez, Alejandro Souto, och Timur Vlasenko. 2021. "Upgraded metallurgical grade silicon and polysilicon for solar electricity production: A comparative life cycle assessment". *Science of The Total Environment* 789 (oktober): 147969. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147969>.

## 3.4 Hög eller låg verkningsgrad

Även om två solcellsmoduler och alla dess delar har tillverkats i samma fabrik och med samma processer så kommer den slutliga modulverkningsgraden – och därmed den nominella moduleffekten – att variera mellan modulerna. Det är därför tillverkare delar in slutprodukterna i olika effektklasser inom samma modulserie. Eftersom tillverkningen skett på samma sätt så är klimatpåverkan per modul lika, men klimatpåverkan per Watt nominell effekt (Wp) eller per producerad kilowattimme (kWh) blir lägre för modulerna med högre verkningsgrad. På liknande sätt kan det finnas skillnader mellan solcellsmoduler från olika tillverkare som tillverkats under likvärdiga förhållanden. Givet likvärdiga förutsättningar är det alltså lönt för klimatet att satsa på moduler med högre verkningsgrad.

Det är viktigt att komma ihåg att ovanstående slutsats håller om verkningsgraden i slutprodukten är en följd av fackmannamässigt arbete och optimerade tillverkningsprocesser och inte beror på att celler eller moduler med lite sämre verkningsgrad ratas och ger upphov till mer spill. Att inte använda delprodukter som solceller som redan har tillverkats ger i många fall bara en ökad klimatpåverkan.

## 3.5 Olika modulkonstruktioner

För kristallina kiselmoduler är tillverkningen av själva solcellerna den mest energikrävande processen. För tunnfilmsmodulerna är mängden solcellsmaterial mycket liten och då får användningen av andra material, som aluminium och glas, en stor vikt i modulens sammanlagda klimatpåverkan. Både för tunnfilmsmoduler och för kiselmoduler finns det potential att minska klimatpåverkan genom att välja en lämplig modulkonstruktion.

### 3.5.1 Fram- och baksidan av glas eller polymer

Att använda (transparenta) polymerer som ett alternativ till glas kan ge en minskning av klimatpåverkan från tillverkning av solcellsmodulerna oavsett modulteknologi. För kristallina kiselmoduler finns vanliga modulvarianter med glas på framsidan och polymer på baksidan (glas-polymer), eller med glas på båda sidor (glas-glas). Vanligtvis är glasskivan på glas-polymer-moduler tjockare än de enstaka glasskikten i en glas-glas-modul. Klimatpåverkan av glas och polymer i glas-polymer-moduler är då endast cirka 5% lägre än för glasskivorna i en glas-glas-modul (Müller m.fl., 2021). En möjlig större klimatvinst för glas-glas-moduler kan vara att utesluta aluminiumram, se nästa avsnitt.

För tunnfilmsmoduler är den vanligaste varianten en glas-glas-modul, men det finns även flexibla varianter med polymerskikt på både fram- och baksida. Inga jämförande LCA-studier har hittats för dessa modultyper, men baserat på jämförelsen av glas-glas- och glas-polymer-kiselmoduler (Müller m.fl., 2021) kan en uppskattning göras. Om glasskivorna i tunnfilmsmodulen är lika tjocka som för glas-glas-kiselmoduler och om polymerskiktet har liknande klimatpåverkan från tillverkning så skulle klimatpåverkan från fram- och baksida på en polymer-polymer-tunnfilmsmodul vara cirka en tredjedel jämfört med samma för en glas-glas tunnfilmsmodul.

Användning av polymerer i stället för glas kan påverka livslängden och degraderingen av solcellerna. Litteraturstudien har inte fokuserat på denna fråga, men en översiktlig sökning gav inga entydiga svar i litteraturen om huruvida degraderingseffekter talar för eller emot polymerer. Det är möjligt att effekterna ser olika ut för olika solcellsteknologier.

#### Referenser för detta avsnitt:

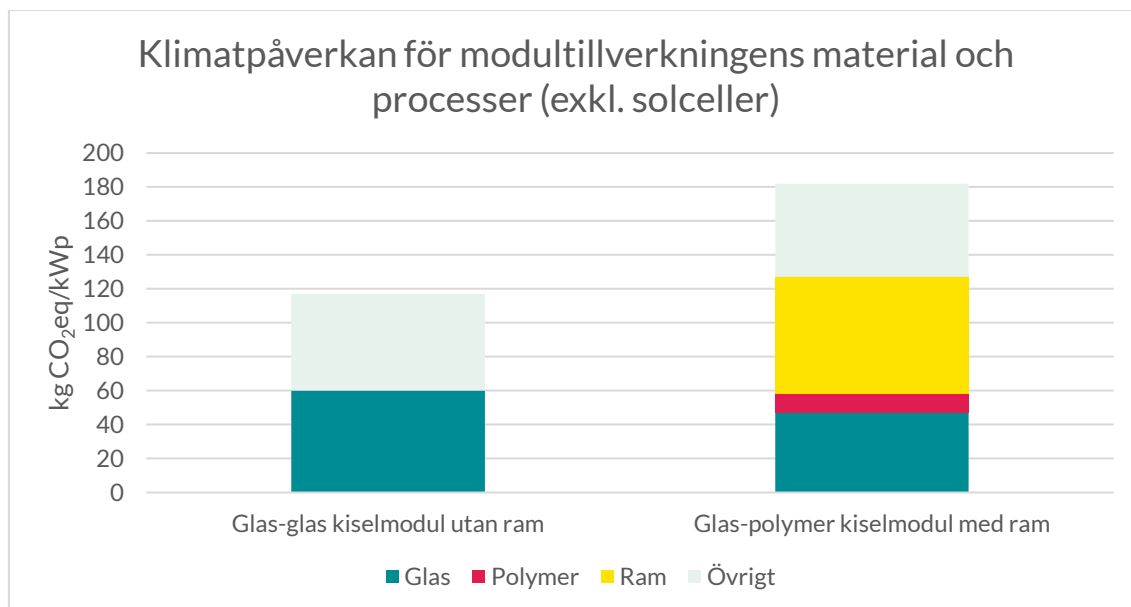
Müller, Amelie, Lorenz Friedrich, Christian Reichel, Sina Herceg, Max Mittag, och Dirk Holger Neuhaus. 2021. "A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory". *Solar Energy Materials and Solar Cells* 230 (september): 111277. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111277>.

### 3.5.2 Solcellsmoduler med eller utan ram

Som nämnts i förra avsnittet kan aluminiumram ge ett betydande bidrag till klimatpåverkan för främst tunnfilmsmoduler. För vanliga glas-polymer-kiselmoduler står modulramen för ungefär 38% av klimatpåverkan från modultillverkningen (exklusive solcellernas tillverkning) (Müller m.fl., 2021). Solcellsmoduler utan ram ger

alltså upphov till lägre koldioxidutsläpp från produktion än i övrigt likadana moduler med ram. Samtidigt kan det vara nödvändigt att ta hänsyn till modulernas användningssätt och -område för att komma fram till en rättvis jämförelse.

Modulramen är till för att skapa en styvare, tåligare modul som klarar av större mekaniska påfrestningar som t.ex. snölast, eller kantstötningar. För låg styvhet eller tålighet kan leda till ökad degradering och kortare livslängd. En solcellsmodul utan ram i samma storlek som en modul med ram behöver därför antagligen andra åtgärder för att kompensera förluster i styvhet och robusthet. Sådana åtgärder kan tänkas vara tjockare glas i modulen, användning av glas på både fram- och baksida (så kallade glas-glasmoduler), eller en monteringslösning som stöttar solcellsmoduler på fler ställen än ett vanligt monteringsystem för inramade moduler. Kompensationsåtgärderna bör inkluderas i jämförelser av klimatpåverkan för solcellsmoduler. För glas-glasmoduler utan ram är klimatpåverkan från modultillverkningen cirka 35% lägre än för glas-polymermoduler med ram, se Figur 12, givet en något tjockare glasskiva i glas-polymermodulen. Denna kunskapssammanställning omfattar i övrigt inga studier av eller jämförelser mellan andra kompensationsåtgärder.



Figur 12 Jämförelse av klimatpåverkan från modultillverkning för en glas-glas solcellsmodul utan ram och en glas-polymer modul med ram. Data avser kiselmoduler tillverkad i Tyskland (exkl. celltillverkning) från Müller m.fl. (2021).

#### Referenser för detta avsnitt:

Müller, Amelie, Lorenz Friedrich, Christian Reichel, Sina Herceg, Max Mittag, och Dirk Holger Neuhaus. 2021. "A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory". *Solar Energy Materials and Solar Cells* 230 (september): 111277. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111277>.

### 3.5.3 Resurseffektiviseringspotential genom byggnadsintegrering

Den vanligaste solcellsmodulen idag monteras antingen utanpå tak eller i solcellsparker. En del solcellsprodukter integreras dock i byggnader, exempelvis som klimatskal på tak eller fasad.

Ett av de troligen vanligare tillämpningsområden för ramlösa och/eller flexibla (glaslösa) solcellsmoduler är byggnadsintegrering, där solcellerna appliceras på eller i en annan produkt. Exempelvis kan flexibla eller glas-glas-moduler utan ram limmas på plåt- eller duktak och få den nödvändiga styvheten och stöttning i konstruktionen från själva tak- eller väggkonstruktionen, så att inga ytterligare monteringsystem behövs.

När byggnadsintegrerade solcellsprodukter kan ersätta andra byggprodukter och minska användning av relativt energiintensiva material som aluminium eller glas så skapas en potential att minska klimatpåverkan på flera plan. Utmaningar vid att omfatta byggnadsintegrering i en jämförande studie är flera. Bland annat så är byggnadsintegrerad solel (också kallad BIPV) idag en nischmarknad med dessutom en stor variation av produkter som därför i regel tillverkas i liten skala. Skalfördelar som dagens konventionella moduler har finns inte på samma sätt för BIPV-produkter, men vilken förbättringspotential finns vid växande marknadsandelar och uppskalning? En annan utmaning är att LCA-data för byggprodukterna som ersätts av BIPV-produkterna behöver tas med i beräkning för en trovärdig livscykelanalys av byggnadsintegrerade solceller. Därför blir det mindre relevant att enbart jämföra klimatpåverkan från solcellsproduktens tillverkningsfas.

Med hänsyn till projektets avgränsningar och ovan nämnda utmaningar har LCA-studier för solcellsmoduler för byggnadsintegrering, eller för byggnadsintegrering av konventionella solcellsmoduler inte beaktats i denna litteraturstudie.



## 4 Svårigheter vid bedömning av klimatpåverkan

I detta kapitel lyfts ett antal av de utmaningar som har påträffats under arbetet med litteraturstudien.

### 4.1 Avsaknad av aktuell data

Litteraturstudien av klimatpåverkan från olika solcellstekniker har präglats av svårigheter att hitta aktuella och tillförlitliga data. Majoriteten av den publicerade forskning som finns inhämtar data från samma källor, daterade åren 2010–2015. Det gäller även de forskningsartiklar som har publicerats i närtid, åren 2019–2021. Solcellsbranschen utvecklas i snabb takt och det är besvärande att nyare data inte finns tillgänglig. En del publikationer använder äldre data och försöker kompensera för teknikutvecklingen på olika sätt. Bristen på nyare data för klimatpåverkan från olika solcellstekniker (både traditionella och nya) leder till att de resultat som presenteras kan skilja sig något från verklig klimatpåverkan med hänsyn till utvecklingen i branschen.

### 4.2 Olika funktionella enheter

Den funktionella enheten i en LCA är den enhet som miljöpåverkan beräknas på. Det är viktigt att den funktionella enheten speglar produktens eller tjänstens funktion. För solceller är det därmed lämpligt att beräkna miljöpåverkan per producerad elmängd (kWh). Dock är den producerade elmängden beroende av ett flertal faktorer som beskrivs längre ner. Vid studie av klimatpåverkan från tillverkningen av moduler kan därför funktionella enheter som nominell effekt (kWp) och i viss mån yta (m<sup>2</sup>) vara lämpliga alternativ.

Att använda samma funktionella enhet möjliggör att jämföra olika produkter med varandra. Däremot är det väldigt sällan möjligt att jämföra två olika studier med varandra då det är svårt att garantera att de båda studierna har utfört beräkningarna på samma sätt och gjort likvärdiga antaganden, med undantag för studier som baseras på samma produktspecifika regler för beräkning av miljöpåverkan. Exempel på sådana regler är (EPD Norge 2020) och Fritsche et al (2020).

#### 4.2.1 Betydelse av årlig instrålning, prestanda, degradering och livslängd

Eftersom den huvudsakliga klimatpåverkan från solcellsmoduler sker i tillverkningsfasen, så är den direkta klimatpåverkan ganska oberoende av hur eller var modulerna används. Denna direkta klimatpåverkan kan enkelt redovisas med funktionella enheter som nominell effekt (kWp) eller yta (m<sup>2</sup>). För hela livscykelns netto-påverkan på klimatet gör det däremot skillnad hur mycket el den producerar under livslängden för att komma fram till klimatpåverkan per producerad mängd el (kWh). Då

blir det avgörande dels hur lång livslängd en modul har samt hur den åldras, och dels hur mycket ljus den fångar upp där den monteras samt hur väl hela solcellsanläggningen presterar.

Den årliga instrålningen är beroende av var modulen monteras, med vilken riktning (azimut) och lutning. Ett rätt vanligt använt värde för årlig instrålning vid livscykelanalyser är 1700 kWh/m<sup>2</sup> (motsvarande Södra Europa), vilket skiljer sig avsevärt från typiska värden i Sverige (se Tabell 1). Skuggning påverkar också instrålningen, men eftersom den brukar skilja sig för olika delar av en solcellsanläggning betraktas den som en delfaktor i solcellsanläggningens performance ratio (PR), som är ett prestandamått för anläggningen. Några andra faktorer som omfattas av performance ratio är elektriska överförings- och omvandlingsförluster samt verkningsgradssänkningar vid högre celltemperaturer. En PR på minst 75 % anses i regel vara ett minimumkrav, men värden över 80 % eller 85 % bör eftersträvas. Anläggningar med en hög instrålning och en hög PR producerar mer solel under ett år och får därmed en lägre klimatpåverkan per kWh.

Tabell 1: Långtidsmedelvärden för årlig skuggningsfri instrålning (i kWh/m<sup>2</sup>) vid olika orientering och på olika platser i Sverige (PVGIS-ERA5).

Lutning och riktning på solcellerna	Instrålning i Umeå	Instrålning i Stockholm	Instrålning i Göteborg	Instrålning i Malmö
Lutning: 0° Riktning: -	935	1021	1060	1055
Lutning: 10° Riktning: Öst/Väst	935/925	1017/1012	1049/1058	1050/1046
Lutning: 30° Riktning: Syd	1181	1270	1323	1280
Lutning: 30° Riktning: Öst/Väst	932/908	999/984	1017/1038	1022/1011
Lutning: 90° Riktning: Syd	963	1002	1040	972

Vanligt använda livslängder i livscykelanalyser är 25 år (EPD-Norge, 2020) eller 30 år (Fritsche m.fl., 2020). För kristallina kiselceller finns ganska många degraderingsstudier gjorda och en ofta refererad metastudie visar på i snitt 0,7 % degradering per år (medianvärde: 0,5 %/år) för kiselceller (Jordan & Kurtz, 2013). Samma studie rapporterar något högre degraderingsvärden för tunnfilmssolceller med 1,5 %/år i medelvärde och 1,0 %/år i medianvärde, men med en tydlig förbättring för nyare moduler (installerade efter 2000). Det finns skillnader i degraderingsprocesser och -grader mellan olika kiselteknologier (t.ex. PERC och Al-BSF) och mellan olika tunnfilmsteknologier men vi bedömer att det finns för lite data för att göra några allmänna teknologibaserade antaganden.

Degraderingen beror till viss del på klimatet där solcellsmodulen används, där klimat med höga temperaturer och hög fuktighet typiskt ökar degraderingsgraden. Indikationer finns dock att även kalla, snörika klimat som i norra Sverige kan innebära en ökad degradering jämfört med t.ex. södra Sverige.

Om resultat från en livscykelanalys redovisas per kWh baseras dessa resultat på ett antal antaganden eller förutsättningar för solinstrålning, performance ratio, livslängd och degradering. Vanligtvis representerar dessa värden inte typiska svenska förhållanden.

Dessutom är de inte sällan olika mellan olika studier. Därför kan det vara lämpligare att jämföra resultat uttryckta per kWp moduleffekt för aktuell plats. I arbetet med denna rapport har ett kalkylblad tagits fram för att räkna om resultat mellan de vanligaste funktionella enheterna. Det förutsätter att flera viktiga antaganden bakom originalresultaten är kända. Kontakta rapportförfattarna vid intresse att ta del av kalkylbladet.

#### Referenser för detta avsnitt:

- EPD-Norge. 2020. "NPCR 029 2020 Part B for photovoltaic modules 1.1 011020.pdf". NPCR 029 version 1.1. The Norwegian EPD Foundation.
- Fritsche, Jochen, Carol Olson, Andreas Wade, Garvin Heath, Ioannis-Thomas Theologitis, Loïc Francke, Rolf Frischknecht, Philippe Stolz, och Jean Tian. 2020. "Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) - PHOTOVOLTAIC MODULES USED IN PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS FOR ELECTRICITY GENERATION (Version 1.2)".
- Jordan, D. C., och S. R. Kurtz. 2013. "Photovoltaic Degradation Rates-an Analytical Review: Photovoltaic Degradation Rates". *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 21 (1): 12–29. <https://doi.org/10.1002/pip.1182>.
- PVGIS-ERA5, Data obtained from "JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission". u.å. Åtkomstdatum 16 juli 2021. [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/#PVP](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#PVP).

## 4.3 Klimatpåverkan från el i tillverkningssteget och elen som ersätts av solel

I avsnitt 1.1.1 har betydelsen av tillverkningsland diskuterats utifrån att olika länder och regioner har olika elmix och därmed olika klimatpåverkan per kWh (så kallad emissionsfaktor). Inom energibranschen och bland LCA-experter finns olika åsikter om vilken elmix som bör användas. För att kvantifiera den exakta miljöpåverkan så bör beräkningen ta hänsyn till den el som används i fabriken, var den genereras och vid vilka tidpunkter den används. Då är det inte säkert att landets elmix är det mest rättvisa antagandet. Som exempel kan vi betrakta en modulfabrik i ett stort land som Kina. Elmixen kan variera mellan olika regioner, även om det finns en del in- och export mellan regionerna. Dessutom kan det vara så att fabriken har egna solcellsanläggningar eller vindkraftverk eller köper in grön el. Enligt vissa LCA-regler får man räkna med emissionsfaktorerna för den lokala sol- eller vindelen om det finns ursprungsgarantier som kan kopplas till fabriken eller med den gröna elmixen enligt elavtalet. Förespråkarna för denna regel tycker att det är rättvist att aktörer som tar en aktiv roll i energiomställningen också får en fördel över konkurrenter som inte bidrar aktivt. Motståndarna påstår att ursprungsgarantier och gröna elavtal är pappersprodukter som inte är (eller behöver vara) knutna till den fysiska verkligheten i elsystemet. I elsystemet krävs hela tiden en balans mellan produktion och konsumtion. Ursprungsgarantier för solel går dock att köpa även för el som konsumeras nattetid eller vintertid, oavsett om elen i praktiken har genererats av en annan kraftkälla, som kan ha varit fossil. När det gäller gröna elavtal är det inte alltid så att det leder till additionalitet, det vill säga att elavtalet har gett upphov till ny förnybar elproduktionskapacitet. Om additionaliteten saknas ändras inte den faktiska elmixen i landet/regionen och då gör det ingen faktisk

skillnad för klimatpåverkan. I projektet Klimateffektiv Solenergi har vi inte aktivt tagit ställning i denna fråga.

I projektet och i denna rapport har fokus legat på klimatpåverkan från solcellsmodulernas tillverkning, eftersom det alltid borde vara bättre att solet produceras med hjälp av solcellsmoduler med låg klimatpåverkan från tillverkningen. Om målet däremot är att kvantifiera klimateffekten av lokalproducerad solet i energisystemet så måste klimatpåverkan från solet jämföras med klimatpåverkan från den el som ersätts med solet. Ett förenklat sätt att jämföra är att använda elmixen för ett land på samma sätt som det brukar ske vid beräkning av klimatpåverkan från tillverkning av solcellerna (se avsnitt 1.1.1). I praktiken hänger dock olika länders elsystem ihop och påverkar varandra. Så är Sveriges elsystem starkt kopplat till andra nationella elsystem i Norden, som vi också har en gemensam elmarknad med. Det kan därför anses vara mer rättvist att jämföra solets klimatpåverkan med den för Nordens elmix. Men även det är en förenkling. Likaväl som det finns högspänningsförbindelser mellan Sverige och våra nordiska grannar finns det förbindelser med Tyskland, Polen och Litauen ("ENTSO-E Transmission System Map", 2019). Samtliga dessa länder är ihopkopplade med ytterligare fler länder. Samtidigt kommer elen från olika kraftkällor vid olika tider på året och dygnet. Och installationer av nya kraftkällor idag påverkar hur elsystemen ser ut och utvecklas i framtiden. För att få fram en rätt bra uppskattning krävs alltså egentligen en elsystemanalys som inkluderar hela det Nordeuropeiska kraftsystemet under 30 år framöver med hög tidsupplösning. Detta är ett mycket omfattande arbete som ligger utanför ramen för projektet Klimateffektiv Solenergi, men det finns ett antal studier med olika ambitiösa försök, som kanske kan ge rimliga referensvärden för elmixens klimatpåverkan.

Ett intressant projekt genomfördes inom SolEl-programmet där det nordeuropeiska elsystemet simulerades i olika scenarier (Axelsson m.fl., 2017). Scenarierna utgår från att den största klimatvinsten görs under den närmaste tiden, fram till cirka 2035 genom att en betydande andel av elmixen då fortfarande utgörs av icke-förnybar kraft. Över tid antas elsystemet bli mer och mer förnybart till följd av ökade priser för utsläppsrättigheter, varför elmixen framemot 2040-2050 har en betydligt lägre emissionsfaktor för elmixen.

Emissionsfaktorer för elmixen i Sverige och Norden (historisk data) samt Nordeuropa (framtidsscenarier) från ett antal studier redovisas i Tabell 2. Redovisad emissionsfaktor för nordisk elmix används av Naturvårdsverket vid utvärdering av projekt inom programmet Klimatklivet.

Tabell 2: Emissionsfaktorer för elmixen vid olika avgränsningar av elsystemet.

Elmix	Emissionsfaktor (g CO <sub>2</sub> e/kWh)	År	Källa
Svensk elmix	47	2013	Moro & Lonza, 2018
Nordisk elmix (bruttometoden)	90,4	2016-2018 (medel)	Sandgren och Nilsson, 2021
Nordeuropeisk elmix (framtidssimulering)	Ca 400 – 625	2025-2035 (medel, olika scenarier)	Axelsson m.fl., 2017
	Ca 125 – 225	2040 – 2050 (medel, olika scenarier)	

Hjälp att få mer rättvisa uppskattningar på koldioxidnetton vid utbyggnad av solceller finns även att få från verktyget Tidstegen (IVL Svenska Miljöinstitutet, 2021). Detta verktyg simulerar miljöeffekter för olika energiåtgärder inom det nordiska elsystemet med import/export och tar hänsyn till variationer inom och utveckling av systemet över tid. Så räknas med olika marginalel-källor för olika år, säsonger (vinter, sommar och höst/vår), samt tid på dygnet (dagtid och nattetid). Simuleringarna som görs avser perioden 2020 – 2040 (Hagberg m.fl., 2017).

Referenser för detta avsnitt:

- Axelsson, Erik, Peter Blomqvist, Katja Dvali, Kjerstin Ludvig, och Thomas Unger. 2017. "Utbyggnad av solceller i Sverige - Möjligheter, utmaningar och systemeffekter". *Solceller 2017*:376. Stockholm: Energiforsk. <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/23047/utbyggnad-av-solceller-i-sverige-energiforskrapport-2017-376.pdf>.
- "ENTSO-E Transmission System Map". 2019. ENTSO-E. 01 januari 2019. <https://www.entsoe.eu/data/map/>.
- Hagberg, Martin, Jenny Gode, Ambjörn Lätt, Tomas Ekvall, Ida Adolfsson, och Fredrik Martinsson. 2017. "Miljövärdering av energilösningar i byggnader (etapp 2)". B 2282. Stockholm: IVL Svenska Miljöinstitutet. <https://www.ivl.se/publikationer/publikationer/miljovardering-av-energilosningar-i-byggnader-etapp-2.html>.
- IVL Svenska Miljöinstitutet. u.å. "Tidstegen - IVL Svenska Miljöinstitutet". Åtkomstdatum 15 juli 2021. <https://www.ivl.se/projektwebbar/tidstegen.html>.
- Moro, Alberto, och Laura Lonza. 2018. "Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles". *The contribution of electric vehicles to environmental challenges in transport. WCTRS conference in summer 64* (oktober): 5–14. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.012>.
- Sandgren, Annamaria, och Johanna Nilsson. 2021. "Emissionsfaktor för nordisk elmix med hänsyn till import och export". 16538102 (ISSN). 4 vol. SMED Rapport. DiVA. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:naturvardsverket:diva-8809>.

## 5 Råd för klimateffektiv solenergi

I detta kapitel avslutas arbetet i Arbetspaket ett i projektet Klimateffektiv solenergi med att litteraturstudiens huvudsakliga slutsatser presenteras, andra initiativ för att minska klimatpåverkan från solceller diskuteras och slutligen presenteras förslag för framtida arbete och forskning.

### 5.1 Slutsatser litteraturstudie

Efter litteraturgenomgången kan följande slutsatser dras. Kiselbaserade tekniker för solceller är dominerande på världsmarknaden och tillverkning sker främst i Asien. Kiselbaserade solcellsmoduler har större klimatpåverkan jämfört med tunnfilmsmoduler. Det beror bland annat på mindre materialåtgång vid framställningen av tunnfilmsmoduler. Vidare har monokristallina kiselceller större klimatpåverkan per solcell och per modul jämfört med multikristallina kiselceller. Skillnaden beror på att tillverkningsprocessen för att framställa monokristallint kisel är mer energikrävande jämfört med den för att framställa multikristallint kisel. Verkningsgradskillnaden mellan multi- och monokristallina kiselceller avgör dock vilken produkt som har lägst klimatpåverkan per nominell effekt (Wp) eller producerad elmängd (kWh). Vidare kan nyare tekniker så som PERC och dubbelsidiga moduler minska klimatpåverkan från solceller i och med att elproduktionen per solcell ökas. Slutligen har vidareutveckling av teknologier potential för att ytterligare minska klimatpåverkan från solceller, både genom effektivare tillverkningsprocesser och genom att öka solcellernas effektivitet.

Tre nyckelfaktorer som är viktiga att ta med sig efter det här arbetet:

- 1) Klimatpåverkan från el som används i tillverkningsskedet är en nyckelfaktor för slutlig klimatpåverkan från en solcellsmodul.
- 2) Moduler med högre verkningsgrad och tillämpningar med högre elproduktion för i övrigt samma solcellsteknologi är att föredra ur klimatsynpunkt.
- 3) Klimateffektiva teknologier kan dock vara fördelaktiga trots att de har lägre verkningsgrad än mer klimatintensiva teknologier.

### 5.2 Pågående initiativ för kravställning och utvärdering

Rapportens inledande kapitel lyfte värdet av att samla en större samlad inköpskraft bakom krav på, och utvärderingsmetoder för solcellsmoduler med lägre klimatpåverkan. I detta avsnitt beskrivs tre internationella initiativ som bedöms ha potential för kravställning på den svenska marknaden och som således är intressanta för det fortsatta arbetet i projektet Klimateffektiv solenergi.

#### 5.2.1 Förenklad klimatbedömning i Frankrike

I den centraliserade offentliga upphandlingen av större solcellsanläggningar (över 500 kWp) i Frankrike ska solcellsmodulerna ha genomgått en förenklad klimatbedömning

This work by RISE Research Institutes of Sweden is, except where otherwise noted, licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

(”évaluation carbone simplifiée”) i enlighet med Bilaga 2 i ”Cahier des charges de l’appel d’offres portant sur la réalisation et l’exploitation d’Installations de production d’électricité à partir de l’énergie solaire « Centrales au sol »” (CRE, 2021).

Bedömningen använder schablonvärden för klimatutsläpp från tillverkning av de viktigaste delprodukterna av en solcellsmodul. Schablonvärden finns listade för olika tillverkningsländer och baseras på klimatpåverkan från landets elmix, från Ecoinvent 3.1 (enligt IPCC2007 GWP100a). Som exempel ger det 1155 g CO<sub>2</sub>e/kWh och 1121 g CO<sub>2</sub>e/kWh för Kina respektive Polen, och 63 g CO<sub>2</sub>e/kWh samt 112 g CO<sub>2</sub>e/kWh för Sverige respektive Frankrike. Den använda versionen av Ecoinvent är något föråldrad. Exempelvis verkar data för Kina gälla för år 2008, medan den senaste versionen av Ecoinvent (3.7.1) innehåller data för år 2015. Detta kan vara till nackdel för länder som på senare år har ställt om betydande delar av sitt elsystem till förnybara kraftkällor.

Leverantörer eller tillverkare kan få använda avvikande värden för sina produkter om de kan redovisa en livscykelanalys som håller för granskningen av certifieringsorganet ADEME. I denna livscykelanalys ska fortfarande elmixen från tillverkningslandet användas, alltså premieras inte lokal förnyelsebar energiproduktion vid fabriken eller inköp av ursprungsmärkt el.

Beräkningarnas överensstämmelse med de beskrivna metoderna ska intygas av ett europeiskt certifieringsorgan som är ackrediterat för certifiering av solcellsmoduler enligt IEC 61215. Intygen har begränsad giltighet och beräkningsmetoden har utvecklats mellan olika upphandlingstillfällen, så att resultaten utfärdade vid olika tillfällen inte utan vidare kan jämföras. Ändringarna avser förutom uppdateringar av schablonvärdena för klimatutsläpp även sådant som introduktionen av faktorer för förlust och spill av delprodukterna.

#### Referenser för detta avsnitt:

CRE - Commission de régulation de l’énergie. 2021. ”Cahier des charges de l’appel d’offres portant sur la réalisation et l’exploitation d’Installations de production d’électricité à partir de l’énergie solaire « Centrales au sol ».” Commission de régulation de l’énergie (CRE). <https://www.cre.fr/Documents/Appels-d-offres/appel-d-offres-portant-sur-la-realisation-et-l-exploitation-d-installations-de-production-d-electricite-a-partir-de-l-energie-solaire-centrales-a>.

## 5.2.2 Ecodesignkrav inom EU

Inom EU pågår ett arbete för att fastställa ecodesignkrav för solcellsmoduler och kringutrustning. Om sådana krav fastställs innebär det minimikrav för att få erbjuda solcellsmoduler på den europeiska marknaden. Det går att följa processen och förberedande arbeten i Sverige på Energimyndighetens hemsida (Energimyndigheten, 2020).

Det förberedande arbetet av Dodd et al. (2020) inför kravförslagen, som bland annat inkluderat uppskattningar av koldioxidpåverkan från dagens solcellsmoduler, har varit en avgörande källa för den föreliggande rapporten. Ett diskussionspapper med förslag på krav publicerades april 2021 och det innehåller ett krav på att deklarerera en miljöprofil för solcellsmoduler, bestående av åtminstone klimatavtrycket från tillverkningen (European Commission, 2021). Ett sådant krav skulle inte börja gälla direkt, men först

från ett visst antal månader efter att ecodesignkraven för solcellsmoduler träder i kraft. Vid ett intressentmöte i slutet på april 2021 diskuterades kravförslagen och där framfördes inget större motstånd mot kravet på deklARATION av miljöprofil.

Beräkningarna för att fastställa miljöprofilen ska göras i enlighet med den europeiska "Product Environmental Footprint" (PEF) metoden för livscykelanalys och följande tillhörande "Category Rules" (PEFCR) för solcellsprodukter (Fritsche m.fl., 2020). Dessa dokument beskriver viktiga metodval och antaganden som exempelvis vilken elmix som ska användas för tillverkningsprocesserna. Genom sådana tydliga regler blir slutresultaten jämförbara för olika modulfabrikat och -modeller.

#### Referenser för detta avsnitt:

- Dodd, Nicholas, Nieves Espinosa, Paul Van Tichelen, Karolien Peeters, Ana Soares, European Commission, och Joint Research Centre. 2020. *Preparatory Study for Solar Photovoltaic Modules, Inverters and Systems: Final Report*. [https://op.europa.eu/publication/manifestation\\_identifier/PUB\\_KJNA30468ENN](https://op.europa.eu/publication/manifestation_identifier/PUB_KJNA30468ENN).
- Energimyndigheten. 2020. "Solpaneler och växelriktare". Åtkomstdatum 02 september 2021. <http://www.energimyndigheten.se/energieffektivisering/jag-ar-saljare-eller-tillverkare-av-produkter/produktgrupper-a-o/produkter/solpaneler-och-vaxelriktare/>.
- European Commission. 2021. "Discussion paper Ecodesign Photovoltaic Products 2021". European Commission. <https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau//sites/default/files/2021-04/Discussion%20paper%20Ecodesign%20Photovoltaic%20Products.pdf>.
- Fritsche, Jochen, Carol Olson, Andreas Wade, Garvin Heath, Ioannis-Thomas Theologitis, Loïc Francke, Rolf Frischknecht, Philippe Stolz, och Jean Tian. 2020. "Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) - PHOTOVOLTAIC MODULES USED IN PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS FOR ELECTRICITY GENERATION (Version 1.2)".

### 5.2.3 Environmental Product Declarations (EPD)

Utöver den europeiska PEF-metoden som tagits upp i föregående avsnitt finns det även ett internationellt samarbete kring miljövarudeklARATIONER, eller "Environmental Product Declarations" (EPD). EPD:er baseras också på livscykelanalyser enligt den internationella standarden ISO 14067 och "Product Category Rules" (PCR) enligt EN 15804. Systemet med EPD:er har utvecklats starkt i byggsektorn och olika nationella EPD-operatörer samarbetar för att få jämförbara regelverk.

I Norge har en PCR med specifika regler för solcellsmoduler tagits fram, för bygg- och fastighetssektorn. Dessa regler överensstämmer till viss del med den europeiska PEFCR:en för solcellsprodukter, men det finns också skillnader. Exempelvis ställer den norska PCR:en krav på användning av emissionsfaktorer för nationell elmix, medan den europeiska PEFCR:en tillåter användning av lokal elmix baserad på t.ex. ursprungsgarantier (EPD-Norge, 2020; Fritsche m.fl., 2020). Nuvarande version (1.1) av den norska PCR:en kan ha en felaktig beskrivning av hur degradering av solcellsmodulerna ska hanteras, vilket är under utredning.

International EPD® System har en mer allmän PCR som beskriver hur en miljövarudeklARATION (EPD) för el, värme och ånga ska beräknas (EPD International,



2021). Denna har dock inga regler kring solcellsspecifika beräkningar och antaganden och är därför inte lämplig att använda för att jämföra klimatpåverkan från olika solcellsmoduler.

#### Referenser för detta avsnitt:

- EPD International AB. 2021. "PRODUCT CATEGORY RULES 2007:8 ELECTRICITY, STEAM AND HOT/COLD WATER GENERATION AND DISTRIBUTION version 4.2". PCR 2007:8. Stockholm: EPD International AB.  
<https://portal.environdec.com/api/api/v1/EPDLibrary/Files/cbaa4849-ebae-41e7-3f0b-08d91f78ae38/Data>.
- EPD-Norge. 2020. "NPCR 029 2020 Part B for photovoltaic modules 1.1 011020.pdf". NPCR 029 version 1.1. The Norwegian EPD Foundation.
- Fritsche, Jochen, Carol Olson, Andreas Wade, Garvin Heath, Ioannis-Thomas Theologitis, Loïc Francke, Rolf Frischknecht, Philippe Stolz, och Jean Tian. 2020. "Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) - PHOTOVOLTAIC MODULES USED IN PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS FOR ELECTRICITY GENERATION (Version 1.2)".

## 5.3 Behov av vidare arbete och forskning

Kapitel 4.1 i denna rapport lyfte svårigheterna som har påträffats gällande att hitta relevant och uppdaterade indata till LCA:er på solceller. Med bristen på uppdaterade indata som bakgrund finns ett behov av arbete och forskning för att ta fram indata både för dagens och kommande produktionstekniker och tillverkningsutrustning.

För att få mer pålitliga jämförelser mellan olika tekniker är det också viktigt att veta mer om hur olika teknik- och teknologival påverkar elproduktionen under livslängden. Därtill behövs bättre kunskap om degradering av olika teknologier och modulvarianter, till exempel fler degraderingsstudier för tunnfilm och för nya cellvarianter av kiselsolceller. Även effekten av olika fram- och baksidor på olika cellteknologiers prestanda, degraderingstakt och livslängd behöver kunna kvantifieras bättre. Utmaningen med alla sådana degraderingsstudier är att de kräver omfattande studier i både tid, antal moduler och olika förutsättningar för att få pålitliga och allmängiltiga resultat.

För att kunna utvärdera klimatnyttan av solelen i energisystemet finns det utrymme för fler studier och fler eller nya användarvänliga verktyg, som Tidstegen (IVL Svenska Miljöinstitutet, 2021) som analyserar systemeffekter av ny intermittert, förnybar elproduktion.

Effekter och potential för återvinning och återanvändning av solcellsmoduler har inte legat inom ramen för denna studie men vid framtida arbete och forskning är det något som kan vara relevant att beakta.

#### Referenser för detta avsnitt:

- IVL Svenska Miljöinstitutet. u.å. "Tidstegen - IVL Svenska Miljöinstitutet".  
 Åtkomstdatum 15 juli 2021. <https://www.ivl.se/projektwebbar/tidstegen.html>.

**Denna kunskapssammanställning över solcellsmodulers klimatpåverkan vid tillverkning har tagits fram av RISE inom ramen för projektet Klimateffektiv Solenergi. Målsättningen har varit att få en överblick över vilka solcellstekniker som har störst respektive lägst klimatpåverkan samt att urskilja de mest betydande valmöjligheterna som gynnar en låg klimatpåverkan genom att identifiera processer eller tillverkningssteg med intensiv klimatpåverkan.**

**Projektet syftar till att bidra till ökad kunskap om och hänsyn till solcellers klimatprestanda hos marknadsaktörer. Kunskaperna som samlats i denna rapport utgör en grund för vidare projektarbete med att ta fram och testa upphandlingskriterier som utvärderar solcellers klimatprestanda samt ta fram vägledning för klimatoptimerad förvaltning av solcellsanläggningar.**

**Projektet Klimateffektiv Solenergi leds av Energikontoret Storsthlm och utförs i ett samarbete mellan Energikontor Storsthlm, RISE Research Institutes of Sweden och allmännyttans inköpscentral HBV. Finansiering av projektet kommer från Energimyndigheten och HBV.**

RISE – Research Institutes of Sweden  
ri.se / info@ri.se / 010-516 50 00  
Box 857, 501 15 BORÅS

Div. Samhällsbyggnad, Energi och resurser  
RISE Rapport: 2021:78  
ISBN: 978-91-89385-68-9

