



# Klimatutsläpp från Region Uppsalas solcellsanläggningar ur ett livscykelperspektiv

---

Bianca Nilsson

Kandidatarbete • 15 hp

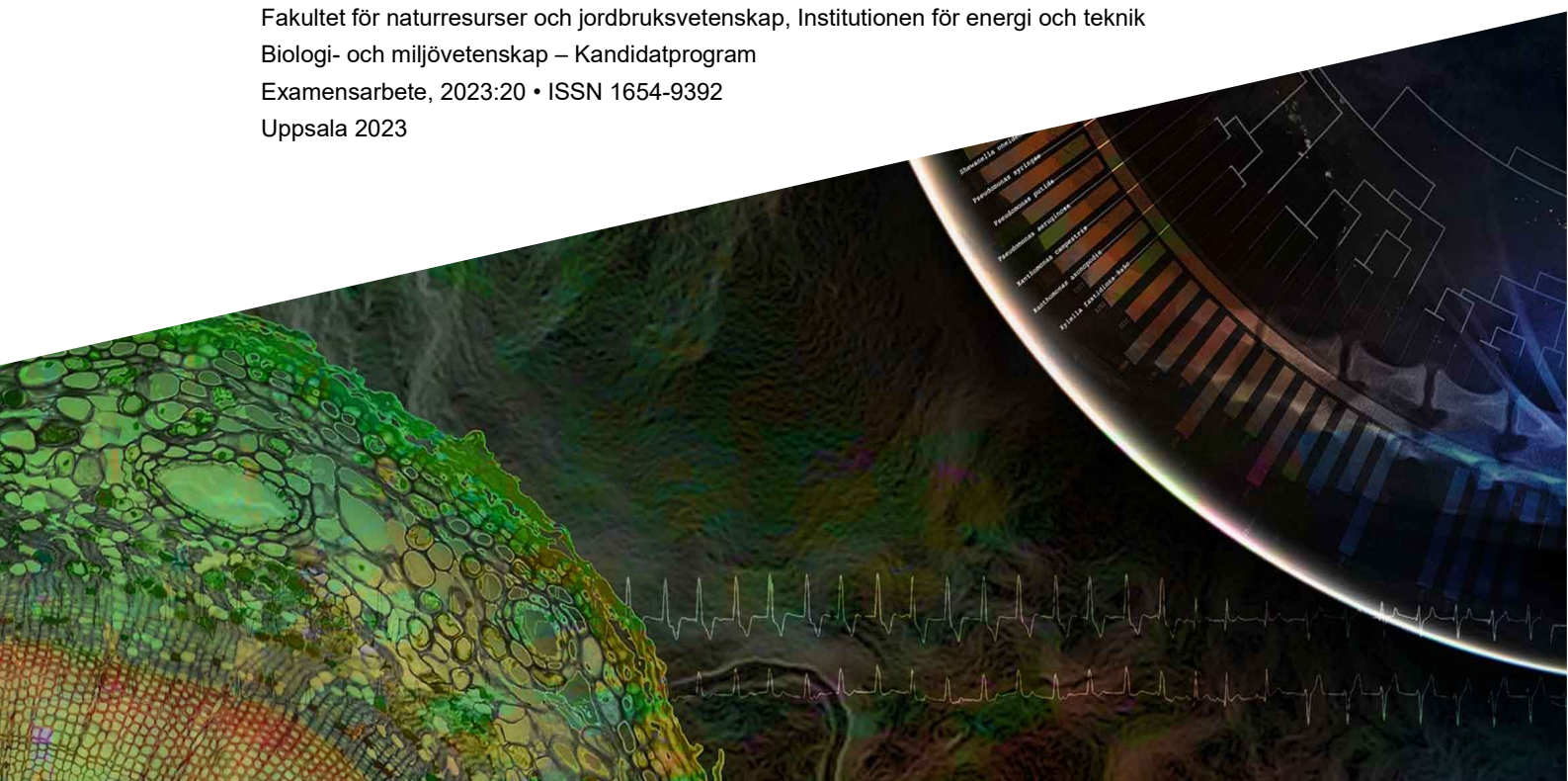
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU

Fakultet för naturresurser och jordbruksvetenskap, Institutionen för energi och teknik

Biologi- och miljövetenskap – Kandidatprogram

Examensarbete, 2023:20 • ISSN 1654-9392

Uppsala 2023



# Klimatutsläpp från Region Uppsalas solcellsanläggningar ur ett livscykelperspektiv

*Greenhouse gas emissions from Region Uppsala's solar parks from a life cycle perspective*

Bianca Nilsson

**Handledare:** Gunnar Larsson, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för energi och teknik

**Examinator:** Hanna Karlsson Potter, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för energi- och teknik

**Omfattning:** 15 hp  
**Nivå och fördjupning:** G2E  
**Kurstitel:** Självständigt arbete i Miljövetenskap  
**Kurskod:** EX0896  
**Program/utbildning:** Biologi- och miljövetenskap – Kandidatprogram  
**Kursansvarig inst.:** Institutionen för energi- och teknik  
**Utgivningsort:** Uppsala  
**Utgivningsår:** 2023  
**Upphovsrätt:** Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd  
**Serietitel:** Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)  
**Delnummer i serien:** 2023:20  
**ISSN:** 1654-9392

**Nyckelord:** livscykelanalys, energiplanering, solceller, jämförelse av solcellstekniker, klimatutsläpp, solcellspark

**Sveriges lantbruksuniversitet**

Fakultet för naturresurser och jordbruksvetenskap

Institutionen för energi och teknik

# Sammanfattning

Solceller är en del av en ny teknik för att kunna producera förnyelsebar energi som kan ersätta dagens fossila energikällor. Syftet med denna studie är att undersöka hur stora klimatutsläppen blir för de olika solcellsanläggningarna i Region Uppsala ur ett livscykelperspektiv, samt vilka faktorer som påverkar utsläppen. Det som har undersöks är klimatutsläpp från respektive anläggningar, vilka som var de mest bidragande utsläppsfaktorerna för olika solceller, samt hur anläggningarnas solceller förhållit sig till andra energikällor som också kan passa för energiplanering av hållbara städer. Solcellsanläggningarnas produktionsdata är av praktiskt uppmätta värden från Region Uppsalas Energiportal. Livscykelanalyser för solcellsteknikerna mono std, poly std, mono BiFacial, mono PERC, CIGS thin film och mono Half-cut togs fram och beräknades om för att passa Uppsalas förhållanden.

Denna uppsats pekar på att tillverkningen är den största utsläppskällan i solcellers livscykel. Anledningen är den energi- och resurskrävande reningsprocessen av solcellernas kiselskiva. Även produktions- och transportland, samt solcellernas produktivitet påverkar utsläppen. Högre produktivitet, produktion från ett land med mindre fossil elmix och kortare transportsträckor är alternativ som ger minst utsläpp. Alternativ vind eller vattenkraft skulle släppa ut mindre växthusgaser än Uppsalas solcellsanläggningar, men anläggningarna släpper idag ut 1 080 ton mindre växthusgaser per år jämfört med om kol skulle använts. Solcellerna är därmed bra ersättare till fossila källor, men utsläppen är generellt högre än många andra förnyelsebara energikällor.

*Nyckelord:* Livscykelanalys, Energiplanering, Solceller, Jämförelse av solcellstekniker, Klimatutsläpp, Solcellspark

## Abstract

The purpose of this study is to investigate the greenhouse gas emissions from various solar cell installations in Region Uppsala from a life cycle perspective. The facilities climate emissions are investigated together with emission factors for different solar cells. Even how the solar park relates to other alternative energy sources suitable for energy planning of sustainable cities are investigated. The data for the solar cell installations are practically measured from Region Uppsala's Energiportalen. Life cycle assessments for the solar cell technologies mono std, poly std, mono BiFacial, mono PERC, CIGS thin film and mono Half-cut were used and recalculated to suit Uppsala's conditions.

This essay found that manufacturing is the biggest source of emissions in the life cycle of solar cells. The reason is the energy and resource-intensive manufacturing process of the silicon wafer. Productivity, transport countries and the manufacturing of solar cells affect the emissions. High productivity and shorter transport distances from a country with less fossil electricity mixes are alternatives that produce the least emissions. Alternative wind or hydropower would emit less greenhouse gases than the solar park, but the solar park today already emits 1 080.7 tons less greenhouse gases per year compared to coal, which makes it a good substitute instead of fossil sources. The emissions, on the other hand, are generally higher for solar panels in comparison to many other energy sources.

*Keywords:* Life cycle assessment, Energy planning, Solar cells, Cell technologies, Climate emissions, Solar park

# Innehållsförteckning

<b>Förkortningar</b> .....	<b>5</b>
<b>1. Introduktion</b> .....	<b>6</b>
1.1 Bakgrund .....	6
1.2 Region Uppsalas solcellsanläggningar .....	7
1.2.1 Solcellsteknikerna .....	7
1.2.2 Mono std och poly std .....	7
1.2.3 Mono BiFacial .....	8
1.2.4 Mono PERC .....	8
1.2.5 CIGS thin film .....	8
1.2.6 Mono Half-cut .....	8
1.3 Syfte och frågeställningar .....	9
<b>2. Metod</b> .....	<b>10</b>
2.1 Livscykelanalyser .....	10
2.1.1 Koldioxidekvivalenter .....	10
2.2 LCA Systemgränser .....	11
2.3 Solcellernas tillverkningsländer och transport .....	12
2.4 Beräkna utsläpp .....	13
<b>3. Resultat</b> .....	<b>14</b>
3.1 Sammanställda data .....	14
3.2 Anläggningar .....	15
3.3 Solcellstekniker .....	16
3.4 Produktion, transport, installation.....	17
3.5 Utsläpp vid produktion .....	19
3.6 Transporter.....	19
3.7 Jämförelse med andra energikällor.....	20
<b>4. Diskussion</b> .....	<b>22</b>
4.1 Produktiviteten och produktionens betydelse för resultatet .....	22
4.2 Solcellernas påverkan på Uppsala Regions klimatutsläpp .....	24
4.3 Solcellers betydelse i kolberoende länder .....	24
4.4 Validering .....	24
4.5 Studiens begränsningar och rekommendation för vidare forskning .....	25
<b>5. Slutsats</b> .....	<b>28</b>
<b>Referenser</b> .....	<b>29</b>
<b>6. Tack</b> .....	<b>32</b>

## Förkortningar

CO <sub>2</sub> e	Koldioxidekvivalenter
kWh	Kilowattimme
kW <sub>p</sub>	Kilowattpek
LCA	Livscykelanalys
Mono std	Monokristallina standardsolceller
Poly std	Polykristallina standardsolceller
VC	Vårdcentral
GWP	Global warming potential

# 1. Introduktion

## 1.1 Bakgrund

Idag görs stora satsningar på klimatarbetet i Sverige och EU. Sverige har ett klimatpolitiskt ramverk inkluderat klimatmål. Målet är att landet inte ska ha några nettoutsläpp av koldioxid efter 2045 och därefter ska utsläppen bli negativa. Minskningen ska ske i etappmål: 63% lägre till år 2030, 75% lägre till år 2040 och 85% lägre till 2045. Startvärdet för etappmålen är år 1990, då låg Sveriges utsläpp på 71,8 miljoner ton (Naturvårdsverket 2021). Ansvarsförordningen inom EU reglerar hur medlemsländerna ska minska sina utsläpp. Regleringen gäller utsläpp från transporter, maskiner, jordbruk, bostäder och energianläggningar. Om Sverige ska lyckas med regleringen och minska sina växthusgaser behöver det göras satsningar på förnybara alternativ (Energimyndigheten 2023a). Samtidigt som omställningen till förnybara alternativ sker kommer elbehovet i landet att öka med 70–160% till år 2050 enligt Energimyndighetens rapport “Långsiktiga scenarier över Sveriges energisystem” (2023c). Mycket fossilfria energikällor kommer därför att behövas om omställningen ska lyckas. Insatser på både myndighetsnivå till kommunnivå kommer krävas för att fossilfri el ska kunna användas till landets målsättningar och samhällsbehov (Energimyndigheten 2023b). Många satsningar behöver ske på regional nivå, och en viktig energi- och klimataspekt i fysisk planering har varit att planera för solceller (Energimyndigheten 2019a).

Region Uppsala, som organisation genom sin Fastighet- och serviceavdelning, har satt upp ett flertal olika solpaneler av blandade solcellstekniker på olika anläggningar. De testas sida vid sida för att kunna bidra med produktionsdata och forskning kring hur solcellernas elproduktion fungerar över tid i praktiken (Region Uppsala 2023). Solceller är ett förnybart alternativ med många fördelar för bruk inom städer. De är tysta och har en diskret placering vilket gör att de inte stör omgivningen, samt att elproduktionen sker nära elanvändningen vilket minskar överföringsförluster i elnäten (Energimyndigheten 2021). Solcellers fördelar för energiproduktion i stadsmiljö, tillsammans med den energiomställning Sverige och världen står inför idag, gör frågan om solcellers klimatutsläpp ur ett livscykelperspektiv väldigt aktuell. Forskning om solcellers totala utsläpp bidrar till en bättre förståelse kring hur energieffektiviseringen i samhället påverkar klimatet. Det ger även vidare insikt i hur solceller kan vidareutvecklas och bli mer effektiva ur hållbarhetsperspektiv.

## 1.2 Region Uppsalas solcellsanläggningar

Idag finns det 21 stycken solcellsanläggningar i Region Uppsala. Tillsammans bildar de organisationen Region Uppsalas solcellspark. Anläggningarna har varierande solcellstekniker och märken (tabell 2). På samma anläggning kan det finnas olika solceller för att i praktiken kunna jämföra mängden el de kan producera över tid. Anläggningarnas produktionsdata är hämtade från Region Uppsalas Energiportal i April 2023. Solceller av olika märken produceras i olika länder. Solcellerna av märket Trina solar har fabriker i framförallt Kina, men även i Thailand och Vietnam (Trina Solar 2023). Märkena PPAM (PPAM solkraft 2023), IBC (IBC Solar 2023), Yingli (Yingli Solar 2023) och GCL (GCL 2023) har alla fabriker i Kina. Märket Q.cellsIBC har majoriteten av sina fabriker i Kina, men även fabriker i USA, Sydkorea och Malaysia (Qcells 2023). LGIBC har fabriker i Sydkorea och USA (LG 2020). Solibros solceller tillverkas i Tyskland (Kamal 2017). Vissa av företagen har valt att ej nämna tillverkningsland på deras respektive professionella hemsidor och information om vissa tillverkningsländer har behövt hämtas från företagskopplade bloggsidor för att hitta denna undgängömda information. Förutom egenproducerade solelen köper Region Uppsala el från en elmix bestående av mycket fossila energislag i form av vind, vatten, bioenergi och kärnkraft (Systemstudie Energi 2050 u.å.).

### 1.2.1 Solcellsteknikerna

Anläggningarna i Uppsala Regions solcellspark har solceller av olika solcellstekniker: mono standard, poly standard, mono BiFacial, mono PERC, CIGS thin film eller mono Half-cut. Anläggningarna Enköpings Lasarett A, Enköpings Lasarett B, Återvinningscentralen C2-C3 och Rudbecklaboratoriet C11 har solceller av blandade tekniker på deras tak (figur 2). Dessa anläggningars produktionsvärde kan därför skilja sig åt beroende på hur uppsättningen av solceller på taket ser ut. Benämningen solcell syftar på modulen i sin helhet, även kallad panelen, och syftar inte på de enskilda cellerna.

### 1.2.2 Mono std och poly std

Standardsolceller har vanligtvis en glasskiva framtill och polymerfolie baktill, som omsluter laminerade små celler och kontakter. Fram och baksidan är formad för att kunna ta emot så mycket solinstrålning som möjligt. Framsidan är täckt av ett antirefleksionslager. Skivan består av kisel. Tillsammans bildar dessa komponenter panelen. Solcellspanelen har en skyddande ram bestående av aluminium. Monokristallina standardsolcellsmoduler (mono std) baseras på kisel av en enda homogen struktur som kallas kiselkristall. De skärs till en platta av tjocklek 0,3 mm. En nackdel med monokristallina standardsolceller är att kostnaden är generellt högre än för polykristallina standardsolceller, då produktionsprocessen är mer komplicerad. Fördelen är att monokristallina solceller uppnår högre verkningsgrader än polykristallina solceller. Monokristallina solpaneler tillsammans med polykristallina solceller dominerar idag marknaden. Även polykristallina standardsolceller (poly std) baseras på kisel, men till skillnad från

monokristallina solceller, som baseras på bara en kiselkristall, baseras polykristallina solceller på flera hopsmälta kiselfragment (Dobrzański et al. 2013).

### 1.2.3 Mono BiFacial

Denna solcell består av monokristallina celler, men är till skillnad från standardpanelen dubbelsidig och har en transparent baksida. Baksidan består oftast av glas men kan även bestå av andra transparenta material. Mono BiFacial solcellen kan därför absorbera ljus från både fram och baksida. Det gör solcellen effektiv på att ta upp diffust, reflekterat ljus. Detta är mycket fördelaktigt då produktionen el per kvadratmeter ökar. Denna teknik är som mest effektiv om solcellen placeras på ljusa ytor, vilket gör att den fördelaktigen används över exempelvis snötäckt mark. Nackdelen med solcellen är den högre kostnaden jämfört med en mono std (Guerrero-Lemus et al. 2016).

### 1.2.4 Mono PERC

Denna monokristallina solcell har fått en ny effektivare struktur genom att addera ett isolerande dielektriskt passiveringslager och ett förstärkande täcklager. Det gör att mer solljus kan absorberas och mer el kan bildas. På så sätt kan man höja elproduktionen på en begränsad takyta. Tekniken har vuxit sig stor på marknaden senaste decenniet tack vare dess höga effektivitet till en lägre kostnad. Forskning på förbättringar av passiveringslager görs idag för att minska elförluster och förbättra effektiviteten ytterligare (Kim et al. 2022).

### 1.2.5 CIGS thin film

Tunnfilmssolceller är tunnare och böjbara till skillnad från standardsolceller. De kan fördelaktigen placeras på ytor där standardsolceller inte kan placeras. Det finns olika slags tunnfilmssolceller, som fått sina namn uppkallade efter deras material. T.ex. CdTe (kadmium, tellurid) eller CIGS (koppar, indium, gallium, selen). Denna studie har bara rört tunnfilms-modellen "CIGS" (Energimyndigheten 2019b). Solcellen har några få lager kisel på glasytan och det går ej att urskilja celler (Dobrzański et al. 2013). På grund av den tunna designen är materialtillgången generellt sett mycket lägre än för kiselceller. Kostnaden för tunnfilmssolceller är generellt sett högre än för standard kiselceller (Energimyndigheten 2019b).

### 1.2.6 Mono Half-cut

Denna solcell har hälften så stora men dubbelt så många celler jämfört med standardpaneler. Detta för att minska interna förluster som annars sker från flödet av ström från en cell till en annan. Solcellen skärs med laserteknik i två delar vilket minskar strömkapaciteten och därmed även energiförlusten. På så sätt får man en förstärkt effektivitet. När solcellen delas i två halvor genererar vardera halva lika hög spänning, vilket leder till en ökad spänning totalt för solcellen samtidigt som mängden ström förblir densamma. Solcellen blir extra fördelaktig när solen är stark då den kan få höga pikar. Den minskade strömkapaciteten för Half-cut gör att



solcellen genererar el trots att solcellen kommer upp i höga temperaturer  $>25^{\circ}\text{C}$ , vilket minskar problem med generering av el vid överhettning (Shukir 2022).

### 1.3 Syfte och frågeställningar

Syftet med denna studie är att undersöka organisationen Region Uppsalas anläggningars klimatutsläpp ur ett livscykelperspektiv. Studiens frågeställningar är:

- Hur stora är vardera anläggningars klimatutsläpp?
- Vilka är de mest bidragande utsläppsfaktorerna?
- Vilken påverkan har anläggningarna på Sveriges klimatmål?
- Hur stora är solcellsanläggningarnas utsläpp i jämförelse med energislagen vindkraft, vattenkraft eller fossilt kol?

## 2. Metod

### 2.1 Livscykelanalyser

Livscykelanalyser används för att bedöma miljöpåverkan vilket blir användbart inom miljöstyrningssystem och miljömärkning. Den ger både uppfattning om resursflöden och miljöpåverkan. Livscykelanalyserna som används i denna studie är så kallade bokförings-LCA, vilket innebär att de svarar på hur stor miljöpåverkan något har här och nu (Soto, A. 2022). Den funktionella enheten som använts är 1 kWh, då klimatutsläppen jämförs mot mängden el som produceras. Den miljöpåverkan som studien fokuserar på är klimatpåverkan med global warming potential för tidsintervall 100 år.

Solcellsteknikernas utsläpp kunde beräknas genom att sammanställa livscykelanalyser. Mono std och poly std har använt livscykelanalysen *“Environmental Impacts of Photovoltaics: The Effects of Technological Improvements and Transfer of Manufacturing from Europe to China”* (Stamford et al. 2018). För mono BiFacial och mono PERC användes *“Life cycle assessment on PERC solar modules”* (Jia et al. 2021). För CIGS thin film användes *“Environmental impacts of copper-indium-gallium-selenide (CIGS) photovoltaics and the elimination of cadmium through atomic layer deposition”* (Stamford et al. 2019) och för mono Half-cut användes *“A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory”* (Müller et al. 2021). Dessa livscykelanalyser har valts då de matchar solcellerna på Region Uppsalas anläggningar gällande teknik, verkningsgrader, effekt, storlek, tyngd och antal celler. Solcellerna på Region Uppsalas anläggningar har antagits livslängden 25 år då detta varit standard för livscykelanalyserna. För att livscykelanalyserna ska vara jämförbara med varandra behöver systemgränser ses över.

#### 2.1.1 Koldioxidekvivalenter

Denna sammanställning av livscykelanalyser har bara tagit hänsyn till klimatutsläpp. Till koldioxidekvivalenter (CO<sub>2</sub>e) räknas koldioxid, metan och lustgas. Då dessa ämnen sammanställs behöver gasernas uppvärmningspotentialer tas hänsyn till så att gaserna kan bli översatta till samma enhet. Uppvärmningspotentialen fungerar så att för varje utsläppsmängd bidrar metan 28

gångar mer till växthuseffekten än vad koldioxid gör, se tabell 1 (Naturvårdsverket 2023).

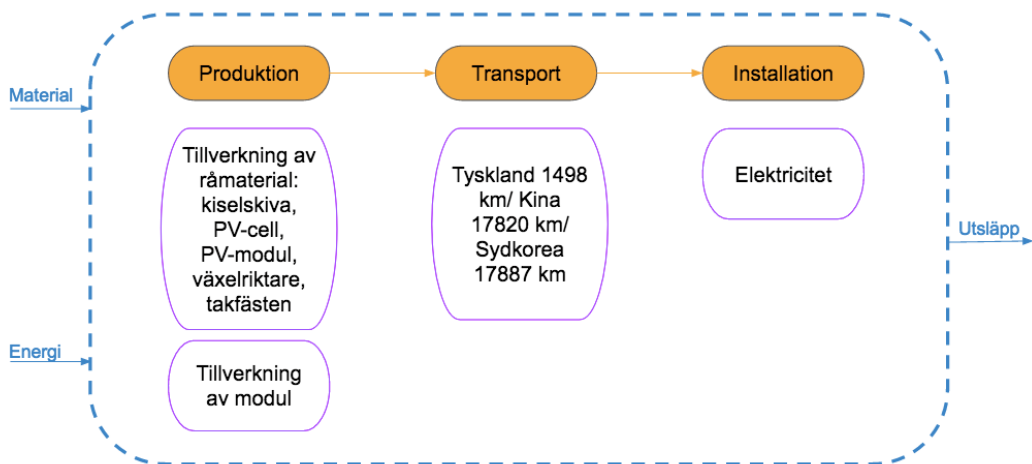
Tabell 1. Växthusgaserna och deras uppvärmningspotentialer (Naturvårdsverket 2023).

Växthusgas	GWP
Koldioxid, CO <sub>2</sub>	1
Metan, CH <sub>4</sub>	28
Dikväveoxid, N <sub>2</sub> O	265

## 2.2 LCA Systemgränser

För att ta reda på hur stora utsläppen blir för de olika anläggningarna behövdes livscykelanalyser (LCA). Tack vare rikedomerna på redan befintliga livscykelanalyser valdes att göra en sammanställning istället för en egen analys för varje solcellsanläggning. Passande livscykelanalyser som anger klimatutsläpp i enheten gCO<sub>2</sub>e/kWh valdes ut för alla 6 solcellstekniker som finns på organisationen Region Uppsalas anläggningar. För att få konsistenta, jämförbara värden mellan de olika livscykelanalyserna justerades systemgränserna så att de alla inkluderade samma processer. Det innebär att processer som avfallshantering eller reparationer behövs räknas bort för två livscykelanalyserna, den för mono BiFacial och mono PERC (Jia et al. 2021), samt den för mono Half-cut (Müller et al. 2021). Utsläppen från alla livscykelanalyserna räknades om så att de matchade den valda systemgränsen.

Systemgränserna som denna sammanställning innefattar är produktion, transport och installation. Inräknat till produktion är tillverkning av material för kiselskivan, cellerna, modulen, växelriktare och takfästen, samt montering av modulen. Till transport räknas en sträcka från landet som tillverkningen skett i, till slutdestinationen i Uppsala. Beroende på modell har solcellerna transporterats från Tyskland, Kina, eller Sydkorea. Till installationen räknas monteringen av modulerna på taket, i form av elektricitet. Systemgränserna illustreras i figur 1.



Figur 1. Systemgränser efter sammanställning av alla livscykelanalyser.

Då underhåll som rengöring och reparationer uteslutits ur systemgränser blev det inga utsläpp under själva användningen. Utsläppen var alltså endast från produktion och installation. Avfallshantering exkluderades ur systemgränser på grund av brist på data. Bristen på data berodde enligt livscykelanalyserna på att det idag är svårt att förutsäga hur effektiv återvinningen av solceller kommer bli, på grund av den snabbt utvecklade forskningen på området (Stamford et al 2018). Installationsutsläppen har försumrats i livscykelanalysen för CIGS thin film och mono Half-cut.

## 2.3 Solcellernas tillverkningsländer och transport

Tillverkningsländerna för alla solcellsmärken kollades upp på producenternas respektive hemsidor. Utsläppen från transport beräknades i programmet NTMCalc 4.0 samt programmet Searoutes. Information från livscykelanalysen *“Life cycle assessment on PERC solar modules”* användes i programmet för att beräkna transporten. Livscykelanalysen utgick då från en energianvändning på 1 573 kWh/m<sup>2</sup>/år och medelvikten 16,388 ton. Lastbilen som antogs var >32 ton. Containern som antogs användas var fylld till 70 %, med 840 st/40 fot-container (Jia et al. 2021).

Solcellerna har transporterats från tillverkningsland till Uppsala, vilket motsvarar en sträcka på 1 498 km från Prenzlau Tyskland, 17 820 km från Nanjing, Kina och 17 820 km från Gumi, Sydkorea. Från Tyskland har frakten skett med lastbil (NTMCalc). För Kina och Sydkorea har majoriteten av frakten skett med lastfartyg, men även lastbil har använts. Searoutes användes för att räkna ut lastfartygens sträckor för transporten från Kina och Sydkorea, då kartdatan inte gick att få fram i NTMCalc.

Eftersom Kina och Sydkorea är två länder med väldigt lika elmix har utsläppen vid produktion antagits vara lika stora för båda länderna. Kinas elmix bestod till 76 % av kolkraft, 16 % vattenkraft, resterande övrigt är en mix mellan vindkraft 3 %, kärnkraft 2% och övriga mindre källor. Tysklands elmix bestod istället av 25 %

brunkol, 18 % kolkraft, 16 % kärnkraft, 10 % naturgas, 9 % vindkraft, 7 % biobränsle, 6 % solkraft och övriga mindre källor (Stamford et al. 2018).

## 2.4 Beräkna utsläpp

Värdena från de olika livscykelanalyserna räknades om för att matcha Uppsalas förutsättningar. Att  $\text{gCO}_2\text{e/kW}_p$  är ett konstant värde för en viss solcellsteknik utnyttjades för att beräkna utsläppen för specifikt uppsalas anläggningar. Livscykelanalysernas utsläpp räknades om från  $\text{gCO}_2\text{e/kWh}$  till  $\text{gCO}_2\text{e/kW}_p$ , för att sedan ta Uppsalas praktiskt uppmätta produktivitet i  $\text{kWh/kW}_p$  för att få Uppsalas anläggningars utsläpp i  $\text{gCO}_2\text{e/kWh}$ . Produktiviteten är beräknad genom kilowatteffekten för en timme dividerad på toppeffekten för en solcellspanel. Klimatutsläppen beräknades även i ton/år. Teoretiska värden för de anläggningar som varit ur drift har antagits. Värdena beräknades genom att sortera anläggningarna utifrån produktion  $\text{kWh/kW}_p$  per månad och ta medelvärdet av den anläggningen som producerade strax mer och strax mindre.

Anläggningarnas utsläpp:

1. 
$$\frac{\text{Klimatpåverkan per energi (LCA)} [\text{gCO}_2\text{e/kWh}] \times \text{Produktivitet (LCA)} [\text{kWh/kW}_p]}{\text{Klimatpåverkan per effekt}} [\text{gCO}_2\text{e/kW}_p]$$
2. 
$$\frac{\text{Klimatpåverkan per effekt} [\text{gCO}_2\text{e/kW}_p]}{\text{Produktivitet (Uppsala)} [\text{kWh/kW}_p]} = \text{Klimatpåverkan per energi (Uppsala)} [\text{gCO}_2\text{e/kWh}]$$

Klimatutsläpp i ton/år:

3. 
$$\text{Klimatpåverkan per energi (Uppsala)} [\text{gCO}_2\text{e/kWh}] \times \text{Energi per år} [\text{kWh/år}] = \text{Utsläpp per år (Uppsala)} [\text{gCO}_2\text{e/år}]$$
4. 
$$\frac{\text{Utsläpp per år ( uppsala)} [\text{gCO}_2\text{e/år}]}{1\,000\,000} = \text{Utsläpp per år (Uppsala)} [\text{tonCO}_2\text{e/år}]$$

Utsläppsdata för olika energislag från FN:s mellanstatliga klimatpanel IPCC användes för att jämföra solcellsanläggningarnas utsläpp med teoretiska medelvärdet för solceller, samt andra energislags medelvärden (Schlömer et al. 2014).

## 3. Resultat

### 3.1 Sammanställda data

Data från Region Uppsalas energiportal, samt tillverkningsland och vikt har sammanställts för vardera anläggningar. Fabriksländerna som de olika solcellerna tillverkas i kollades upp för alla olika solcellsmärken och för märken som har fabriker i flera olika länder har det förenklat antagits att solcellen producerats i det land som flest fabriker finns i. Märkena på solcellerna är avgörande för tillverkningsland. Produktiviteten varierar för de olika anläggningarna i Uppsala Region, med ett spann mellan 654 kWh/kW<sub>p</sub> till 1 141 kWh/kW<sub>p</sub>. Vikten på de olika solcellerna varierar från 16,6 kg till 25,5 kg och krävdes för att se över mängden material vid produktion (tabell 2).

Tabell 2. Region Uppsalas anläggningar samt respektive solcellsteknik, tillverkningsland, produktivitet och vikt. Anläggningar, teknik, märke och produktivitet har hämtats från Energiportelen i April 2023.

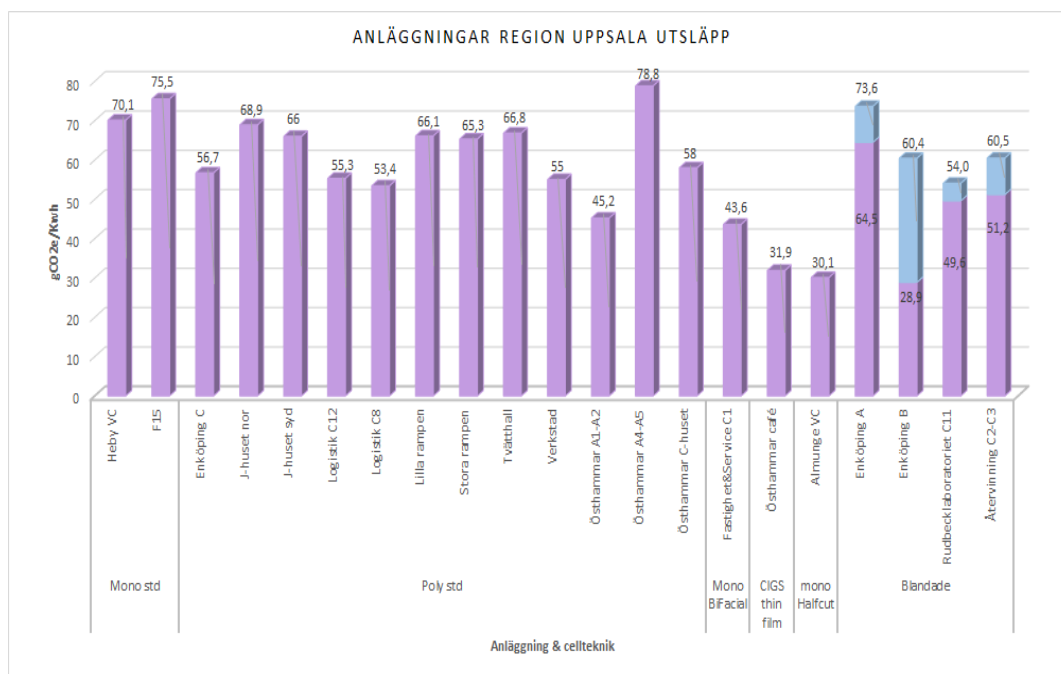
Anläggning	Teknik	Märke	Tillverkningsland	Produktivitet (kWh/kW <sub>p</sub> )	Vikt (kg)
Almunge vc	mono Half-cut	trina	Kina, Thailand, Vietnam	1092	18
Enköping A:	mono std poly std	PPAM	Kina	799	21
Enköping B	poly std mono BiFacial	PPAM	Kina	853	23
Enköpng C	poly std	PPAM	Kina	909	23
Fast&serv C1	mono BiFacial	PPAM	Kina	973	25,5
Heby vc	mono std	IBC	Kina, Tyskland	839	18,5
J. huset Nor	poly std	IBC	Kina, Tyskland	748	18,5
J-huset Syd	poly std	IBC	Kina, Tyskland	781	18,5
F15	mono std	Yingli	Kina	779	19,1
Logistik C12	poly std	IBC	Kina	931	18,5
Logistik C8	poly std	IBC	Kina	965	18,5
Lilla rampen	poly std	GCL	Kina	780	18,5

Stora rampen	poly std	GCL	Kina	789	18,5
Tvätthall	poly std	GCL	Kina	772	18,5
Verkstad	poly std	GCL	Kina	937	18,5
Rudbeckslaboratoriet C11	mono BiFacial mono PERC	LGIBC	Sydkorea, USA	940	22
ÅtervinningsC C2- C3	mono Half-cut mono PERC	Q.CellsIBC	Kina, USA, Sydkorea, Malaysia	840	19,5
Östh:A1-A2	poly std	GCL	Kina, USA, Sydkorea, Malaysia	1141	18,5
Östh:A2 café	CIGS thin film	Solibro	Tyskland	711	16,6
Östh:A4-A5	poly std	GCL	Kina	654	18,5
Östh:C-huset	poly std	GCL	Kina	889	18,5

### 3.2 Anläggningar

Mono std solceller finns uppsatta på två av anläggningarna i Uppsala Region: Heby VC och Kvinnokliniken F15. Poly std solceller finns uppsatta på anläggningarna: Enköping C, J.huset nord- och syd, Logistikhuset C12 och C8, Lilla och Stora rampen, Tvätthallen, Verkstaden, Östhammar A1-A2 och A4-A5 samt C-huset. Anläggningarna med poly std solceller uppsatta ger varierade utsläpp mellan 45,2 gCO<sub>2</sub>e/kWh och 78,8 gCO<sub>2</sub>e/kWh. Mono BiFacial finns på anläggningen Fastighet och service. CIGS thin film finns på anläggningen Östhammars café. Mono Half-cut finns på Almunge vårdcentral. Anläggningarnas respektive utsläpp illustreras i figur 2. Utsläppen hos de fyra anläggningarna med blandade solcellstekniker kan variera beroende på hur många av vardera tekniker som sitter på anläggningen. Utsläppens variation beroende på blandad teknik illustreras med en blå färg i figur 2. Enköping A har blandade solceller av mono std och poly std uppsatta på taket och utsläppen ligger runt 64,5 gCO<sub>2</sub>e/kWh till 73,6 gCO<sub>2</sub>e/kWh. Enköping B har blandade solceller av mono BiFacial och poly std, och har utsläpp runt 28,9 gCO<sub>2</sub>e/kWh till 60,4 gCO<sub>2</sub>e/kWh. Rudbeckslaboratoriet har solceller av mono BiFacial och mono PERC och har utsläpp runt 49,6 gCO<sub>2</sub>e/kWh till 54,0 gCO<sub>2</sub>e/kWh. Återvinningscentralen C2-C3 har blandade solceller av tekniken mono PERC och mono Half-cut, med utsläpp runt 51,2 gCO<sub>2</sub>e/kWh till 60,5 gCO<sub>2</sub>e/kWh (figur 2).

Anläggningen Almunge vårdcentral har lägst utsläpp, på 30,1 gCO<sub>2e</sub>/kWh. Den följs av Östhammar A2 café, Fastighet- och Service C1 och Enköpings lasarett B. De anläggningar som har högst utsläpp är Östhammar A4-A5, på 78,8 gCO<sub>2e</sub>/kWh och Kvinnobarnsjukhuset F15 på 75,5 gCO<sub>2e</sub>/kWh, se figur 2.

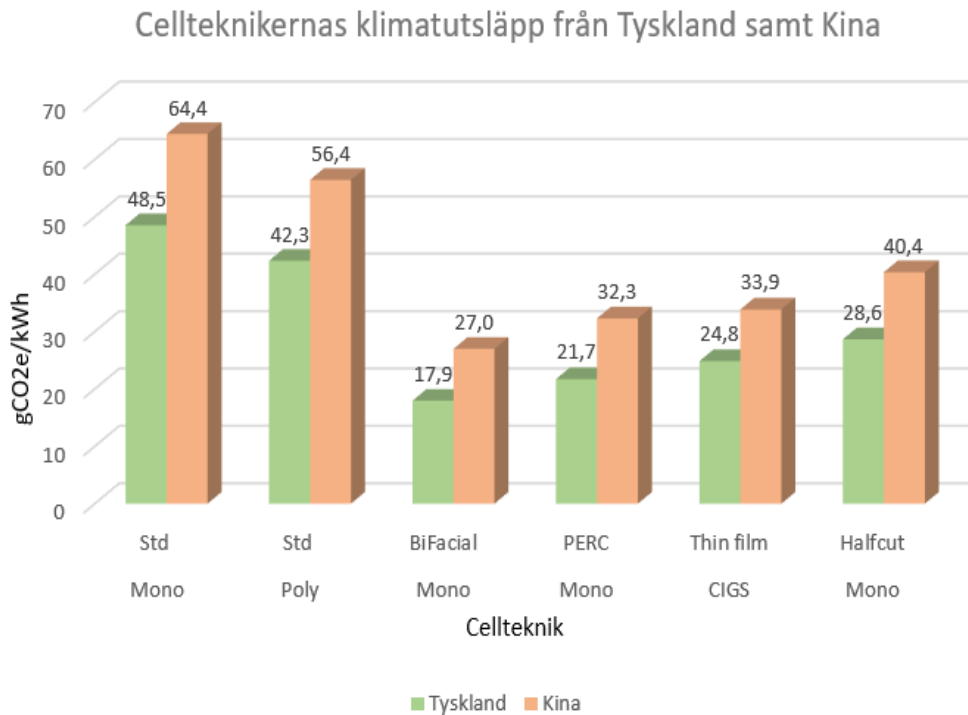


Figur 2. Klimatutsläpp i gCO<sub>2e</sub>/kWh (x-axeln) för vardera anläggningar i Region Uppsala (y-axeln). Anläggningarna är kategoriserade i solcellstekniker. Studien har tagit hänsyn till solcellerna på vardera anläggningars riktiga produktions och transportländer vid utsläppsberäkning. Utsläppen för kategorin med blandade solcellstekniker är osäkra på grund av brist på data. Värdet på de blandade kan därav variera mellan den lila och blå stapeln beroende på andelen av vardera solcellsteknik.

### 3.3 Solcellstekniker

De olika solcellsteknikernas utsläpp är tagna från LCA-värden från ett specifikt land (Tyskland eller Kina). Utsläppen behövde därför räknats om för att matcha det andra produktionslandet, eftersom olika solcellsmärken har fabriker i antingen Kina eller Tyskland (figur 3). Av alla solcellstekniker uppskattades mono std från Kina vara den som släpper ut mest totalt under sin livstid, 64,4 gCO<sub>2e</sub>/kWh. Vid tillverkning och transport från Tyskland motsvarar detta 48,5 gCO<sub>2e</sub>/kWh, då transport och produktionsutsläppen för vardera teknik är lägre för Tyskland än Kina. Näst mest utsläpp kommer från poly std från Kina. Den följs sedan av mono Half-cut, CIGS thin film, mono PERC och slutligen mono BiFacial. En mono BiFacial från Kina släpper ut 27,0 gCO<sub>2e</sub>/kWh vilket gör solcellen till den teknik från Kina som har totalt minst utsläpp. Den motsvarande solcellen från Tyskland släpper ut minst av alla solcellsteknikerna oavsett tillverkningsland, 17,9 gCO<sub>2e</sub>/kWh (figur 3).





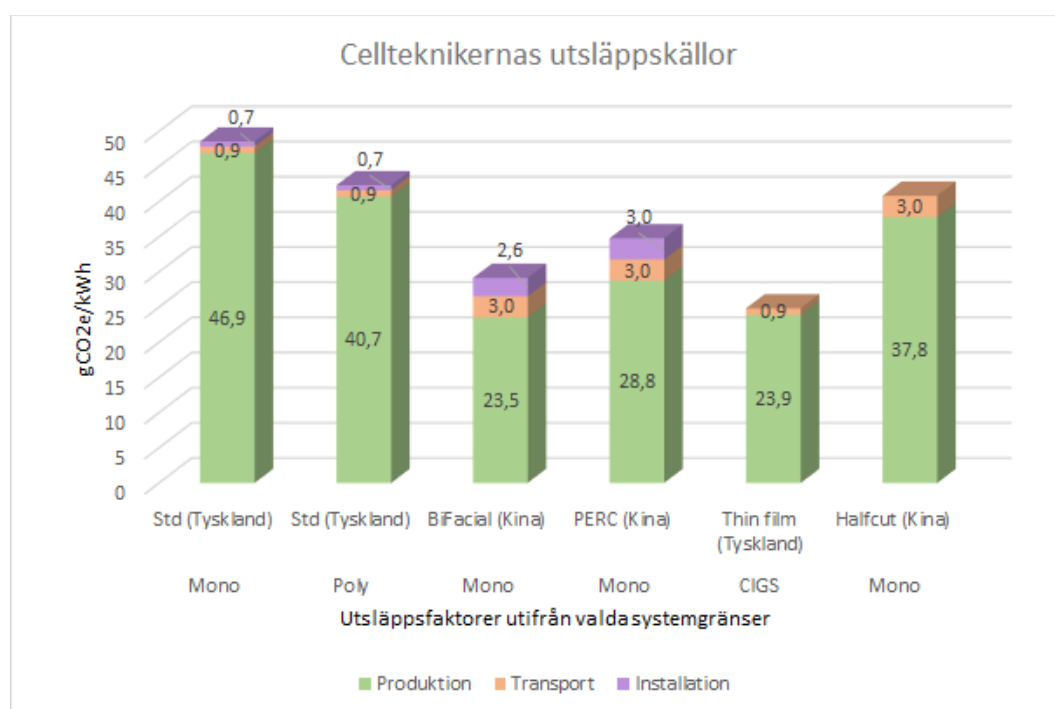
Figur 3. Totala utsläppen i gCO<sub>2</sub>e/kWh (x-axeln) för vardera solcellstekniker (y-axeln). Produktion och transport jämförs mellan Kina och Tyskland. Beräknat över solcellernas livstid. Utsläppen för vardera solcellsteknik baseras på de olika livscykelanalyserna och utgår från studiens valda systemgränser.

### 3.4 Produktion, transport, installation

De största utsläppen kommer från produktionen av solcellerna. Produktionsutsläppen för en mono std motsvarar 97 % av totala utsläppen hos solcellstekniken om produktionen och transporten likt livscykelanalysen är från Tyskland. Produktutsläppen för en poly std motsvarar 96 % om produktionen och transporten likt livscykelanalysen är från Tyskland. Mono BiFacial:s produktionsutsläpp motsvarar 87 % om produktionen och transporten likt livscykelanalysen är från Kina. Mono PERC:s utsläpp motsvarar 89 % om produktionen och transporten likt livscykelanalysen är från Kina. Utsläppen från produktion av CIGS thin film motsvarar 96 % om produktionen och transporten likt livscykelanalysen är från Tyskland. Produktionsutsläppen från Half-cut motsvarar 94 % om produktionen och transporten likt livscykelanalysen är från Kina. Livscykelanalyserna för mono std, poly std och CIGS thin film har utgått från tillverkning i Tyskland vilket ger lägre transportutsläpp än livscykelanalyserna för mono PERC, mono BiFacial och mono Half-cut. Installationens utsläpp varierar mellan 0,7 gCO<sub>2</sub>e/kWh till 3,0 gCO<sub>2</sub>e/kWh beroende på livscykelanalys (figur 4)

Figur 4 visar att faktorn i solcellers livscykel som bidrar till högst utsläpp är produktionen, följt av transporten och slutligen installationen. Livscykelanalysernas produktionsutsläpp varierar mellan 23,5 gCO<sub>2</sub>e/kWh och 46,9 gCO<sub>2</sub>e/kWh. Bidraget från produktionen blir ännu större för de anläggningar som har solceller producerade i Kina, 60,5 gCO<sub>2</sub>e/kWh, eftersom det högsta utsläppsvärdet i LCA på 46,9 % utgår från en LCA med produktion i Tyskland. Utsläppen från Kinas produktion beräknas vara 29% högre än Tysklands produktion.

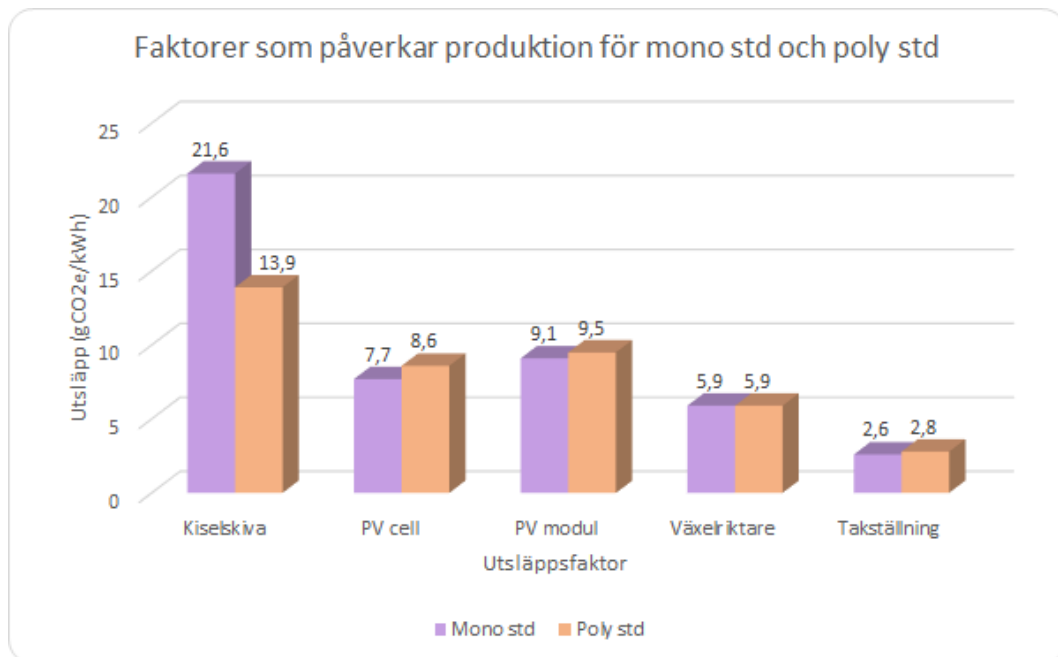
Transportsträckans roll för klimatutsläppen är betydligt mindre än utsläppen från produktionen. Utsläppen varierar från 0,9 till 3,0 gCO<sub>2</sub>e/kWh. Minst utsläpp kommer från installationen. Till installationen räknades elektriciteten vid installering av solcellerna, som utgör endast en liten mängd utsläpp i jämförelse med resterande faktorer. Utsläpp för installation har på grund av den låga mängden försumrats ur livscykelanalyserna för CIGS thin film (Stamford et al. 2019) och mono Half-cut (Müller et al. 2021). De har därför inte tagits med i denna studies beräkningar (figur 4).



Figur 4. Utsläppen i gCO<sub>2</sub>e/kWh (x-axeln) för vardera solcellsteknik (y-axeln), kategoriserat i olika utsläppsfaktorer: Produktion, transport och installation. Utsläppsfaktorerna är inom studiens systemgränser och exkluderar användning och avfallshantering. Utsläppsdata är taget från respektive LCA.

### 3.5 Utsläpp vid produktion

För att undersöka varför produktionen står för största klimatutsläppen kan man jämföra två solcellsteknikers produktionsutsläpp, t.ex. mono std och poly std. Mono std och poly std går väl att jämföra då livscykel-inventeringar gjorts inom samma LCA, med samma metod, samt att utsläppen skiljer avsevärt trots liknande material. Utsläppsfaktorerna för solcellsteknikerna vid produktion är liknande i alla faktorer utom tillverkning av kiselskiva. Utsläppen från kiselskivan är markant högre för mono std, på 21,6 gCO<sub>2</sub>e/kWh, än för poly std på 13,9 gCO<sub>2</sub>e/kWh (figur 5).



Figur 5. Utsläppen i gCO<sub>2</sub>e/kWh (x-axeln) för olika delar av produktionen (y-axeln) för monokristallina standardsolceller samt polykristallina standardsolceller.

### 3.6 Transporter

Transporterna från tillverkningsländerna Tyskland, Kina eller Sydkorea, till Uppsala visar på att transportsträckan från Tyskland ger minst utsläpp följt av Kina och slutligen Korea, se tabell 3.

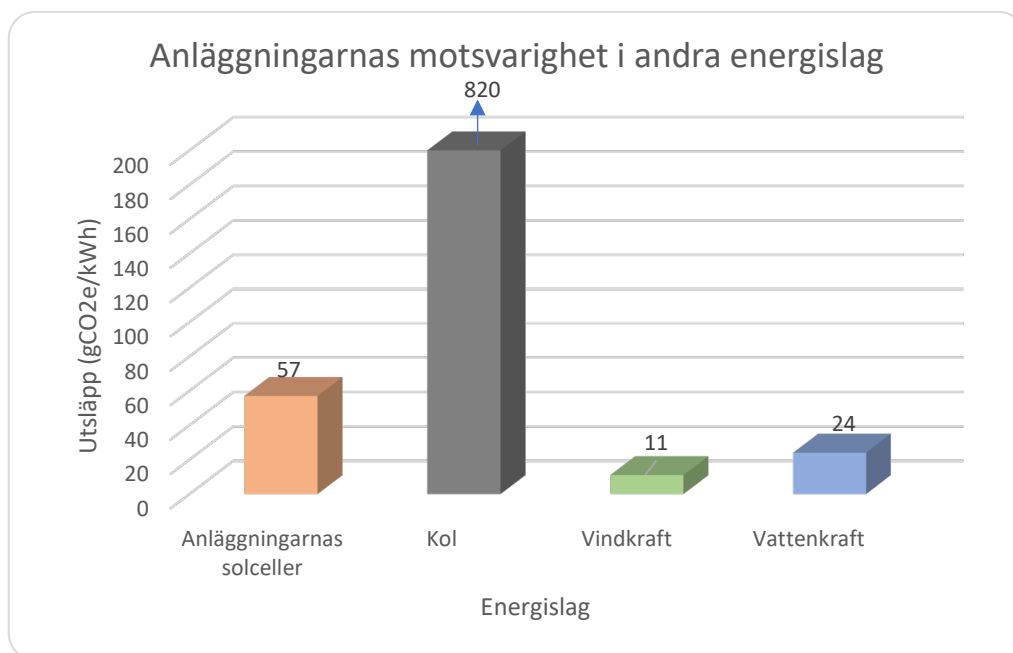
Transportsträckans roll för klimatutsläppen är betydligt mindre än utsläppen från produktion. Transportutsläppen är som högst för de solceller som producerats och transporterats från Sydkorea, se tabell 3, vilket beror på att det är den längsta jämförda sträckan (17 887 km). Även typ av fordon spelar roll för transportutsläpp då ett lastfartyg rimligen fraktar mer last under en sträcka jämfört med en lastbil. Utsläppen från Kina till Uppsala med endast lastbil hade gett orimliga samt väldigt höga utsläppsvärden, så lastfartyg har därför varit utgångspunkten från Kina och Sydkorea (Searoutes).

Tabell 3. Tillverkningsländerna, fraktsträcka och motsvarande transportutsläpp.

Land	Frakt (km)	Utsläpp (kgCO <sub>2</sub> e)
Tyskland	1498	2 048
Kina	17 820	6 653
Sydkorea	17 887	6 678

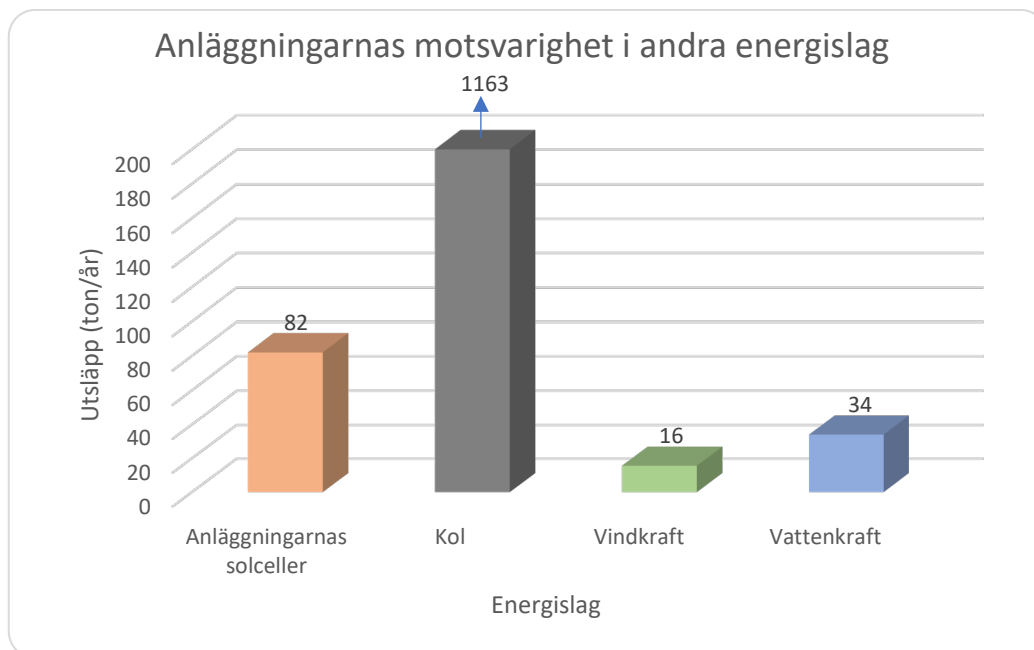
### 3.7 Jämförelse med andra energikällor

Medelvärdet av alla anläggningarnas utsläpp i figur 2 ligger på 57 gCO<sub>2</sub>e/kWh totalt per år. Om annat energislag istället hade använts för att uppnå samma totala elmängd hade det motsvarat årliga utsläppen 820 gCO<sub>2</sub>e/kWh från kol, 11 gCO<sub>2</sub>e/kWh från vindkraft och 24 gCO<sub>2</sub>e/kWh från vattenkraft (Schlömer et al. 2014), se figur 6.



Figur 6. Utsläppen i gCO<sub>2</sub>e/kWh (x-axeln) för solcellsanläggningarnas medelvärde och utsläppens motsvarighet i andra energislag (y-axeln) om samma årliga elproduktion på 1 420 000 kWh används. Jämförda energislagen är kolkraft, vindkraft och vattenkraft.

Medelvärdet av alla anläggningarnas totala utsläpp per år (ej viktat) omräknat från 57 gCO<sub>2</sub>e/kWh är 82 ton. Om annat energislag istället hade använts för att producera samma totala elmängd hade det motsvarat utsläppen 1 163 ton/år från kol, 16 ton/år från vindkraft och 34 ton/år från vattenkraft (figur 7).



Figur 7. Utsläppen i ton/år (x-axeln) för alla solcellsanläggningar eller utsläppens motsvarighet i andra energislag (y-axeln), om samma årliga elproduktion på 1 420 000 kWh används. Jämförda energislagen är kolkraft, vindkraft och vattenkraft.

## 4. Diskussion

### 4.1 Produktiviteten och produktionens betydelse för resultatet

Anläggningarna Almunge vårdcentral, Östhammar A2, Fastighet- och Service C1 och Enköpings lasarett B har lägst utsläpp, se figur 2. Anläggningarnas låga utsläpp kan antingen bero på att solcellerna är av solcellstekniker som ger lägre utsläpp vid solcellernas produktion, eller att de är solceller av hög produktivitet. Att produktiviteten på solceller påverkar mängden utsläpp ur ett livscykelperspektiv beror på att utsläppen mäts per kWh. Högre kWh innebär att mer el produceras för samma tillverkade produkt. Almunge vårdcentral är av solcellstekniken Half-cut (tabell 2). Tekniken Half-cut, med produktion och frakt från Kina på 17 820 km (tabell 3), har produktionsutsläpp på 37,8 gCO<sub>2e</sub>/kWh (figur 4) vilket är högre än majoriteten av solcellsteknikerna. Teknikens utsläpp överlag är av tredje största på 40,4 gCO<sub>2e</sub>/kWh (figur 3). Produktionen verkar därmed inte vara anledningen till de låga utsläppen för denna anläggning. Anläggningens solceller är däremot av den näst högsta produktiviteten av alla anläggningar, på 1 092 kWh/kW<sub>p</sub> (tabell 2) vilket förklarar dess lägre utsläpp.

Anläggningen Östhammar A2 Café är av solcellstekniken CIGS thin film (tabell 2). Denna teknik släpper vid produktion ut 23,9 gCO<sub>2e</sub>/kWh (figur 4) vilket är lägre än majoriteten av de olika teknikernas utsläpp. Totalt släpper denna solcellsteknik ut 24,8 gCO<sub>2e</sub>/kWh (figur 3). Solcellerna för denna anläggning har producerats och fraktats från Tyskland med transport på 1 498 km (tabell 3) vilket är det produktionsland som ger minst utsläpp överlag (figur 3). Den har en produktivitet på 711 kWh/kW<sub>p</sub>, vilket är lägre än majoriteten (tabell 2).

Anläggningen Fastighet- och service C1 är av solcellstekniken BiFacial. Tekniken med produktion från Kina har produktionsutsläpp på endast 23,5 gCO<sub>2e</sub>/kWh (figur 4) och har därmed lägsta utsläppen av alla solcellsteknikerna (figur 3). De låga utsläppen från produktionen förklarar anläggningens totala låga utsläpp. Solcellerna har även en produktivitet på 973 kWh/kW<sub>p</sub> vilket är högre än majoriteten (tabell 2).

Enköpings lasarett B har både solceller av tekniken BiFacial och poly std. Anläggningens solceller är producerade i Kina (tabell 2) och produktionsutsläppen ligger i snitt på 38,0 gCO<sub>2e</sub>/kWh (om lika många av vardera teknik antas) vilket är

över majoriteten av olika solcellsteknikernas utsläpp (figur 2). Anläggningen har en produktivitet på 853 kWh/kW<sub>p</sub>, vilket gör att denna anläggning har högre utsläpp än Almunge vårdcentral, Östhammar A2 café och Fastighet- och service, men lägre utsläpp än resterande anläggningar.

De anläggningar som har högst utsläpp är Östhammar A4-A5 och Kvinnobarnsjukhuset F15, se figur 2. Östhammar A4-A5 är av solcellstekniken polykristallin standard med Kina som produktionsland (tabell 2). Celltekniken har produktionsutsläpp på 52,5 gCO<sub>2</sub>e/kWh (beräknat 29 % större utsläpp än värdet från Tyskland i figur 4) vilket är bland de högsta utsläppen för solcellsteknikerna (figur 3). Anläggningen har en produktivitet på 654 kWh/kW<sub>p</sub> vilket är den lägsta effekten av alla anläggningarna (tabell 2). Kvinnobarnsjukhuset F15 är av solcellstekniken monokristallin standard från Kina. Tekniken har därmed produktionsutsläpp på 60,5 gCO<sub>2</sub>e/kWh vilket är det högsta produktionsutsläppet (beräknat 29% större utsläpp än värdet från Tyskland i figur 4). Anläggningen har en produktivitet på 779 kWh/kW<sub>p</sub> som är lägre än majoriteten (tabell 2). De höga produktionsutsläppen kombinerat med den låga produktiviteten är anledningen till att dessa anläggningars solceller ger högst utsläpp.

Den solcellsteknik som har allra lägst klimatutsläpp är en mono BiFacial om det tillverkas i Tyskland, 17,9 gCO<sub>2</sub>e/kWh (figur 3). Tekniken som bedöms ha allra högst utsläpp är monokristallin standard om den tillverkas i Kina, 64,4 gCO<sub>2</sub>e/kWh (figur 3). Detta beror till stor del på att solcellsproduktionen är lägst för mono BiFacial och högst för mono std (figur 4) samt att mono BiFacial solceller kan producera mer el än en polykristallin solcell om rätt förhållanden ges.

Överlag finns även sambandet att ju mer el en solcell kan generera desto mindre blir utsläppen. Den polykristallina solcellstekniken skiljer sig från denna trend då den genererar mindre el än vad en monokristallin standard gör, men ändå har mindre utsläpp. Att polykristallina solceller släpper ut mindre än monokristallina beror på att kiselskivan ger större utsläpp från en monokristallin jämfört med en polykristallin (figur 5). Den faktor som har störst påverkan när det kommer till produktion är framförallt tillverkningen av kiselskivan på grund av reningsprocessen (Energimyndigheten, 2021). Det förklarar även varför produktionens utsläpp är lägre för till exempel CIGS thin film då tekniken inte kräver produktion av en hel kiselskiva. Dock har CIGS thin film låg produktivitet vilket gör att mono BiFacial får minst utsläpp från produktion trots att den innehåller kiselskiva. Utvinningen och reningsprocessen av kiselskivorna vid produktion är det som påverkar utsläppen i störst grad (figur 5). Den monokristallina standardsolcellen kräver fler resurser vid produktion till skillnad från polykristallina. Den kräver även mer energi, samt ger mer restavfall och utsläpp av olika ämnen vid produktionen (Stamford et al. 2018).

## 4.2 Solcellernas påverkan på Uppsala Regions klimatutsläpp

De olika anläggningarna släpper i snitt ut 57 g CO<sub>2</sub>e/kWh vid sin årliga elproduktion på 1 420 000 kWh, vilket motsvarar 82 ton CO<sub>2</sub>e/kWh. Kol släpper istället ut 820 gCO<sub>2</sub>e/kWh. Solcellerna har endast 7% av kolets utsläpp. Hade den årliga elproduktionen istället för solcellsanläggningarna genererats från vattenkraft hade utsläppen legat på 24 gCO<sub>2</sub>e/kWh vilket är 42 % av utsläppen från solcellerna. Hade solcellsanläggningarna istället ersatts av vindkraft, med utsläpp på 11 gCO<sub>2</sub>e/kWh hade utsläppen blivit 19 % av vad de är med solcellerna (figur 6).

Region Uppsalas idag köpta el har av Fastighet- och serviceavdelningens egna data beräknats till 10,2 gCO<sub>2</sub>e/kWh.<sup>1</sup> Om den årliga elproduktionen för solcellerna istället skulle komma från Region Uppsalas köpta el hade klimatutsläppen blivit 14 ton CO<sub>2</sub>e/år. Det är 17 % av klimatutsläppen från solcellerna. Den egenproducerade och egenanvända solelen beräknas alltså ge högre klimatutsläpp än Region Uppsalas egenberäknade köpta el. Ökning av klimatutsläpp får motverkad effekt på etappmålet- att Sverige ska minska sina utsläpp med 85% till år 2045 jämfört med år 1990.

## 4.3 Solcellers betydelse i kolberoende länder

Anläggningarna vid årlig elproduktion på 1 420 000 kWh släpper ut 82 ton CO<sub>2</sub>e/år (Figur 7). Det motsvarar utsläppen 1 162,7 ton CO<sub>2</sub>e/år om källan istället varit kol. Om Region Uppsala varit kolberoende hade de sparat in 1 080 ton CO<sub>2</sub>e/år på att använda solcellsparken istället för att använda en källa bestående av endast kol för att producera elen. Idag består Region Uppsalas elmix av blandade förnybara energislag och ingen kol, så jämförelsen med kol görs endast för att kunna sätta utsläppen i perspektiv. Dock blir dessa siffror aktuella om man jämför ett land som fortfarande är mestadels kolberoende. Länder som exempelvis Kina har idag en elmix bestående av 75,5 % kol (Stamford et al. 2018), trots att majoriteten av världens solceller produceras i landet. En omställning till solceller i kolberoende länder skulle alltså vara av stor betydelse för att minska världens globala utsläpp.

## 4.4 Validering

Enligt IPCC ligger medelvärdet för solcellers klimatutsläpp på 41 gCO<sub>2</sub>e/kWh vilket är lägre än anläggningarnas medelutsläpp på 57 gCO<sub>2</sub>e/kWh. Att inte solcellerna för anläggningarnas medelvärde hamnar på samma värde som IPCC beror på att solceller generellt producerar mer energi i länder närmare ekvatorn där

---

<sup>1</sup> Hanna Marklund, teknikförvaltare energi – Fastighet och service, Region Uppsala, data till miljörapporten (Excel-format) [2023-06-08]



solinstrålningen är högre, vilket påverkar vid IPCC:s beräkning av medelvärdet. Klimatutsläppen varierar mellan 26–60 gCO<sub>2</sub>e/kWh beroende på vart de är uppsatta (Schlömer et al. 2014). Regionens utsläpp ligger alltså inom ett rimligt utsläppsvärde. Uppsalas årliga solinstrålning var 1 164.64 kWh/m<sup>2</sup>, medan ett land närmare ekvatorn, t.ex. Malta har en årlig solinstrålning på 2 087.61 kWh/m<sup>2</sup> (PVGIS). Solinstrålningens styrka varierar därför mycket beroende på lokalisering vilket påverkar utsläppsvärdet. IPCC har bara utgått från ett allmänt medelvärde av alla länder där energislagen förekommer. För noggrannare jämförelser mellan olika energislag skulle det behövas mer precisa data med utgångspunkt för Sveriges förutsättningar.

Annan forskning på solcellers miljöpåverkan från Energimyndigheten (2021) visar att största miljöpåverkan kommer ifrån tillverkningen av solceller, samt att majoriteten av tillverkandet sker i Kina som är ett land som använder framförallt fossil elmix. Detta stämmer väl överens med denna studie. Världsmarknaden består idag av 97 % kiselceller och det är framförallt kiset som tar energi och resurser vid utvinning och rening.

## 4.5 Studiens begränsningar och rekommendation för vidare forskning

Region Uppsalas anläggningar av solcellstekniken poly std har stor variation i produktivitet. Östhammar A1-A2 har en produktivitet på 1141 kWh/kW<sub>p</sub> medan Östhammar A4-A5 har en produktivitet på 654 kWh/kW<sub>p</sub> (tabell 2). Då de är två anläggningar som ligger nära varandra, som är lika gamla och av samma solcellsteknik bör variationen i produktivitet inte vara så stor. Produktiviteten för Östhammar A1-A2 är mycket högre än alla andra poly std och produktiviteten för Östhammar A4-A5 har allra lägst produktivitet (tabell 2). Kanske kan snö eller väderförhållanden vara felkällor som förklarar resultaten. Värdena för Östhammar A1-A2 och Östhammar A4-A5 i Energiportalen rekommenderas att ses över. Datan är tagen från Energiportalen i April 2023.

För en ännu noggrannare studie kan flera LCA från samma slags solcellsteknik sammanställas (genom att räknas om och jämföras under samma länder och systemgränser) innan de olika solcellsteknikerna jämförs med varandra. På så sätt minskar man felkällor som att olika metoder använts för olika LCA, eller att olika LCA är olika gamla. Det skulle ge data över mer uppdaterade elmixer och därmed noggrannare data på utsläpp vid framförallt produktion.

De olika solcellerna på varje anläggning har endast jämförts ned på märkesnivå när det kommer till produktionsländer. Detta för att lägga arbetet inom en rimlig tidsgräns. För vidare studier eller noggrannare resultat kan exempelvis livslängderna ses över ner på märkesnivå, då vissa nyare solceller idag har längre livslängder. En längre livstid innebär att en solcell kan generera mer el för samma tillverkade produkt vilket minskar utsläppen ur ett livscykelperspektiv.

Att jämföra olika LCA som är från olika år kan leda till att jämförelsen inte blir konsistent. Solcellsbranschen är en snabb utvecklad bransch och runt om i världen forskas det på hur man ska lyckas få ner de globala utsläppen. Det gör att elmixer förändras och därmed även utsläppen från solcellsproduktion. Till exempel är livscykelanalysen som används för mono och poly standard gjord år 2018 med mycket data taget från 2014 (Stamford et al. 2018), medan den för Half-cut är gjord år 2021 (Müller et al. 2021). Det innebär att solcellsteknikerna som jämförs i exakt samma LCA blir helt jämförbara då de har precis samma förhållande till varandra, medan de i förhållande till en annan LCA kan finnas skillnader (t.ex. förändringar i elmixer över åren) som kan påverka jämförbarheten. Även olika metoder har använts vid olika LCA, vilket man kan se i resultaten för installationen. Alla LCA har låga utsläpp från installationen, men vissa LCA har gett installationen mycket högre värden än andra LCA trots samma systemgräns. Att olika metoder använts för olika LCA ger därmed olika värden trots att samma systemgränser räknas med. För mer konsistent data bör solcellsteknikerna jämföras i en och samma LCA istället för att sammanställa flera olika.

Avfallshantering står för en del av utsläppen i livscykelanalyser, men har inte gått att ta hänsyn till eller jämföra i denna studie och finns därför inte med i systemgränserna (figur 1). Många av livscykelanalyserna (för mono std, poly std och CIGS) har inte redovisat utsläppen för avfallshantering. De menar att det inte gått att redovisa på grund av brist på data. Bristen på data anses bero på att det idag är svårt att förutsäga vilka framtida effekter avfallshanteringen kommer ha. Det forskas mycket på hur man kan utveckla återvinning av solceller och man tror att återvinningen i framtiden kommer leda till att abiotisk utarmning av resurser och toxiska effekter från metallbearbetning kommer minska avsevärt (Stamford et al. 2018).

Alla anläggningarna har ej varit i drift under hela året. Då data för de olika anläggningarna tagits från praktiska mätningar som presenteras i energiportalen har det uppstått problem med årliga solcellsproduktionen när vissa anläggningar tillfälligt tagits ur drift eller gått sönder. För att få jämförbara resultat har elproduktionen som skulle ha producerats behövt uppskattas på ett sätt som visar vad solcellerna skulle ha genererat om de varit i bruk under hela året. Regionbussdepån Lilla rampen har beräknats till 780 kWh/kW<sub>p</sub>, Regionbussdepån Stora rampen har beräknats till 789 kWh/kW<sub>p</sub>, Regionbussdepån Tvätthall har beräknats till 771,5 kWh/kW<sub>p</sub>, Regionbussdepån Verkstad har beräknats till 937 kWh/kW<sub>p</sub> och Östhammar A2 café har beräknats till 711 kWh/kW<sub>p</sub>. Då beräkningen skett med hjälp av ett räknat medelvärde istället för data från praktiska mätningar kan viss differens förekomma. Även värdet på totala elproduktionen på 1 420 000 kWh/år påverkas då även den baserats på de uppskattade värdena för om de trasiga solcellsanläggningarna varit i drift hela året.

Denna sammanställning av livscykelanalyser har bara tagit hänsyn till klimatutsläpp. Inga andra utsläpp har tagits hänsyn till, inte heller etiska aspekter som arbetsförhållanden. Det går därför inte att dra slutsatsen att dessa alternativ är mest miljövänliga, utan endast klimatvänliga. För att kunna göra en bedömning av miljöpåverkan från solceller i stort behöver fler midpoint-kategorier än

klimatpåverkan undersökas. Andra karakteriseringsfaktorer som är vanliga och som måste tas hänsyn till är abiotiska resurser (ADP), landanvändning, förtunning av ozonlager, humantoxicitet, ekotoxicitet, marknära ozon och försurning.

Då utvecklingen av solceller går snabbt framåt rekommenderas det att utgå från en ny och så specificerad livscykelanalys som möjligt för att få korrekta data.

## 5. Slutsats

Klimatutsläppen på de olika anläggningarna sett ur ett livscykelperspektiv är av stor variation. Variationen på klimatutsläppen för de olika anläggningarna beror på valet av solcellsteknik. Tekniken som ger högst utsläpp är en mono std från Kina, följt av poly std. Sedan mono Half-cut, CIGS thin film, mono PERC och slutligen mono BiFacial. Produktionsland och transport spelar in. Produktionsland påverkar genom att utgå från olika elmixer, där solcellsproduktion i Kina ger 29 % mer utsläpp än produktionen i Tyskland. Lägst utsläpp kommer därför från en mono BiFacial från Tyskland. Klimatutsläppen för de olika anläggningarna avgörs av balansen mellan solcellernas tillverkningsland och produktivitet. En solcell som kan producera mer el över en längre tid ger lägre klimatutsläpp i CO<sub>2</sub>e/kWh.

Den utsläppskategorin som påverkar klimatutsläppen mest under solcellernas livscykel är tillverkningen, därefter transport och sist installation. Transportutsläppen varierar beroende på om solcellen transporterats från Kina, Sydkorea eller Tyskland, där Tyskland har lägst transportutsläpp och Sydkorea högst. Att tillverkningen av solceller är faktorn som påverkar utsläppen mest beror på den energi- och kemikaliekrävande reningsprocessen av kiselskivor. Det som skiljer de olika teknikerna åt är främst materialtillgång och användning av kiselskiva, där den solcellsteknik som kräver mest energi vid rening, samt består av mest kisel, är den solcellsteknik som ger högst klimatutsläpp vid produktion. Mono std är den solcellsteknik som kräver mest energi- och resurskrävande kisel.

Sverige är idag inte beroende av kolkraft, utan har en elmix bestående av förnybara energislag. Om elen från Regionens solcellsproduktion istället skulle komma från deras köpta el skulle det endast ge 17 % av klimatutsläppen från solcellerna. Att det med solcellsparken sker en utsläppsökning går emot Sveriges klimatmål som säger att landet inte ska ha några nettoutsläpp av koldioxid efter 2045 och därefter ska utsläppen bli negativa.

Solcellerna skulle endast ha 7% av kolets utsläpp, om egenproducerade elen jämförelsevis kommit från fossilt kol. Hade elen kommit från vattenkraft eller vindkraft hade klimatutsläppen minskat och varit 42 % (vattenkraft) respektive 19 % (vindkraft) av utsläppen från solcellerna. Att göra en likadan solcellspark i ett kolberoende land som ersätter fossilt kol hade lett till att solcellerna sparar in 1 080 ton/år jämfört med fossilt kol. Det gör solceller till bra alternativ för omställningen till förnybara energikällor inom hållbar stadsplanering i kolberoende länder. Solcellerna har större klimatutsläpp än om samma mängd el producerats från vind eller vattenkraft.

# Referenser

- Beräkna klimatpåverkan* (u.å.). <https://www.naturvardsverket.se/vagledning-och-stod/luft-och-klimat/berakna-klimatpaverkan> [2023-05-25]
- DEFAULT/Our Company* (2016). *Trina Solar*. <https://www.trinasolar.com/eu-en/our-company> [2023-05-25]
- Det klimatpolitiska ramverket* (2023a). <https://www.energimyndigheten.se/klimat--miljo/sveriges-energi--och-klimatmal/det-klimatpolitiska-ramverket/> [2023-05-25]
- Dobrzański, L.A., Szczęsna, M., Szindler, M. & Drygała, A. (2014). Electrical properties mono- and polycrystalline silicon solar cells. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 59 (2)
- Elproduktion med fossila bränslen - internationellt* (2022). *Ekonomifakta*. <https://www.ekonomifakta.se/Fakta/elfakta/Energibalans-internationellt/Elproduktion-med-fossila-branslen/> [2023-05-25]
- Energiportal Region Uppsala* (u.å.). <https://energiportalregion uppsala.se/about> [2023-05-29]
- GCL System Integration | LinkedIn* (u.å.). <https://cn.linkedin.com/company/gcl-system-integration-technology-co.-ltd> [2023-05-25]
- Guerrero-Lemus, R., Vega, R., Kim, T., Kimm, A. & Shephard, L.E. (2016). Bifacial solar photovoltaics – A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1533–1549. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.041>
- Jia, X., Zhou, C., Tang, Y. & Wang, W. (2021). Life cycle assessment on PERC solar modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 227, 111112. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111112>
- JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission* (u.å.). [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html) [2023-05-25]
- Kim, J., Lee, S., Chowdhury, S. & Yi, J. (2022). A Brief Review of Passivation Materials and Process for High Efficiency PERC Solar Cell. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 23 (1), 1–5. <https://doi.org/10.1007/s42341-021-00366-5>

*Långsiktiga scenarier* (2023c). <https://www.energimyndigheten.se/statistik/prognoser-och-scenarier/langsiktiga-scenarier/> [2023-06-05]

Müller, A., Friedrich, L., Reichel, C., Herceg, S., Mittag, M. & Neuhaus, D.H. (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, 111277. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111277>

*NTMCalc 4.0* (u.å.). <https://www.transportmeasures.org/ntmcalc/v4/basic/index.html#/> [2023-05-25]

Ny Teknik skriver om dubbelsidiga PPAM Transparium - PPAM Solkraft - nyckelfärdiga solcellsanläggningar (2017). <https://ppam.se/ny-teknik-skriver-om-dubbelsidiga-ppam-transparium/> [2023-05-25]

*Olika typer av solceller* (2019b). <https://www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/lar-dig-mer-om-solceller/olika-typer-av-solceller/> [2023-05-25]

*Our Locations - Qcells Asia and Emerging Market* (u.å.). <http://qcells.com/ane/footer/our-locations> [2023-05-25]

*Outsourcing? Not LG – Our Solar Panels are Made by Us* (u.å.). *LG USA*. <https://www.lg.com/us/solar/blog/outsourcing-not-lg-our-solar-panels-are-made-by-us> [2023-05-25]

*Planera för sol* (2019a). <https://www.energimyndigheten.se/klimat--miljo/fysisk-planering/planera-for-sol/> [2023-05-25]

*Resan mot ett mer elektrifierat samhälle* (2023b). <https://www.energimyndigheten.se/klimat--miljo/sveriges-elektrifiering/> [2023-05-25]

Schlömer, S., Hänsel, G., de Jager, D. & Neelis, M. (2014). Technology-specific Cost and Performance Parameters.

Searoutes (u.å.). *Reduce your Carbon Emissions with our APIs*. Searoutes. [https://app.searoutes.com/routing/search/core?routing=%7B%22p%22%3A%5B%5D%2C%22r%22%3A%5B%5D%2C%22fri%22%3A0%7D&settings=%7B%22t%22%3A%7B%22asz%22%3Afalse%2C%22c2t%22%3A%22container%22%2C%22ba%22%3A%5B%5D%2C%22t%22%3A%22core%22%2C%22or%22%3A%5B%7B%22q%22%3A%221%22%2C%22stc%22%3A%2220GP%22%7D%5D%2C%22cr%22%3A%7B%22apoc%22%3Afalse%2C%22aprc%22%3Afalse%2C%22aci%22%3A%5B21%2C51%2C68%2C73%5D%2C%22nt%22%3A%22%22%7D%2C%22rm%22%3A%7B%22as%22%3Atrue%2C%22aro%22%3Afalse%2C%22ari%22%3Afalse%2C%22ara%22%3Afalse%7D%2C%22v%22%3A%7B%22d%22%3A4.5%2C%22s%22%3A10.8024%2C%22i%22%3Anull%7D%2C%22b%22%3A%7B%22bn%22%3A%221%20\\_%20Spits%3B%20Frey](https://app.searoutes.com/routing/search/core?routing=%7B%22p%22%3A%5B%5D%2C%22r%22%3A%5B%5D%2C%22fri%22%3A0%7D&settings=%7B%22t%22%3A%7B%22asz%22%3Afalse%2C%22c2t%22%3A%22container%22%2C%22ba%22%3A%5B%5D%2C%22t%22%3A%22core%22%2C%22or%22%3A%5B%7B%22q%22%3A%221%22%2C%22stc%22%3A%2220GP%22%7D%5D%2C%22cr%22%3A%7B%22apoc%22%3Afalse%2C%22aprc%22%3Afalse%2C%22aci%22%3A%5B21%2C51%2C68%2C73%5D%2C%22nt%22%3A%22%22%7D%2C%22rm%22%3A%7B%22as%22%3Atrue%2C%22aro%22%3Afalse%2C%22ari%22%3Afalse%2C%22ara%22%3Afalse%7D%2C%22v%22%3A%7B%22d%22%3A4.5%2C%22s%22%3A10.8024%2C%22i%22%3Anull%7D%2C%22b%22%3A%7B%22bn%22%3A%221%20_%20Spits%3B%20Frey)

[cinet%22%2C%22bt%22%3A%22MOTOR\\_VESSEL%22%2C%22bd%22%3A%221.8%22%7D%2C%22tr%22%3A%7B%22trf%22%3A%22DIESEL%22%7D%7D%2C%22d%22%3A%7B%22ms%22%3A%22standard%22%2C%22sz%22%3Afalse%2C%22srb%22%3A%22best%22%7D%7D](#) [2023-06-07]

Shukir, S. (2022). Half-Cut Cell Solar Panels to Reduce the Effect of High Temperature and Shadow on the Productivity of Solar Panels.

*Solcellers miljöpåverkan* (2021).

<https://www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/lar-dig-mer-om-solceller/solcellers-miljopaverkan/> [2023-05-25]

*Solcellspaneler* (u.å.). <https://www.ibcsolar.se/forinstallatorer/solcellspaneler/> [2023-05-25]

Soto, A. (2022). *Vad är livscykelanalys?* <https://www.slu.se/institutioner/energi-teknik/forskning/lca/vadar/> [2023-05-25]

Stamford, L. & Azapagic, A. (2018). Environmental Impacts of Photovoltaics: The Effects of Technological Improvements and Transfer of Manufacturing from Europe to China. *Energy Technology*, 6 (6), 1148–1160.

<https://doi.org/10.1002/ente.201800037>

Stamford, L. & Azapagic, A. (2019). Environmental impacts of copper-indium-gallium-selenide (CIGS) photovoltaics and the elimination of cadmium through atomic layer deposition. *Science of The Total Environment*, 688, 1092–1101. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.343>

*Sveriges utsläpp och upptag av växthusgaser* (2021).

<https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/sveriges-utslapp-och-upptag-av-vaxthusgaser/> [2023-05-25]

*Systemstudie Energi 2050* (u.å.).

[https://klimatprotokollet.uppsala.se/globalassets/klimatprotokollet2/dokument/systemstudie-energi-2050\\_b.pdf](https://klimatprotokollet.uppsala.se/globalassets/klimatprotokollet2/dokument/systemstudie-energi-2050_b.pdf) [2023-06-25]

*Yingli Solar | LinkedIn* (u.å.). <https://cn.linkedin.com/company/yinglisolar> [2023-05-25]

## 6. Tack

Jag vill rikta ett stort tack till min handledare Gunnar Larsson på Intuitionen för energi- och teknik på SLU, samt min handledare Hanna Marklund på Fastighet- och serviceavdelningen på Region Uppsala för stöttning och vägledning genom arbetet.

Jag vill även tacka Jonas Eriksson och Fredrik Sadjak för intressanta diskussioner och feedback som lett mitt arbete framåt.



## Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Även om du inte publicerar fulltexten kommer den arkiveras digitalt. Om fler än en person har skrivit arbetet gäller krysset för samtliga författare. Du hittar en länk till SLU:s publiceringsavtal på den här sidan:

- <https://libanswers.slu.se/sv/faq/228316>.

JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.