



CHALMERS



Klimatpåverkan och ekonomi med solcellsanläggningar

Studie för planerade byggnader i Södra
Änggården

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet,
Samhällsbyggnadsteknik*

Samuel Andreasson
Thao Tiffany Ha

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

EXAMENSARBETE ACEX20

Klimatpåverkan och ekonomi med solcellsanläggningar

Studie för planerade byggnader i Södra Änggården

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

SAMUEL ANDREASSON

THAO TIFFANY HA

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för installationsteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2023

Klimatpåverkan och ekonomi med solcellsanläggningar –
Studie för planerade byggnader i Södra Änggården

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

SAMUEL ANDREASSON

THAO TIFFANY HA

© SAMUEL ANDREASSON/THAO TIFFANY HA, 2023

Examensarbete ACEX20-23

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola 2023

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för installationsteknik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:

Solceller och solenergi. (Lejstrand, 2023)

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Göteborg 2023

Klimatpåverkan och ekonomi med solcellsanläggningar –
Studie för planerade byggnader i Södra Änggården

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik*

SAMUEL ANDREASSON

THAO TIFFANY HA

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för installationsteknik
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Omställningen till ett hållbart samhälle anses vara mer aktuellt än någonsin. Där energibranschen utgör en betydelsefull faktor för att uppnå mål 7 inför Agenda 2030 - Hållbar energi för alla. För att kunna möta världens nuvarande och framtida utmaningar krävs kraftiga åtgärder inom energibranschen för en ökad användning av förnybar energi, till exempel solenergi.

I detta projekt utreds klimatpåverkan baserad på livscykelanalys (LCA) samt livscykelkostnadsanalys (LCC) av två olika solcellstyper för att kunna välja rätt tekniska lösningar utifrån hållbara dimensioner som omfattas av miljö, ekonomiska samt sociala faktorer. Dessutom syftar arbetet till medvetna och transparenta val av solceller för framtida studier med Södra Änggårdens projekt i samarbete med företaget GICON Installationsledning AB.

Två olika solcellssystem av mono-kisel- och tunnfilmssolceller studerades. För mono-kisel-solcellerna användes SoliTek's BLACKSTAR och för tunnfilmssolceller valdes Midsummer BOLD. Solcellssystemen installerades på tak med hänsyn till väderstreck och tillgänglighet. Med hjälp av insamlade data angående livscykeln från både SoliTek och Midsummer framgick resultatet att klimatavtrycken låg på 7,4 g CO_2e/kWh för Midsummer BOLD respektive 22,3 g CO_2e/kWh för SoliTek BLACKSTAR. Midsummer BOLD fick ett mindre utsläpp än SoliTek BLACKSTAR, men SoliTek BLACKSTAR producerade närmare dubbelt så mycket el som Midsummer BOLD, vilket bidrog till ett minskat behov av el från elnätet.

Efter slutförd analys på byggnadens klimatpåverkan med och utan solceller samt livscykelkostnad drogs slutsatsen att SoliTek sammantaget är det bästa alternativet i det studerat projektet.

Nyckelord: livscykelanalys, livscykelkostnad, solcellsanläggning, hållbar utveckling, förnybar energi, solelproduktion, solenergi, effekt.

Climate impact and economy with solar installations -
Study for planned buildings in Södra Änggården

*Degree Project in the Engineering Programme
Civil and Environmental Engineering*

SAMUEL ANDREASSON

THAO TIFFANY HA

Department of Architecture and Civil Engineering
Division of Building Services Engineering
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

The transition towards a sustainable society is considered more relevant than ever, where the energy industry represents a significant factor in achieving Sustainable Development Goal 7 - Affordable and Clean Energy for All by 2030. To meet the current and future challenges of the world, sustainable solutions such as increasing the use of renewable energy, like solar energy, are required in the energy sector.

This project investigates the climate impact based on a life cycle assessment (LCA) and life cycle cost analysis (LCC) of two different types of solar cells to choose the right technical solutions based on sustainable dimensions encompassing social, environmental, and economic factors. Furthermore, the aim of the thesis is to make conscious and transparent choices of solar cells for future work with the Södra Änggården project, in collaboration with GICON company.

Two different solar cell systems of monocrystalline and thin-film solar cells were studied. For the monocrystalline solar cells, SoliTek's BLACKSTAR was used, and for thin-film, Midsummer BOLD was selected. The solar cell systems were installed on roofs, considering the orientation and accessibility. With the help of collected life cycle data from both SoliTek and Midsummer, the results showed that the carbon footprint was 7,4 g CO_2eq /kWh for Midsummer BOLD and 22,3 g CO_2eq /kWh for SoliTek BLACKSTAR. Midsummer BOLD had a smaller carbon footprint than SoliTek BLACKSTAR, but SoliTek BLACKSTAR produced almost double the amount of electricity as Midsummer BOLD, contributing to a reduced need for electricity from the grid.

After the completed analysis of the building's climate impact with and without solar cells, as well as the life cycle cost, the conclusion was drawn that SoliTek seems to be the best alternative in the studied project.

Keywords: life cycle assessment, life cycle cost, sustainable development, solar panel systems, renewable energy, solar power production, solar energy, power.

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
Innehåll	III
Förord	VI
Beteckningar	VII
Symboler & Definition	VII
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Frågeställning	2
1.4 Avgränsningar	2
2 Litteraturstudie	4
2.1 Solcellssystem	4
2.1.1 Allmänt om solceller	4
2.1.2 Solcellstekniker och modultyper	4
2.2 Klimatpåverkan utifrån ett livscykelperspektiv	6
2.2.1 Från ”vagga” till ”grav”	7
2.2.2 Klimatdeklaration för byggnaden enligt BBR	8
2.3 Tillämpningar av solcellssystem	8
2.3.1 Val av solcellstyper	8
2.3.2 Solcellssystem, byggnaders orientering och förutsättningar	9
2.4 Lönsamhetsberäkningar med hjälp av LCC	11
2.5 EPBT	12
2.6 IDA ICE	12
3 Metod	13
3.1 Undersökningsmetod och analys	13
3.2 Solcellsanläggning på Södra Änggårdens projekt	13
3.2.1 Projektbeskrivning	13
3.2.2 Placering av solcellsanläggningar	14
3.3 Val av solcellssystem och växelriktare	14
3.4 Solelproduktion med hänsyn till beräknad energi- och elanvändningen i projektet	15
3.5 Uppskattning av klimatpåverkan på solcellsanläggningar	17
3.5.1 Midsummer BOLD	17
3.5.2 SoliTek BLACKSTAR	19
3.6 Uppskattning av klimatpåverkan från byggnader utan och med solceller	20

3.7 Lönsamhetsberäkningar	21
4 Resultat	23
4.1 Solelproduktion i Södra Änggården	23
4.1.1 Solelproduktion	23
4.1.2 Val av växelriktare baserat på solelproduktion	25
4.2 Klimatpåverkan	26
4.2.1 Solcellsanläggningar	26
4.2.1.1 Solcellsmoduler	26
4.2.1.2 Växelriktare	27
4.2.2 Byggnader utan och med solcellsanläggningar	29
4.2.2.1 Klimatpåverkan från byggnader	29
4.2.2.2 Klimatpåverkan från byggnader utan och med solcellsanläggningar	30
4.3 Lönsamhetsberäkningar	31
5 Diskussion	34
5.1 Solelproduktion	34
5.2 Klimatpåverkan	34
5.2.1 Solcellsanläggning	34
5.2.1.1 Solcellsmoduler	34
5.2.1.2 Växelriktare	35
5.2.2 Byggnader och solelproduktion	35
5.2.3 Fjärrvärme	36
5.3 LCC	36
6 Slutsats	37
Referenser	40
Bilagor	43

Förord

Examensarbetet utgör 15 högskolepoäng och är den sista kursen för vår högskoleingenjörsutbildning på Samhällsbyggnadsteknik vid Chalmers tekniska högskola.

Denna rapport har utförts med förslag från GICON och handledare från Chalmers som har bidragit med värdefull information och synpunkter från januari till juni, 2023.

Vi skulle vilja tacka vår handledare Jan-Olof Dalenbäck från Chalmers tekniska högskola för hans ovärderliga stöd och vägledning genom hela processen. Hans erfarenhet, kunskap och expertis inom ämnet har varit oerhört värdefull för oss och har hjälpt oss att utveckla och förbättra vårt arbete på ett omfattande sätt.

Vidare skulle vi också vilja tacka vår handledare Göran Andersson och hans kollegor Jonas Larsson, Kristina Nilsson och Adam Björk från GICON som har delat med sig av sina stora kunskaper och tillgång till de resurser vi har behövt för att effektivt och kvalitativt kunna genomföra vårt arbete. Tack till våra opponenter Anna Hoang och Erik Hellman för er konstruktiva feedback!

Slutligen vill vi tacka både Midsummer, SoliTek och SellPower för att ha tillhandahållit all den data vi har behövt för att smidigt kunna genomföra arbetet. Vi hoppas att detta examensarbete kommer att bidra till att öka kunskapen inom installation av solceller samt inspirera andra att fortsätta forska inom området.

Göteborg, juni 2023

Thao Tiffany Ha
Samuel Andreasson

Beteckningar

Symboler & Definition

<i>BOS</i>	Balance-of-system De komponenter och den utrustning som flyttar ström som produceras av solpaneler genom omvandlingssystemet.
<i>CdTe</i>	Cadmium Telluride, kadmium-tellurid Halvledarmaterial som används som fotoaktivt material i en viss typ av tunnfilmssolceller.
<i>CIGS/ CIS</i>	Copper Indium (Gallium) Selenide, koppar-indium-(gallium)-selenid Halvledarmaterial som används som fotoaktivt material i en viss typ av tunnfilmssolceller.
<i>CO₂e</i>	Koldioxidekvivalent Ett mått på utsläpp av växthusgaser som tar hänsyn till att olika gaser har olika förmåga att bidra till växthuseffekten och den global uppvärmning.
<i>Effekt</i>	Energi per tidsenhet (J/s eller W). T.ex. mått på hur mycket el (vilken effekt) en solcell kan generera.
<i>Effektgaranti</i>	Solpaneler ska leverera x % efter x år. Gäller endast om hårdvaran är hel.
<i>EPD</i>	Environmental Product Declaration – en standardiserad rapport som beskriver miljöpåverkan från en produkt under hela dess livscykel, från råmaterial till avfallshantering.
<i>GWP</i>	Global Warming Potential – ett mått på förmågan hos en växthusgas att bidra till växthuseffekten och den globala uppvärmningen.
<i>HIT-celler</i>	Heterojunction with Intrinsic Thin-layer. Dessa celler kombinerar monokristallint kisel med amorft kisel för att minska interna förluster i solcellen. Solcellen har därmed en högre verkningsgrad och lägre temperaturkänslighet.
<i>IEA PVPs</i>	International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme.
<i>Kommersiella byggnader</i>	Byggnader som nyttjas och drivs av verksamheter.
<i>kW</i>	Kilowatt – enheten för effekt, ange hur mycket elektrisk energi/el som en solpanel produceras per sekund.
<i>kWh</i>	Kilowattimmar (energi)
<i>kWp</i>	Kilowatt peak cumulative Total installerad effekt av flera solcellspaneler på en anläggning som beskriver den totala kapaciteten av en solenergianläggning.
<i>LCA</i>	Livscykelanalys
<i>LCC</i>	Livscykelkostnad

<i>n-typ celler</i>	Kisel dopas med atomer som har en elektron mer än kisel. Mindre känsliga för föroreningar i materialet och sparar energi när kisel renas.
<i>sc-Si</i>	med monokristallina solceller
<i>STC</i>	Standard Test Condition
<i>PERC</i>	Passivated Emitter and Rear Cell/Contact Beteckning på en teknologi för kiselsolceller.
<i>Produktgaranti</i>	Garanti på själva hårdvaran.
<i>PV</i>	Photovoltaic
<i>PVGIS</i>	Photovoltaic Geographical Information System Datasimuleringsprogram för dimensionering av solcellsanläggningar.
<i>Solinstrålning</i>	Ett mått på hur mycket energi det finns på en specifik yta under en viss tidsperiod. Normalt brukar man mäta solinstrålningen på en yta av en kvadratmeter under en dag eller under ett år.
<i>Verkningsgrad</i>	Hur stor andel av tillförd energi som blir till el. För solceller innebär detta hur stor andel av energi i solinstrålningen som omvandlas till solel (genererad solel/ tillförd solenergi).

1 Inledning

I detta kapitel presenteras en bakgrund till projektet samt introduktion till frågeställningen. Projektets syfte samt ämnesområdet klargörs. Avgränsningar som gjorts i arbetet listas i slutet.

1.1 Bakgrund

År 1987 presenterades begreppet “Hållbar utveckling” av Gro Harlem Brundtland i rapporten “Vår gemensamma framtid” på FN:s världskommission för miljö och utveckling: “Hållbar utveckling är en utveckling som tillfredsställer dagens behov utan att äventyra kommande generationers möjligheter att tillfredsställa sina behov.” (UNDP, 2017). Omställningen till ett hållbart samhälle anses vara mer aktuellt än någonsin, där energi- och byggbranschen utgör en avgörande roll för att uppnå FN:s mål 7 inför Agenda 2030 - Hållbar energi för alla (Regeringskansliet, 2020). IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change påpekar att klimatförändringarna är ett resultat av mänskliga aktiviteter som exempelvis förbränning av fossila bränslen som därav lett till katastrofala följder, såsom global avsmältning av glaciärer, höjda havsnivåer, extrema väder och översvämningar. Vidare drabbar dessa följder de mest sårbara människorna runtom världen och leder till en minskad klimaträttvisa (Världsnaturfonden WWF, 2022).

Europeiska unionen (EU) har också ställt upp klimatmål för att bli klimatneutralt senast 2050 och fram till 2030 ska EU:s nettoutsläpp vara minst 55% lägre än 1990 (Europeiska unionens råd, 2022). EU har även som mål att förbättra energieffektiviteten med minst 32,5% till 2030, vilket är en ökning från det tidigare EU-målet på 20% till 2020. EU anser att detta mål är en nyckelkomponent i deras ansträngningar för att minska växthusgasutsläppen samt bekämpa klimatförändringarna, samtidigt förbättra energisäkerheten och konkurrenskraften (European Commission, 2021).

Sverige är ledande när det gäller användning av förnybar och fossilfri energi, där runt 98 % av landets elproduktion kommer från vattenkraft (41%), kärnkraft (29%), vindkraft (19%), värmekraft (9%) och solkraft (1%) (Energimyndigheten, 2022). Utöver detta har Sverige också varit en aktiv förespråkare för globala åtgärder för att bekämpa klimatförändringarna och har förbundit sig att minska sina utsläpp av växthusgaser enligt Parisavtalet. Även om landet traditionellt har haft mindre solenergiressurser på grund av sitt klimat och geografiska läge, har Sverige börjat investera mer i solenergi på senare år och teknologin har blivit mer kostnadseffektiv. Installation av solpaneler på fastigheter har flera fördelar, inklusive minskade energikostnader och effekter av klimatförändringar har även gett ökade fastighetsvärden. Dessutom ger solpaneler möjlighet att minska beroendet av externa energileverantörer, vilket ökar självförsörjningen och egenproduktionen. Utöver finns potential att sälja överskottsel tillbaka till elnätet och därmed minska kostnaderna ytterligare (WSP, 2021). I juni 2022 har EU och den svenska regeringen tagit fram ett förslag om nya krav på solceller i alla kommersiella och offentliga fastigheter från 2025 för en mer hållbar elproduktion. Detta anses vara en av lösningarna i regeringens ambition till att ta krafttag mot elkrisen, inser Annika Strandhäll (Dahlin, 2022). För att maximera fördelarna med solpaneler på fastigheter är det viktigt att installera dem på ett effektivt sätt. På större fastigheter, som exempelvis i Södra Änggården i Göteborg där ett nuvarande projekt pågår, anses installation av solcellsanläggningar vara en möjlig åtgärd för att minska klimatpåverkan och köpt energi.

Planering för Södra Änggårdens projekt är att bygga en kombination av hyresrätter, äldreboistäder samt en livsmedelsbutik och andra kommersiella lokaler. Projektets vision är ett skönare stadsliv med ett hållbart energikoncept som ansvaras av GICON Installationsledning AB. Målet med konceptet är att minimera behovet av värme och kyla, återanvända överskottsvärme med energi från solen samt optimera tekniska system för minimalt elbehov. Genom soletinstallation på taket för lokal energiproduktion kan soletproduktion ersätta köpt el. Vid en överproduktion av solet kan elen distribueras på elnätet och kan exempelvis användas för att ladda elfordon eller av andra byggnader i området.

Solcellers livscykel omfattar flera steg, inklusive utvinning av råmaterial, tillverkning, installation, användning och avfallshantering. Trots att den största miljöpåverkan uppstår vid tillverkningen, kan solceller bidra till flera miljöfördelar när de väl är installerade och i drift. Solenergi produceras utan att släppa ut växthusgaser och är en förnybar och fossilfri energikälla. Detta i sin tur gör att om fler installerar solceller kan efterfrågan på fossila bränslen minskas. Enligt Energimyndighetens senaste statistik som nämnts tidigare kommer nästan all svensk energi från fossilfria energikällor. Av denna anledning har diskussioner kring energikällor väckts bland forskare och privata aktörer om det verkligen är klimatneutralt att installera solceller i Sverige. Därav skrivs detta examensarbete för att undersöka och jämföra klimatpåverkan samt möjligheter av att installera solcellsanläggningar på kommersiella byggnader.

1.2 Syfte

Syftet med denna uppsats är att utvärdera och jämföra kommersiella byggnader med och utan solcellsanläggningar i Södra Änggården, med hänsyn till klimatpåverkan och kostnad under solcellers livscykel. I arbetet kommer två solcellstekniker, monokristallina- och tunnfilmssolceller, att studeras vid tillämpningar på kommersiella byggnader.

1.3 Frågeställning

För att uppnå syftet med examensarbetet skall följande frågor besvaras:

- Hur mycket av elbehov täcker soletproduktion av monokristallina- och tunnfilmssolceller?
- Vad har dessa två solcellsalternativen för klimatpåverkan med hänsyn till livscykelanalys?
- Hur ser resultat ut vid jämförelse av klimatpåverkan från byggnader med och utan solceller? Är det klimatsmart att installera solceller med avseende på nordiska elmix i dagsläget?
- Finns det lönsamhetspotential när byggnader installerar och tar vara på egenproducerad energi via solceller? Vilken solcellsteknik är kostnadseffektiv och ge en kortare återbetalningstid?

1.4 Avgränsningar

Rapporten är begränsad till att studera endast kommersiella byggnader som befinner sig i Göteborg med energideklarationer från GICONs databas. Programvara IDA ICE används för att uppskatta den potentiella mängden solinstrålning för respektive byggnad och identifiera el- och energibehovet under tillgängliga soltimmar för respektive månad. Arbetet förhåller sig till avsedda data på grund av samarbete med GICON och deras pågående projekt i Södra Änggården. Hänsyn till byggnaders livslängd tas inte med då solceller måste bytas ut varje 25:e år och solcellsteknologi har en stor utvecklingspotential under dessa år. Utöver det kan stora

felmarginaler uppstå över byggnadens livslängd på grund av ändring av elpriser, elmix samt dess klimatpåverkan.

Arbetet begränsas genom att undersöka två specifika solcellsmoduler av olika solcellstekniker. Förbrukningen av hushållsel uppskattas generellt enligt GICON eftersom hyresgästerna har individuella elavtal och ingen dokumentation på dessa förbrukning finns tillgänglig. Studiens ekonomiska lönsamhetsanalys är baserad på en anpassad kalkylmall LCC för solcellsinvesteringar med nuvärdesmetod från Energimyndigheten. Livscykelkostnad kommer inte att inkludera solelslagring eftersom området fortfarande är under planeringsfas, och bakomliggande data för att fastställa lönsamheten av solelslagring saknas. I lönsamhetsberäkningen kommer ROT-avdrag och investeringsstöd inte att tas i beaktande eftersom dessa stöd endast gäller för privatpersoner.

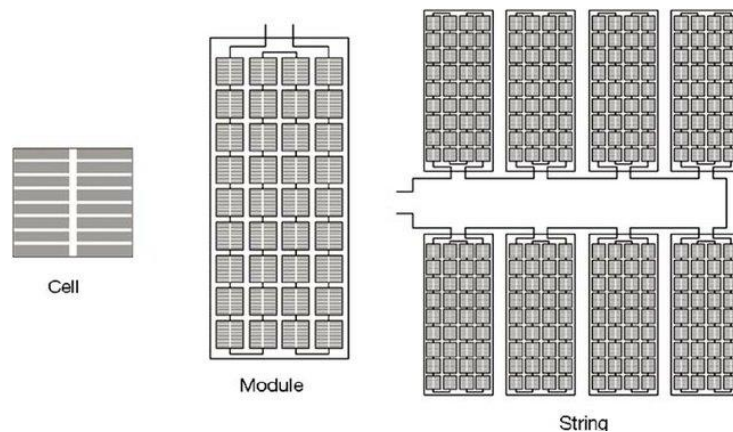
2 Litteraturstudie

Kapitel 2 inleds med en genomgång av de teoretiska parametrarna inom solcellssystem samt livscykelanalysmetodik. Därefter presenteras tillämpningar av solcellssystem, livscykelkostnad och energiåterbetalningstid.

2.1 Solcellssystem

2.1.1 Allmänt om solceller

Energin i solstrålning kan direkt omvandlas till elektrisk energi med hjälp av solcellsmoduler. Fotovoltaiska celler är komponenter som genererar elektricitet och kan skilja sig åt vad gäller halvledarmaterial, storlek och form. För att kunna uppnå effekten av en solcell som genererar ström och spänning vid exponering för ljus krävs halvledarmaterial, oftast kisel, som ger elektroner ett högre energitillstånd vid kontakt med ljus. Detta bidrar till att elektronerna kan vidarebefordras till en extern krets där deras energi används och sedan återvänder till solcellen. Genom seriekoppling av flera solceller kan en elektrisk ström genereras och spänningen ökas. Å andra sidan, om solcellerna istället parallellkopplas, ökar strömstyrkan. Följande figur illustrerar hur en solcell kan ihopkopplas till en modul och vidare till en seriekoppling:



Figur (2.1). PV cell, modul och sträng av seriekopplade cellerna (Čorba m.fl., 2012)

2.1.2 Solcellstekniker och modultyper

Dagens solcellstekniker erbjuder olika variationer som byggs på en och samma grundprincip. Målet med kontinuerlig utveckling av PV-teknologi är att höja prestandan hos cellerna, sänka marknadspriset på modulerna och optimera hastigheten samt kostnaden för tillverkningsprocesser. Solceller kan skapas med ett enda eller flera lager av ljusabsorberande material och de klassificeras generellt enligt tre generationer av solcellsteknologi. Den första generationen inkluderar traditionella solceller med kristallina kiselsolceller (c-Si), som monokristallina (sc-Si) och polykristallina (mc-Si) celler (Kovacs & Petterson, 2019). Den andra generationen är baserad på tunnfilmssolceller, vilka brukar benämnas utifrån vilka ämnen som ingår, som CdTe (kadmium, tellurid), CIGS eller CIS (koppars, indium, gallium, selen), och amorft kisel (a-Si). Den tredje generationen omfattar innovativa icke-kiselbaserade teknologier och nya koncept som inte har fått något kommersiellt genomslag än, såsom organiska/semiorganiska PV-paneler (OPV), perovskiter (PSC), och grätzelsolceller. Samtliga nämnda tekniker har därav potential att producera billigare än första och andra generationens celler.

I dagens marknad finns olika modultyper som uppfyller olika behov för konsumenter. Dagens standardmodul är en glas-polymermodul där solcellerna är laminerade mellan en glasskiva och en polymerfolie, eftersom polymerfolie är lättare och billigare än glas och håller sig ifrån fukt och smuts. Vidare finns glas-glas moduler som har dubbla glasskikt, vilket bidrar till en ökad mekanisk stabilitet och längre livslängd då solcellsmaterialet skyddas bättre mot fukt och brandrisker. Utöver det kan solcellsmoduler vara utformade så att solet kan genereras från både fram- och baksida av solcellsmodulen. Dessa kallas för “dubbelsidiga moduler”, eller bifacialmoduler som fångar upp ljus från båda sidor. Vid installation av bifacialmoduler bör hänsyn vidtas till baksidan som ska belysas direkt av solen, eller få mycket reflekterande ljus från omgivningen, för att kunna öka modulens totala verkningsgrad upp till 20% (Kovacs & Petterson, 2019). Multi-diod moduler och halvcellsmoduler tillämpas också för att förbättra prestandan i partiellt skuggade moduler, respektive i mindre storlek (av halva standardstorleken) för att minska känslighet för hotspots samt de interna förlusterna i solcellsmodulen. Utöver detta finns det moduler för byggnadsintegrering som har fått mer uppmärksamhet de senaste åren, då vanliga solcellsmodulers utseende inte alltid passar byggnadens arkitektur eller konsumentens behov. Ett problem med integrerade solceller är att de inte är lika välventilerade när de byggs in i takkonstruktion. Risken till minskad energiproduktion är en negativ följd som bör tas i beaktande.

I följande tabell summeras typiska verkningsgrader för de vanligaste modultyperna och solcellsteknikerna. De högre verkningsgradsvärdena som 22% för monokristallint kisel återspeglar de mest effektiva solcellsmodulerna som är tillgängliga inom respektive teknik. Dessa moduler som befinner sig i teknikens framkant har också det högsta priset, räknat i kronor per watt i jämförelse med mindre effektiva moduler (Kovacs & Petterson, 2019).

Tabell (2.1). Kommersiella solcellstekniker och nyckeltal (Kovacs & Petterson, 2019)

Celltyp	Verkningsgrader för kommersiella solcellsmoduler [%]
Monokristallint kisel (sc-Si)	18–22
Polykristallint kisel (mc-Si)	16–20
Kadminumtellurid (CdTe)	14–18
CIS/ CIGS	14–16
Amorft/ mikrokisel	8–12

Tabell (2.2). Pris per kilowatt toppeffekt av olika typer av kiselmoduler (pvXchange, 2023)

Modultyp	Verkningsgrad [%]	Prisindex [%] (standardmodul = 100%)
Standard kiselmodul (sc-Si/ mc-Si)	16–18	100
Lågpris (andra sortering, konkursbon, låg effekt)	-	76

Helsvarta moduler (sc-Si, ibland mc-Si)	12–20	140
Högeffektiva moduler (PERC, HIT, n-typ)	>18	128
Bifacialmoduler	-	152

Enligt forskning och marknadsanalyser är kristallina kiselceller den dominerande teknologin på världsmarknaden för solcellsmoduler, med en marknadsandel på cirka 96% (Masson & Kaizuka, 2020). Monokristallina kiselceller är vanligare än multikristallina och tunnfilmssolceller som står för endast 4% av den totala marknadsandelen för solcellsmoduler. Trots att tunnfilmens andel av modulproduktionen har varit låg i flera år har olika svenska solcellsföretag utvecklat nya metoder för att få fram en mer effektiv tunnfilmssolcell med mindre klimatpåverkan under tillverkningsfasen, såsom Midsummer, Soltech Energi och MeraSol (Askemar & Van Noord, 2021).

Den senaste forskningen inom materialåtervinning på Chalmers har visat att återvinning av metaller såsom silver och indium kan ske med en kostnadseffektiv och miljömässig process (Teknetzi m.fl., 2023). Dessa metaller är begränsade och förväntas bli ännu mer begränsade över tid. I dagsläget kan material av en kiselmodul upptill 95% återvinnas. Förluster som damm och vattenblandningar från processen som återstår utgör därmed de 5 resterande procenten av materialåtervinningen (Rollet, 2020).

2.2 Klimatpåverkan utifrån ett livscykelperspektiv

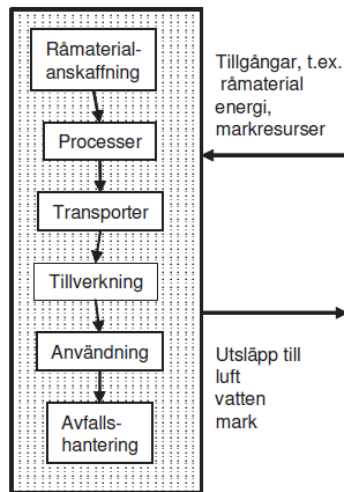
I det här avsnittet benämns en överblick på livscykelanalys - en mångsidig metod för att analysera produkters och tjänsters miljöpåverkan, främst för solceller och byggnader som ligger i fokus i rapporten. Beräkningar och analyser utgår ifrån den standardiserade modellen och proceduren från ISO 14040 som definierar LCA enligt följande:

”LCA är en teknik för bedömning av miljöaspekter och potentiella miljöeffekter förknippade med en produkt genom:

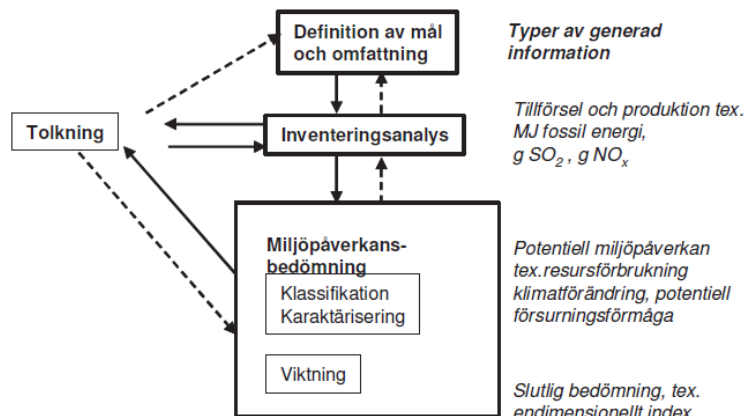
- Sammanställning av en inventering av relevanta inflöden och utflöden hos ett produktsystem,
- Utvärdering av de potentiella miljöeffekterna förknippade med dessa inflöden och utflöden,
- Tolkning av resultaten från inventerings- och miljöpåverkansfaserna i förhållande till studiens målsättning.” (Baumann & Tillman, u.å.).

Vid utförande av en LCA-studie av en produkt är första steget att definiera produkt och syfte med analysen, vilket utgör ”Mål och omfattning” av studien. ”Inventeringsanalys” är en process där en livscykelmodell skapas och utsläpp samt använda resurser beräknas över hela produktens livscykel. Under ”Miljöpåverkansbedömning” utvärderas klimatavtryck genom att relatera utsläpp och resurser till olika miljömässiga problem med hjälp av ”Klassificering” och ”Karaktärisering”. Genom ”Viktning” i slutet kan den relevanta klimatpåverkan sättas på samma skala.

Livscykelmodellen



LCA-proceduren



Figur (2.2). Livscykelmodellen och LCA-proceduren (Baumann & Tillman, u.å)

I modellen illustrerar boxar fysikaliska processer och pilar indikerar energiflöden och materialflöden medan boxarna i proceduren däremot presenterar olika steg i *proceduren* och pilarna anger stegens ordningsföljd. Streckade pilar betonar möjliga upprepningar (Baumann & Tillman, u.å.).

I denna uppsats kommer ”koldioxidekvivalenter” används som ett mått på klimatpåverkan av byggnader och solceller. Koldioxidekvivalenter, CO_2e , innebär de samlade utsläppen av växthusgaserna koldioxid, metan, dikväveoxid och fluorerade gaser. Dessa värden multipliceras sedan med global uppvärmningspotential (global warming potential, GWP) utifrån ett hundraårsvärde för att räkna om till koldioxidekvivalenter (Boverket, 2023).

2.2.1 Från ”vagga” till ”grav”

Inom denna studie har fokus lagt på solcellernas klimatpåverkan med hänsyn till ett flertal miljöpåverkanskategorierna. Tabellen nedan ger en mer detaljerad förklaring till de olika stegen av en byggnad eller byggprodukts livscykel.

Tabell (2.3). Byggnader och byggprodukters livscykel enligt SS-EN 15978:2011 (Askemar & Van Noord, 2021)

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	

Solcellssystem utnyttjar den energi som solen producerar och omvandlar den till användbar energi i form av elektricitet, vilket är ett hållbarare alternativ än att använda sig av fossil energi. Olikt fossil energi som släpper ut växthusgaser och andra skadliga ämnen för klimatet så producerar solcellssystem varken luftföroreningar eller klimatpåverkande utsläpp under driften (EIA, 2022). I många länder kan det här ha en stor klimatpåverkan, men i Sverige där den nordiska elmixen enbart släpper ut runt 90 g CO_2e /kWh är frågan ifall tillverkningen och tillämpningen av solcellssystem verkligen har någon märkbar fördel när det kommer till klimatperspektivet, eller ifall det enbart är en ekonomisk fördel (Sandgren & Nilsson, 2021).

En livscykelanalys fokuserar på de olika stegen som solceller går igenom från vagga till grav och mäter den klimatpåverkan de olika stegen ger (Salvi m.fl., 2023). Genom att jämföra klimatpåverkan från livscykelanalys med den positiva effekten som solcellssystemet bidrar med så fås det en mer översiktlig bild över den egentliga klimatpåverkan solcellssystemet har.

2.2.2 Klimatdeklaration för byggnaden enligt BBR

Information om genomförandet av en byggnads klimatdeklaration tas upp i Boverkets digitala handbok "Klimatdeklaration" där data från när, hur och varför en klimatdeklaration ska presenteras. Klimatdeklarationer ska genomföras för alla byggen som eftersöker bygglov och innefattar en sammanfattning över byggnadens klimatpåverkan i form av växthusgaser under de tre olika skedena: Byggskede, användningsskede och slutskede.

En effektiv strategi för att uppnå en realistisk slutsats i klimatdeklarationen är att färdigställa den så nära inpå produktionen som möjligt. Detta förutsätter dock att klimatkalkylen är inkluderad i projektet redan från dess tidiga skeden. Klimatkalkylen bör genomföras så tidigt som möjlighet under planerings- och projekteringsfaserna för att minimera byggnadens klimatpåverkan (Boverket, 2022). Dessutom underlättar en tidig kalkyl att få fram nödvändiga data senare i projektet.

Inom ramen för klimatdeklaration utgör LCA en betydande del av beräkningen av en byggnads klimatpåverkan. För att tydligt illustrera de olika faserna i byggnadens livscykel – från byggnation, användning till slutskede – delas de upp i olika skeden och moduler enligt den europeiska standarden EN 15978 som nämnts i tabellen ovan. För varje skede finns det informationsmodeller som tillämpas för att beräkna klimatpåverkan. Enligt Boverket omfattar skedena för en byggnad konstruktion, tillverkning och transport av material, montage och byggförfarande, drift och underhåll, slutligen demontering, bortskaffande och återvinning av material. En helhetsbedömning av byggnadens miljöpåverkan kan därmed framföras och åtgärder kan då vidtas för eventuella förbättringar (Boverket, 2019).

2.3 Tillämpningar av solcellssystem

2.3.1 Val av solcellstyper

Solcellsmoduler är användbara för en mängd olika tillämpningar, särskilt på byggnader. Den vanligaste användningen på byggnader är utanpå befintliga tak, men det är också möjligt att integrera modulerna i takkonstruktionen. Dessutom kan de monteras på befintliga fasader eller integreras i fasadsystem. Denna uppsats kommer endast behandla placering av solcellsmodulerna på tak med avseende på Södra Änggårdens projekt. Vid val av solcellstyper som utanpåliggande- och takintegrerade solpaneler kan olika aspekter tas i anspråk. Installation av solceller utanpå takkonstruktion är vanligt förekommande i nybyggda hus med hjälp av en monteringsram som bidrar med en optimal lutning. Vid installation av takintegrerade

solpaneler bör moduler med lägre temperaturkänslighet, eller moduler med lägre klimatpåverkan, som tunnfilmsmoduler beaktas (Kovacs & Petterson, 2019).

Enligt en förstudie för ökad användning av byggnadsintegrerade solceller av Lunds universitet och Energimyndigheten kan byggnads- och takintegrerade solceller bidra till att koldioxidutsläppen från byggnader minskas (Bernardo m.fl., 2022). Detta görs genom att passiva byggmaterial ersätts med aktiva byggnadsmaterial såsom solceller som genererar energi från en förnybar källa. Trots fördelarna med takintegrerade solceller finns en utbredd frägesättning bland fastighetsägare på grund av begränsad erfarenhet och oro för potentiella risker, såsom fuktskador, brandrisker och strukturella problem. Därav väljer många fastighetsägare att installera solceller ovanpå befintliga tak för att undvika de risker som är förknippade med byggnadsintegrerade solceller. Dessutom är det enklare och billigare att välja utanpåliggande solpaneler för att öka tryggheten och kostnadseffektiviteten som det innebär.

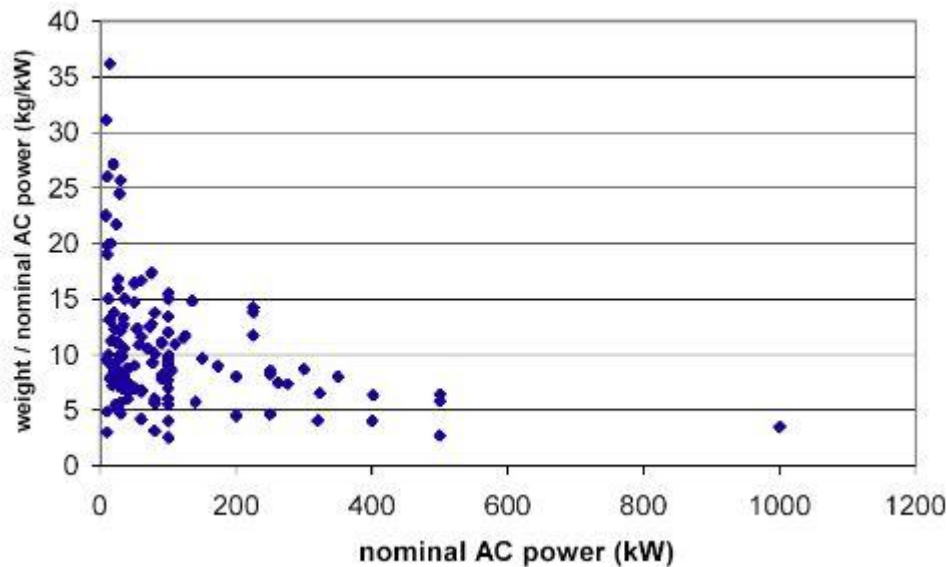
2.3.2 Solcellssystem, byggnaders orientering och förutsättningar

Solcellssystem

Ett solcellssystem består i huvudsak av följande delar: solpaneler, monteringsystem, likströmskablage, växelriktare och undercentral (Malmsten, 2015). Dessa komponenter behövs för att anläggningen ska fungera och ansluta till byggnadens elsystem. Monteringsutrustning används för att fästa solpaneler på tak, vilka i sin tur genererar likström. Därefter transporterar kablagerlikström till växelriktare för att göra om till växelström. Undercentral hjälper till att ansluta solcellssystemet till husets elsystem som då innehåller lastbrytare, säkringar och elmätare.

Monteringsystem används när solceller monteras ihop (Malmsten, 2015). Gällande lutande tak består systemet av två delar: ett ramverk av aluminiumskenor som modulerna vilar mot och som de fästs i med hjälp av speciella klamrar och krokar/klämmor som förankrar systemet i taket. Å andra sidan används oftast ballastsystem för platta tak då inga infästningar i taket behövs.

Elsystem behövs vid solcellsanläggning för omvandling av likström från solceller till växelström för att matas in i fastighetens elnät (Wallnér, 2019). Detta sker genom växelriktare som ansluts till fastighetens elsystem via säkringar och en brytare som kan frångå solcellsanläggningen. Växelriktaren är en nyckelkomponent för att bestämma hur stor solcellsanläggningsstorlek som kan installeras. Ett solcellssystem behöver oftast växelriktare med en effekt omkring ca 95% av solcellssystemets topp effekt och den ska placeras så nära solcellerna som möjligt för att minska dragning av likströmskablar. Utöver detta kan beställare bestämma om över- eller underdimensionering av växelriktarens effekt. Vid val av växelriktarens storlek är det vanligt att underdimensionera växelriktaren i förhållande till solcellsanläggningen på mellan 10–30%, om samtliga paneler är riktade åt syd. Mindre växelriktare kan väljas om panelerna vetter sig mot flera olika väderstreck. Anledningen till underdimensionering av växelriktaren är att solcellerna av olika skäl väldigt sällan genererar enligt sin maximala effekt samtidigt som priset för växelriktaren beror av storleken. Däremot bör det tas hänsyn till att en växelriktare med lägre likström kommer kräva mer material per kilowatt, vilket betyder att det även finns fördelar med att inte ta en allt för liten växelriktare utifrån ett ekologiskt perspektiv (de Wild-Scholten m.fl., 2006). Se figur (2.3). Livslängden för en växelriktare varierar mellan 10–20 år där en produktgaranti på mellan 5–12 år inkluderas.



Figur (2.3). Sambandet mellan växelriktarens vikt och nominell effekt på växelström (<1200 kW) (de Wild-Scholten m.fl., 2006)

Snölast är en annan aspekt som ska tas hänsyn till vid installation av solcellsanläggning. Dimensionerande snölast brukar ligga mellan 150–350 $\frac{kg}{m^2}$ (Malmsten, 2015). Vid stora snölaster behöver snö skottas på platta eller låglutande tak, vilket gör att ytor för skottning krävs för att kunna skotta mellan eller på solceller.

Byggnadens orientering

För att sänka kostnaden för solcellssystemet är det rekommenderat att välja en enkel systemutformning, som att montera solcellerna i enlighet med takets lutning. På platta tak är det vanligt att luta solcellerna uppåt med 10–20 grader längs den sida av byggnaden som är mest vänd mot söder för att optimera solcellernas produktion (Malmsten, 2015). Stora solcellssystem kan byggas kostnadseffektivt på platta tak, dock får det plats färre solpaneler per ytenhet jämfört med ett lutande tak, då panelerna placeras upplutande för att undvika skuggning av varandra. På lutande tak installeras panelerna längs med taket där dess ytbehov ligger på 6–7 kvadratmeter per installerad kilowatt i topp effekt (kW_t). Med upplutade panelerna på platta tak som lutar mot söder är ytbehovet 10–12 kvadratmeter per kW_t , medan mot öst och väst är ytbehovet 6–7 kvadratmeter per installerad kW_t .

Livslängden för en solcellsanläggning är i regel ungefär 25 år med hänsyn till taket i gott skick före solcellsinstallationen (Solcellskollen, 2022). Takets utformning och arkitektur spelar en avgörande roll i hur solpaneler placeras och anläggningens potentiella storlek. Vidare anses taklutning på mellan 35–45 grader vara den optimala taklutningen baserat på de svenska solförhållanden. Beroende på det geografiska läget, kan de exakta siffrorna för optimal lutning variera. I Sverige är variationerna dock relativt små och motsvarande tabell över optimal lutning är liknande i hela södra Sverige. I norra Sverige är den optimala lutningen något högre, cirka 45 grader istället för 40 grader i södra Sverige. Utöver detta bör det även tas hänsyn till väderstreck taket vetter mot, lutning de har och att ytorna inte skuggas av byggnadsdelar som takkupor eller omgivande byggnader.

En LCC-kalkyl baseras oftast på nuvärdesmetoden, som vidare används för att räkna om förväntade framtida utgifter och eventuella intäkter till ett värde idag, så kallade nuvärdet (CIT Industriell Energi AB m.fl., 2017). En kalkylränta tillämpas vid beräkningen med hänsyn till framtida inflation. Framtida kostnader räknas om till nuvärde för att möjliggöra en rättvis jämförelse av produkter och tjänster över tid eftersom totalkostnaden jämförs över nyttjandetiden. Dessa beräkningar används sedan för att välja mellan olika investeringsalternativ. Energikostnaden för ett projekt eller en produkt blir oftast högre än den ursprungliga investeringskostnaden, och därför är det utav mycket nytta att jämföra och konkurrera olika alternativ och lösningsförslag för att hitta det ytterst bästa alternativet.

2.5 EPBT

EPBT - Energiåterbetalningstid är ett mått på hur lång tid i år det skulle ta för ett förnybarenergisystem att generera lika mycket el som gick åt för produktionen och installationen av systemet (IEA, 2020). EPBT kan beräknas med formeln,

$EPBT = (E_{mat} + E_{manuf} + E_{trans} + E_{inst} + E_{EOL}) / ((E_{agen} / \eta_G) - E_{aoper})$, där:

E_{mat} = Det primära energibehovet för att producera materialet till PV-systemet

E_{manuf} = Det primära energibehovet för att tillverka PV-systemet

E_{trans} = Det primära energibehovet för att transportera material under livscykeln

E_{inst} = Det primära energibehovet för att installera PV-systemet

E_{EOL} = Det primära energibehovet för end-of-life förvaltning

E_{agen} = Årlig producerad energi

η_G = Elnätets effektivitet

E_{aoper} = Det årliga energibehovet för drift och underhåll i primär energi

Ett solcellssystemets energiåterbetalningstid styrs till stor del av tre olika faktorer: solinstrålning, teknologi och typ av system (EPIA & Greenpeace, 2011). Solinstrålningen varierar kraftigt beroende på dess geografiska lokalitet. Som tidigare nämnts i kapitel 2.4.2 anses även väderriktning och taklutning två viktiga variabler i solcellssystemets effekt. Med samtliga faktorer medräknade förväntas en solcells återbetalningstid ligga mellan 1–3 år. Elmixen har också en betydande roll i vad återbetalningstid fastställs på då det varierar rätt kraftigt från land till land.

2.6 IDA ICE

IDA ICE (Indoor Climate and Energy) är ett byggnadssimuleringsverktyg som med olika simuleringar (energibehov, värmebehov och kylbehov) används för att analysera energianvändningen och den termiska komforten i hela byggnader. Programvaran kan användas för att beräkna inomhuskomforts parametrar som temperatur, luftfuktighet, luftkvalitet och belysningsnivåer, men även energiförbrukning och koldioxidutsläpp. Utöver kan IDA ICE tillämpas för att optimera energieffektiviteten för en byggnad genom att testa olika energibesparande strategier och system designer, samt utvärdera byggnaders prestanda under olika klimatförhållanden, vilket kan vara användbart för att utveckla lämpliga lösningar för specifika regioner eller platser, som i detta fall, Göteborg. I denna uppsats har IDA ICE tagit fram energi- och elbehov samt solinstrålning för byggnader i Södra Änggården. Valideringstester har genomförts för IDA ICE såsom ASHRAE 140–2004, CEN Standard EN 15255 och 15265–2007 samt International Energy Agency SHC Task 34 för att säkerställa kvalitet av simuleringsverktyget (EQUA, u.å.).

3 Metod

Kapitel 3 beskriver utformningen av undersökningsmetod, solcellsanläggning, val av solcellssystem och växelriktare, solelproduktion med hänsyn till beräknad energi- och elbehov, klimatpåverkan från byggnader med och utan solceller och slutligen lönsamhetsberäkningar.

3.1 Undersökningsmetod och analys

Denna studie har använt sig av en kvantitativ forskningsmetod för insamling och analys av data kring installation av solcellsmoduler på byggnader samt dess klimatpåverkan. Figurer och tabeller används för att visa specifika data för varje mål och gren av studien.

Vid dimensionering av solcellsanläggningar på byggnader i Södra Änggården används GICONs insamlade data från byggnader med hänsyn till beräkningsförutsättningar, tillgänglig takyta för solceller samt olika väderstreck. Eftersom projektet fortfarande är under planeringsfas vid skrivning av uppsatsen har klimatdeklaration inte tagits fram än. Av denna orsak har GICON framtagit ett liknande projekt i Uppsala där dess klimatdeklaration med referensvärden kan tillämpas till Södra Änggårdens projekt. Vidare används beräkningsprogram som IDA ICE och PVGIS för att uppskatta solelproduktionen för solcellssystem i Göteborg.

3.2 Solcellsanläggning på Södra Änggårdens projekt

3.2.1 Projektbeskrivning

Södra Änggården projekts vision är att förbättra stadslivet och där cirka 1 900 lägenheter från olika byggherrar kommer att planeras, se figur (3.1). Fastighetsutvecklare kommer att bygga en kombination av hyresgäster, äldreboende, livsmedelsbutiker och andra kommersiella utrymmen i den södra entrén till det nya området, se figur (3.2). Projektet består av tre separata byggnader för boende med en gemensam bottenvåning som ger plats för diverse verksamheter. Fastighetsutvecklare står för värmen i fastigheten och fastighetsel. Kunderna betalar för sin egen elanvändning.

Medan hus 1 och hus 3 (den högra delen) har nio våningar över mark, har hus 2 respektive hus 3 (den låga delen) sex våningar. Enligt figurer och skisser lutar tre byggnader mot olika väderstreck, vilket utgör en grund för att designa solcellsinstallationer.



Figur (3.1). Södra Änggården, en ny stadsdel intill Änggårdsbergen (Bonava, u.å.)



Figur (3.2). Södra Änggårdens projekt i södra entré (IDA ICE, 2022)

3.2.2 Placering av solcellsanläggningar

På grund av mängden takkupor och takfönster på den sydostliga sidan av hus 1 så har installation av solceller enbart valts, i detta fallstudie, att appliceras på tak 2 och tak 3 åt sydost respektive söder (se grönmålade tak på figur (3.2)). För att maximera antalet installerade solceller har ett ingenjörsmässigt antagande gjorts. Ytan av solcellerna antas vara 80% av den tillgängliga takytan, med hänsyn till förluster på grund av begränsningen av solcellernas standardmått och vid yttre delarna av taket.

3.3 Val av solcellssystem och växelriktare

I detta arbete kommer två olika typer av solceller, tunnfilm och mono-kisel, att väljas för att se skillnaden i prestanda, pris och klimatpåverkan. Mono innebär att panelerna utgörs av den vanligaste solcellstekniken: monokristallint kisel och i tunnfilmssolceller utgörs panelerna av CIGS.

Från SoliTek valdes BLACKSTAR som utanpåliggande solcellsmoduler. SoliTek som är producenter till Sellpower valdes bland annat för deras samarbete med GICON som gör det enklare att få tag på nödvändiga data. Dessutom importerar SoliTek de mesta komponenterna för sina solceller från Europa (Norge, Litauen och Tyskland), vilket gör det attraktivt för dagens hållbara solcellsmarknad.

Från Midsummer valdes BOLD paneler då dessa tunnfilmssolceller är framtagna för större takytor på kommersiella byggnader och flerbostadshus (Midsummer, u.å.). Midsummer är bland annat ett svenskt solenergiföretag som utvecklar, säljer och installerar diskreta, miljövänliga och svensktillverkade tunnfilmssolceller av CIGS-typ, vilket möjliggör en attraktiv solcellsmarknad för hållbara investeringar.

Tabell (3.1). Solcellsmoduler från SoliTek och Midsummers produktblad

Tillverkare		SoliTek	Midsummer
Model		Blackstar B.60 370W	BOLD
Mekanisk data	Antal celler	60	60
	Cell typ	bifacial	tunnsfilm CIGS (Cu (In, Ga) Se2)
	Cell storlek (mm)	166x166	156x156
	Vikt (kg)	24	5
	Mått (LxWxH) (mm)	1782x1061x35	1685x1000x2
	Front/bakglas (mm)	2, svart	ej glas
	Ram/färg	svart anodiserad aluminiumram	svart
	Area (m ²)	1.9	1.7
	Verkningsgrad	19.6%	11%
Elektrisk data (STC)	Max effekt P,max (W)	370	195
	Effekt/m ² (W/m ²)	195	116
Garanti	Produktgaranti (år)	30	10
	Effektgaranti efter 10 år	95%	90%
	Effektgaranti efter 25 år	89%	80%

STC – Standard Test Conditions är standardiserade testförhållanden som avgör den maximala effekten som solcellsmodulen kan leverera. SoliTek och Midsummer mäter ström-spänningskurvan av modulen vid STC och den högsta möjliga effekten som modulen kan leverera bestämmer vilken effektklass modulen får (märkeffekten). Vid STC har en instrålning på 1000 W/m² med vinkelrätt infall mot modulytan och en celltemperatur på 25°C samt “air mass” 1,5 som presenterar ett visst spektrum för solljuset (Kovacs & Petterson, 2019).

Vid val av växelriktare måste effekten av solcellsanläggningen tas i beaktande. Som nämnt i kapitel 2.3.2 så sades det att växelriktaren installeras så nära solpanelerna som möjligt för att minska mängden kablar som behövs, och eftersom denna solcellsanläggning består av två olika tak väljs växelriktare per tak som är dimensionerad baserat på det specifika takets topp effekt.

3.4 Solelproduktion med hänsyn till beräknad energi- och elanvändningen i projektet

Beräkningen av mängden solel som genereras genomförs i Excel där aspekter som verkningsgrad, takvinkel, STC effekt, väderstreck och solpanelernas area samt andra faktorer tas hänsyn till för att sedan simulera en månadsvis beräkning av den producerade elen från

solenergin. Solenergin jämförs sedan med den månadsvisa datan som producerades för elbehovet i IDA ICE för att bedöma hur mycket av elbehovet som kan utnyttja solelproduktionen. Tabell (3.2) nedan beskriver vad byggnadens elbehov utgörs av för olika delar som är orangemarkerade. Verksamhetsel, hyregästel ingår inte i byggnadens elbehov.

Tabell (3.2). Faktorer som avgör energibehov och elförbrukning i projektet

Variable	Media (kWh)
Utomhusbelysning	El
Pumpar	El
Fläktar (hus, VC, garage, matbutik)	El
Hushållsel	El
Övrig fastighetsel	El
Komfortkyla (VC & Fjärrkyla) Kyla för matbutik	El
Hissar och rulltrappor	El
Värmeslingor	El
Verksamhetsel/ hyregästel	El

Enligt EPD - Environmental Product Declaration beror energiproduktionen hos en solcell på sex faktorer som avgör det totala energiutbytet av solcellssystemet under dess livstid:

- Solinstrålning (S_{rad}) [kWh/Wp, år]
- Modulyta (A) [m^2] – 1 m^2
- Modul effekt (y) [Wp]
- Prestandafaktorn (PR) [Faktor]
- Degradationshastighet (deg) [Factor]
- Livslängd (RSL) [år]

Den årliga instrålningen, enligt IDA ICE, presenteras i följande tabell:

Tabell (3.3). Solinstrålningar i Södra Änggården enligt IDA ICE.

Solinstrålningar i Södra Änggården (kWh/m ²)	
Hus 3 (söder)	Hus 2 (sydost)
1043	939

Skuggning anses vara en delfaktor i solcellsanläggningens performance ratio (PR) som är prestandamått för anläggningen. Med en hög PR mellan 75–85% och uppåt och en hög solinstrålning genereras mer solel under ett år, vilket är en betydande faktor i att minska klimatpåverkan per kWh som bör tas i beaktande senare i rapporten (Askemar & Van Noord, 2021).

För Midsummer BOLD är modulens effekt 195W och degradationshastigheten 0,7% (EPD, 2021). Livslängden antas vara 25 år enligt PCR (Product Category Rules). PR för BOLD ligger på cirka 84% enligt PVSyst programvara.

SoliTek BLACKSTAR har en effekt på 370W och ett degraderingsvärde för monokiselceller på 0,38%, enligt effektgaranti. PVSyst ger BLACKSTARs ett PR-värde på cirka 85%.

Alla ovanstående faktorer tas med i beräkningarna i Excel som kan sammanfattas enligt följande:

Tabell (3.4). Faktorer i beräkningar av soletproduktion

Solcellstyper	SoliTek BLACKSTAR	Midsummer BOLD
STC-effekt (W)	370	195
A,temp för byggnader (m2)	13 900	13 900
A,solcell (m2)	1.9	1.7
A,solcell, tot (m2)	449	449
Verkningsgrad (%)	19	11
Installerad effekt (kWp)	88	51
Väderstreck	söder, sydost	söder, sydost
Takvinkel	söder 45 grad, sydost 10 grad	söder 45 grad, sydost 10 grad
Antal paneler (st)	238	264
Degradationshastighet (%)	0.38	0.7

3.5 Uppskattning av klimatpåverkan på solcellsanläggningar

Uppskattningen av klimatpåverkan från solceller utgår från värden i datablad för en modul och tidigare studier med schablonvärden samt beräkning av klimatavtryck från företaget SoliTek och Midsummer. Hänsyn till EPD och relevanta certifikat samt beräkningar tas även i beaktande.

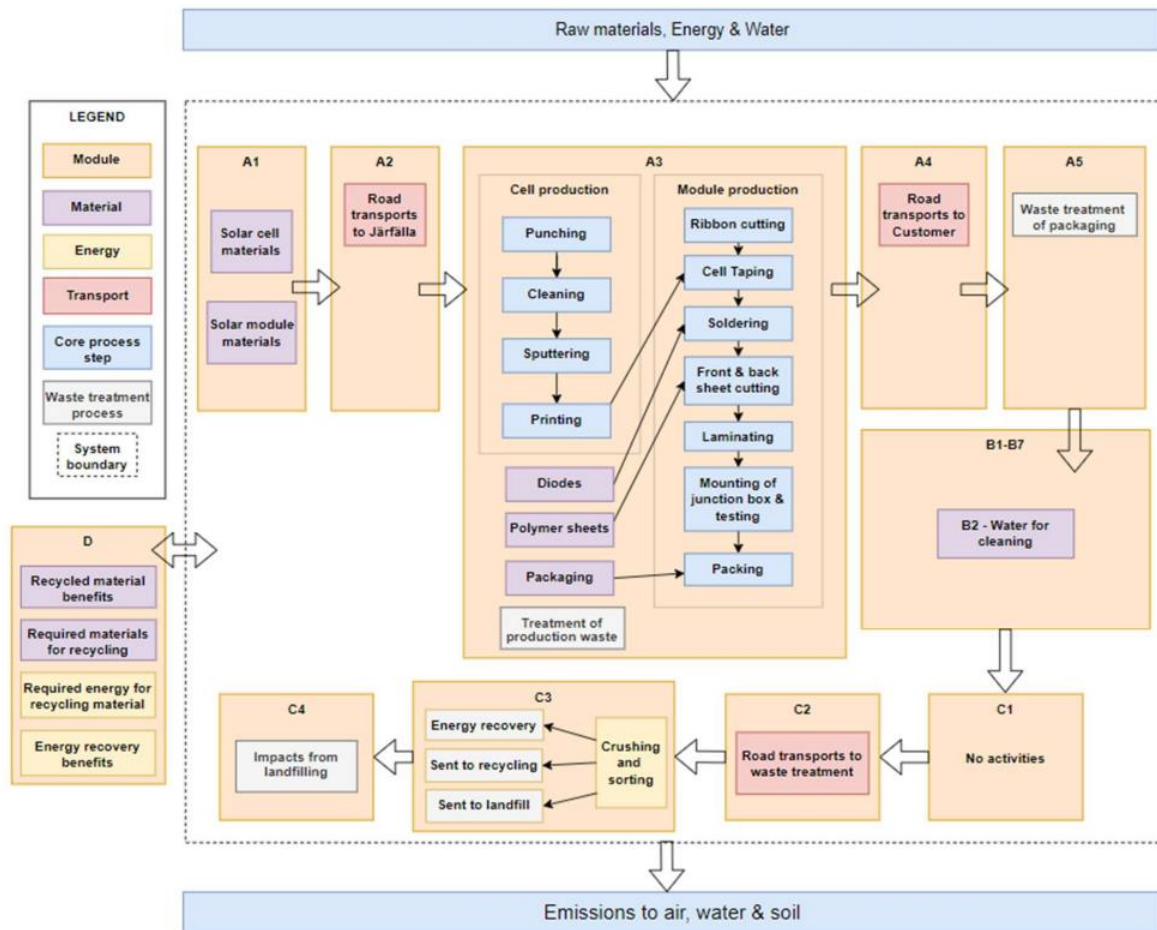
Klimatpåverkan från solceller bestäms enligt följande steg:

- Klimatpåverkan för en modul som fås fram från datablad och EPD i g CO_2e/Wp och g CO_2e/m^2 , vilket räknas om till g $CO_2e/kWh/år$
- Beräkning av den solenergi som modulen genererar under dess livslängd (25 år) och klimatpåverkan per kilowattimmar, g CO_2e/kWh
- Jämförelse med klimatpåverkan från nordisk elmix i g CO_2e /kWh

3.5.1 Midsummer BOLD

Följande figur presenterar LCA information från vagga till grav för Midsummer BOLD modul:

Figur (3.3). System diagram för LCA av BOLD modul (Hakkarainen, 2022).



Data på ovanstående livscykelanalys har tagits hänsyn till geografiskt läge samt klimatpåverkan GWP-GHG (Global Warming Potential of Greenhouse Gases) som redogörs i följande tabell:

Tabell (3.5). Klimatpåverkan av BOLD-modul (Hakkarainen, 2022)

		Produkt tillverkning A1-5						Användnings skede B1-7	Slutskede C1-4				Avfallshandling
		Produktskede A1-3			Byggproduktionskede A4-5								
Indikator	Enhet	A1	A2	A3	A1-3	A4	A5	B2	C1	C2	C3	C4	D
		Råvaruförskaffning	Transport	Tillverkning	Totalt	Transport	Installationsprocess	Underhåll	Demontering, rivning	Transport	Restproduktbehandling	Bortskaffning	Återanvändning-, Förbränning-, Återvinning möjligheter
GWP-totalt	kg CO ₂ e/Wp	0,0956	0,00707	0,0102	0,1129	0,0013	0,00856	1E-05	0	0,0017	0,0187	0,0001	-0,0289
Geografiskt läge		EU	SE	SE		SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE

Gällande transport och avfallshandling finns några allmänna antagande som bör tas i beaktande:

- Transport till produktionsanläggningen (A2) antogs vara i genomsnitt 1000 km
- Transporter antogs utföras av Euro 5-klassade fordon
- Avfall som uppstår från oväntade processer såsom mottagande av felaktigt material, olyckor, hantering osv. antogs vara 5%

- Avfallshantering antas ske enligt genomsnittliga svenska avfallshanteringsmetoder (EPD, 2021)

Utöver dessa ingår följande inte i systemgränsen som är nödvändiga för att använda elektriciteten, enligt PCR-specifikationerna: material för monteringsystemet av modulen, växelriktare, kablar, brytare, batteribank, batteriladdare, andra elektriska komponenter och system som är nödvändiga för att ansluta solcellsmodul till elnätet, personalkostnader och transport av personal samt fästelement (skruvar) och andra ytterligare material (EPD, 2022).

Mer information om ursprung av solcells-komponenter finns i följande tabell:

Tabell (3.6). *Midsummer BOLD panel* (Kassabian, 2022)

Modul	Modul referens 1m ² BOLD	Tillverkningsländer
Polymerer	1,76kg	50 % EU, 25% USA, 25% Kina
Stål	0,94kg	50% Kina, 50% Sydkorea
Lim	0,07kg	50% Kina, 50% Sydkorea
Andra metaller, element & dioder	0,13kg	44% Sverige, 20% EU, 28% Kina, 8% Taiwan
	2,90kg	

För att beräkna klimatpåverkan summeras det totala klimatavtrycket, GWP (kg CO₂e /kWp), från varje skede. Avfallshanteringsskedet tas inte med då denna information saknas för SoliTek BLACKSTAR. Se tabell (3.7):

Tabell (3.7). *Livcykelsanalys Midsummer BOLD panel enligt EPD* (Hakkarainen, 2022)

Skede för Midsummer BOLD	GWP (kg CO ₂ e /kWp)
A1-A3	112,9
A4	1,3
A5	8,56
B2	0,001
C1	0
C2	1,7
C3	18,7
C4	0,1
Totalt	143,2

Midsummer BOLDs klimatpåverkan redovisas även i dess produktblad som 17,5 kg CO₂e /m² vilket motsvarar ungefär 155 kg CO₂e /kWp. Anledningen till att datan från Midsummer BOLDs EPD används istället är dess noggrannhet samt att produktbladet är ifrån 2021 medans EPD:n är från 2022.

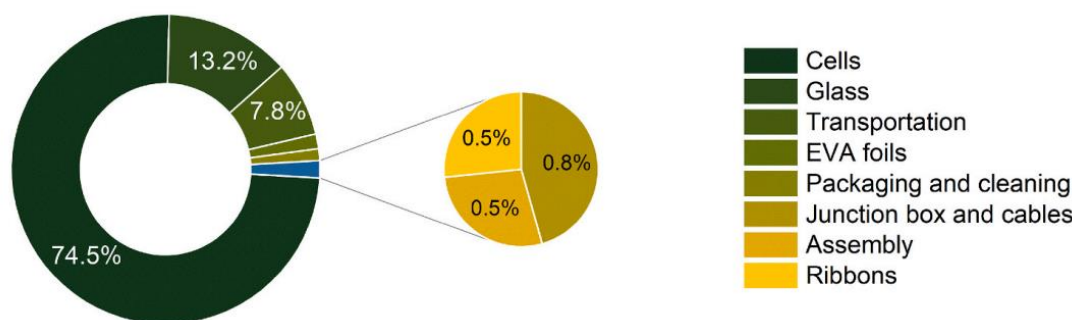
3.5.2 SoliTek BLACKSTAR

SoliTek BLACKSTAR saknar en analys över hela livscykeln så som Midsummer BOLD har. Däremot finns det data på klimatavtrycket under tillverkningen av en solcell.

Tabell (3.8). *SoliTek BLACKSTAR panel* (SoliTek, 2021)

Modul	Modul referens BLACKSTAR	GWP (kg CO_2e /kWp)	Country of manufacture
sc-Si (kg)	0,63	53,24	100% Norge (**)
Ingots (kg)	0,63	3,18	100% Norge (**)
Wafers (nr)	60	99,67	100% Norge
Celler (nr)	60	69	100% Kina
Moduler (m2)	1,89	45,45	100% Litauen
Glas fram (kg)	9,26	46,76	50% Tyskland, 50% Kina
Glas bak (kg)	9,26	59,7	50% Tyskland, 50% Kina
PEO-folie (kg)	1,19	10,89	100% Kina
PET-tejp(kg)	0,56	5,98	100% Tyskland
		393,87	(**) dessa komponenter kunde inte verifieras under fabriksinspektion

Enligt SoliTeks databas och en studie om livscykelanalys om SoliTeks solceller är solcellsmodulen den mest påverkande komponenten, där ungefär 88,7% av den totala belastningen orsakas av dess energikrävande tillverkningsprocess (Salvi m.fl., 2023). Resten av klimatpåverkan består av bland annat transport och andra faktorer som illustreras i figur (3.4):



Figur (3.4). Klimatpåverkan för den primära produktionen (first supply phase) för varje komponent. Gäller SoliTeks solceller.

Utifrån data i tabeller ovan visar det sig att en del av råmaterialet tillverkas i Järfälla, Stockholm, Sverige för Midsummer BOLD, respektive i Litauen för SoliTek BLACKSTAR. Dock så kommer annat material ifrån exempelvis Tyskland, Österrike, Italien, Schweiz och Polen, medan visst material kommer även från Kina och Sydkorea för dessa moduler.

3.6 Uppskattning av klimatpåverkan från byggnader utan och med solceller

I internationellt sammanhang är de svenska koldioxidutsläppen från elproduktionsmixen marginella, eftersom 98% av elproduktionen i Sverige är fri från fossila bränslen. Enligt Energimyndigheten ligger koldioxidhalten på 29 g CO_2e /kWh från 2022 (Energimyndigheten, u.å.). Men som en del av den nordiska elmarknaden har den totala elproduktionsmixen cirka tio gånger högre koldioxidutsläpp än den svenska. Dessutom blir det svenska elsystemet allt mer integrerat med elsystemen på den europeiska kontinenten, som har betydligt högre

koldioxidutsläpp än de nordiska länderna. Enligt Svenska Miljöinstitutet IVL 2021 ger nordisk elmix en genomsnittlig emissionsfaktor på 90 g CO_2e/kWh (2016-2018) då hänsyn har tagits till import och export av el till länder utanför den nordiska elmarknaden (Sandgren & Nilsson, 2021).

Södra Änggårdens projekt omfattar tre huvudbyggnader som är relativt lika Uppsalas projekt i storlek samt byggnadskonstruktion och material (GICON, 2022). Eftersom ingen klimatdeklaration har gjorts på Södra Änggårdens byggnader ännu, används referensdata från Uppsalas projekt för att uppskatta klimatpåverkan från byggnader utan och med solcellsanläggningar under byggnaders livslängd. Som tidigare nämnts tar arbetet endast hänsyn till solcellsanläggnings garanterad livslängd på 25 år med avseende på årlig instrålning, prestanda, degradering och solcellstyper.

Klimatpåverkan från byggnader som omfattar både byggnader, elanvändning och fjärrvärme beräknas enligt följande:

- Klimatpåverkan av konstruktionen enligt LCA från ett referensprojekt för att få fram utsläppet vid byggnation, i $kgCO_2e/m^2$
- Beräkna klimatpåverkan av alla tre byggnader baserad på byggnadsarean, i $kgCO_2e$
- Beräkna byggnadens elanvändning i $kWh/år$ och energianvändningen under dess livslängd (25 år) i kWh
- Välj nordisk elmix med 90 gCO_2e/kWh för att beräkna klimatpåverkan av energianvändningen i $kgCO_2e$
- Vad den totala klimatpåverkan blir (byggnad) plus (energi), i $kgCO_2e$

Vidare kan klimatpåverkan från byggnader utan och med solcellsanläggning räknas fram enligt nedan:

- Skillnaden kopplas till elanvändningen utan och med solcellsanläggning
- Utan solceller blir klimatpåverkan som ovan, (byggnad) plus (energi) i $kgCO_2e$
- Med solceller blir elanvändningen (kWh) reducerad med solel (kWh)
- Klimatpåverkan blir då "elansvändningen - solel" (kWh) med nordisk elmix (gCO_2e) plus solel (kWh) med en given solcell (gCO_2e/kWh), i $kgCO_2e$

3.7 Lönsamhetsberäkningar

Lönsamhetsberäkningar för solceller analyseras med hjälp av livscykelkostnad (LCC) och återbetalningstid. LCC är en metod för att bedöma de totala kostnaderna för en produkt eller investering under hela dess livslängd, medan återbetalningstid är den tid det tar för investeringen att generera tillräcklig avkastning för att täcka sina kostnader. Genom att använda dessa metoder kan en bedömning över vilka solceller som är den mest lönsamma investeringen för detta arbete genomföras baserat på både investeringskostnader och underhållskostnader för projektet.

I LCC-kalkylen som tas fram av Energimyndigheten behandlas följande indata: kalkylperiod (år), kalkylränta (%), elpris (kr/kWh), förväntad real årlig energiprisförändring (%) och utsläppsfaktor (gCO_2e/kWh). Gällande elinköp för fastigheten tas följande parametrar med: elkostnad, elcertifikatkostnad, elnätkostnad, elskatt och moms, fasta års- eller månadskostnader för elnät och elavtal. Pris på köpt el inkluderad rörlig elöverföring antas vara 1,4 kr/kWh för elområde 3, enligt Energimyndighetens rekommendation i kalkylen. Dessa påverkas inte vid införskaffning av solceller för egen förbrukning, då det sparar, förutom själva elpriset, även in på elskatt, rörlig elnätavgift, elhandelsföretagets påslag och moms.

Kalkylräntan, som motsvarar det avkastningskrav som är relevant till beräkningen, antas vara 4% och förväntas ha en real årlig energiprisförändring på 6% enligt Energimyndigheten. Solceller har i regel låg underhållskostnad, men det kan vara bra med en visuell inspektion per år samt att byta växelriktaren, vilket i detta fall, antas vara två gånger under anläggningens livslängd (25 år) för att säkerställa en fungerande solexproduktion under solcellsanläggningens livstid.

4 Resultat

I detta kapitel kommer resultat framträdas för solelproduktion i Södra Änggården tillsammans med klimatpåverkan från byggnader med och utan solcellsanläggningar.

4.1 Solelproduktion i Södra Änggården

4.1.1 Solelproduktion

Hela projektets energibehov för tre hus räknas med hjälp av IDA ICE vara upp till cirka 1 000 MWh per år, varav elbehov står för ungefär hälften, 460 MWh, mer om data finns i bilaga 1. SoliTek BLACKSTAR genererar totalt 77 MWh under det första året och 1 749 MWh under de kommande 25 åren, med hänsyn till sin degradationshastighet på 0,38%. Solelproduktion under 25 år beräknas enligt följande:

Solelproduktion (25 år)

$$\begin{aligned} &= (\text{solelproduktion första året} * 25) * ((1 - \text{degradation})^{25}) \\ &= (76948 * 25) * ((1 - 0,0038)^{25}) = 1\,749\,483 \text{ kWh} = 1\,749 \text{ MWh} \end{aligned}$$

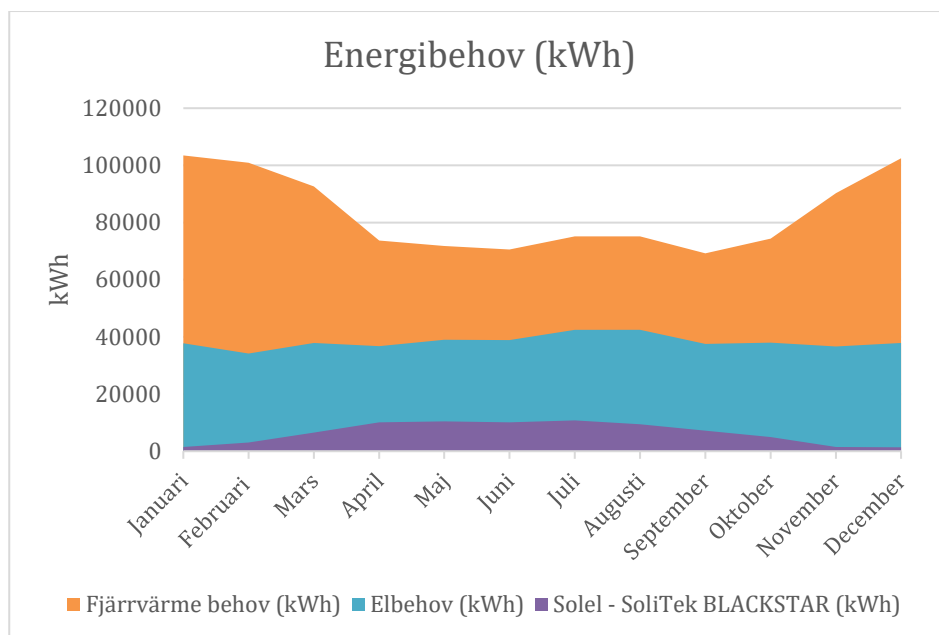
Solcellsanläggnings installerad effekt är beräknad med hjälp av STC-effekt av solcell 370W för BLACKSTAR:

$$\begin{aligned} \text{Installerad effekt} &= \text{Antal paneler (söder + sydost)} * \frac{\text{STC effekt}}{1000} \\ &= (89 + 148,9) * \frac{370}{1000} = 88 \text{ kWp} \end{aligned}$$

Tabell (4.1). SoliTek BLACKSTARs solelproduktion

Solelproduktion (1:a året)	77	MWh/år
Solelproduktion (25 år), deg=0,38%	1 749	MWh
Solcellsanläggnings installerad effekt (söder + sydost)	88	kWp
Antal solceller	238	st
Area solceller	450	m ²

Diagrammet nedan presenterar SoliTek BLACKSTAR som täcker cirka 17% av elbehovet i projektet:



Figur (4.1). Solelproduktion från SoliTek BLACKSTAR i jämförelse med fastighetens energi- och elbehov

Midsummer BOLDs förväntade årliga elproduktion är 47 MWh, vilket motsvarar 10% av elanvändningen, och fördelar sig ungefär enligt diagrammet nedan. Under de kommande 25 åren producerar BOLD 984 MWh med avseende på sin degradationshastighet på 0,7%.

Solelproduktion (25 år)

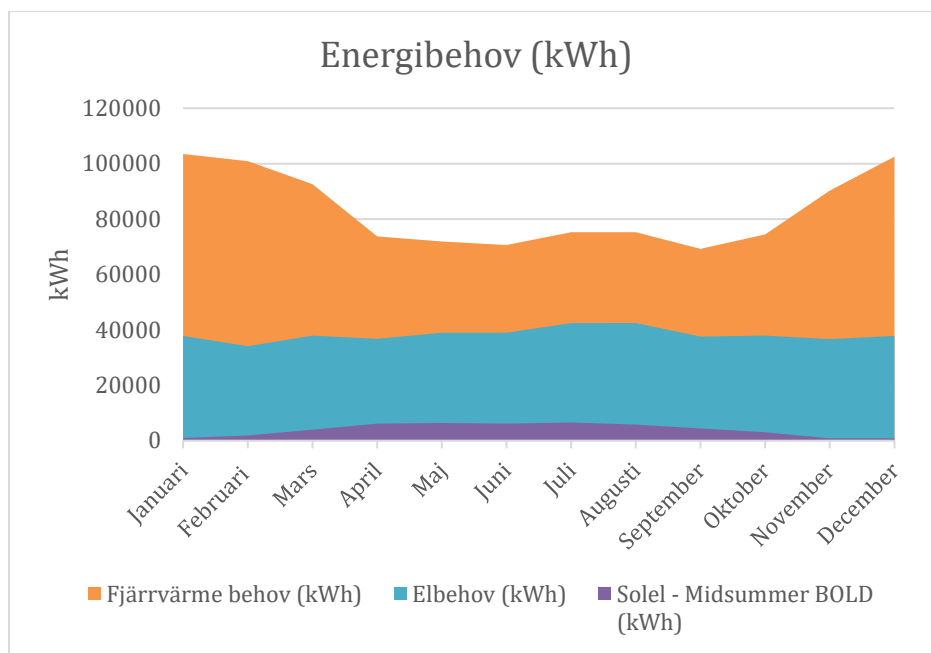
$$\begin{aligned}
 &= (\text{solelproduktion första året} * 25) * ((1 - \text{degradation})^{25}) \\
 &= (46935 * 25) * ((1 - 0,007)^{25}) \\
 &= 984\,392\,kWh = 984\,MWh
 \end{aligned}$$

Solcellsanläggnings installerad effekt är beräknad med hjälp av STC-effekt av solcell 195W för BOLD:

$$\begin{aligned}
 \text{Installerad effekt} &= \text{Antal paneler (söder + sydost)} * \frac{\text{STC effekt}}{1000} \\
 &= (98,8 + 165,3) * \frac{195}{1000} = 51\,kWp
 \end{aligned}$$

Tabell (4.2). Midsummer BOLDs solelproduktion

Solelproduktion (1:a året)	47	MWh/år
Solelproduktion (25 år), deg=0,38%	984	MWh
Solcellsanläggning installerad effekt (söder + sydost)	51	kWp
Antal solceller	264	st
Area solceller	450	m ²



Figur (4.2). Solelproduktion från Midsummer BOLD i jämförelse med energi- och elbehov

4.1.2 Val av växelriktare baserat på solelproduktion

Installerad effekt för de olika lösningsförslagen blir 88 kWp för SoliTek respektive 51 kWp för Midsummer BOLD. Eftersom båda solcellslösningar är fördelade över två separata tak kommer två växelriktare att installeras för att minimera mängden kablar.

För SoliTek BLACKSTAR blir fördelningen 55 kWp (hus 2) samt 33 kWp (hus 3), medan för Midsummer BOLD 32 kWp (hus 2) respektive 19 kWp (hus 3). Vid val av växelriktare väljs modeller från Solex, då detta märke har 3-fas växelriktare modeller för 17 kW, 30 kW och 50 kW.

Tabell (4.3). Valda växelriktare

	SoliTek BLACKSTAR		Midsummer BOLD	
	Hus 2	Hus 3	Hus 2	Hus 3
Installerad effekt för solceller	55 kWp	33 kWp	32 kWp	19 kWp
Växelriktare	Solax X3-MEGA (50 kW)	Solax X3-30 (30kW)	Solax X3-30 (30 kW)	Solax X3-PRO-17 (17 kW)
Nominell effekt på växelström (output)	50 kW	30 kW	32 kW	19 kW

Max effekt på likström (input)	75 kWp	42 kWp
Max effektivitet	98.3%	98.3%

Max effekt på likström (input)	42 kWp	22.5 kWp
Max effektivitet	98.3%	98.3%

4.2 Klimatpåverkan

4.2.1 Solcellsanläggningar

I detta avsnitt kommer resultat på klimatpåverkan från installationen av solcellsanläggningarna att redovisas.

4.2.1.1 Solcellsmoduler

Från Midsummer BOLDs LCA-beräkning i dess EPD fås det fram att den totala GWP:n blir 143,2 kg CO_2e/kWp , vilket med hänsyn till den installerade effekten på 51 kWp blir 7 303 kg CO_2e . Med en solelproduktion på 984 MWh över 25 år får Midsummer BOLD en klimatpåverkan på 7,4 g CO_2e/kWh .

Totala klimatpåverkan baserade på installerad effekt:

$$143,2 \text{ kg } \frac{CO_2e}{Wp} * 51 \text{ kWp} = 7\,303 \text{ kg } CO_2e$$

Emissionsfaktorn:

$$\frac{7\,303 \text{ kg } CO_2e}{984\,000 \text{ kWh}} = 7,4 \text{ g } \frac{CO_2e}{kWh}$$

För att estimeras SoliTek BLACKSTARs klimatpåverkan används den tidigare beräkningen på modulens klimatpåverkan, 393,87 kg CO_2e/kWp . I figur (3.4) - Klimatpåverkan för den primära produktionen, redovisas det att modultillverkning står för cirka 88,7% av klimatpåverkan under hela livscykeln, vilket innebär att den totala mängden blir ungefär 444 kg CO_2e /kWp . Med en installerad effekt på 88 kWp och en elproduktion på 1 749 MWh. Efter 25 år blir klimatpåverkan 22,3 g CO_2e /kWh för SoliTek BLACKSTAR.

Totala klimatpåverkan baserade på installerad effekt och tidigare beräkningen på modulens klimatpåverkan:

$$\frac{393,87 \text{ kg } \frac{CO_2e}{kWp}}{0,887} = 444 \text{ kg } \frac{CO_2e}{kWp}$$

$$444 \frac{\text{kg}CO_2e}{kWp} * 88 \text{ kWp} = 39\,076 \text{ kg } CO_2e$$

Emissionsfaktor:

$$\frac{39\,076 \text{ kg}CO_2e}{1\,749\,000 \text{ kWh}} = 22,3 \text{ g } \frac{CO_2e}{kWh}$$

Anledningen till att klimatpåverkan fördelas på energiproduktionen över hela livscykelns är för att rimligtvis kunna jämföra den med den alternativa elmixen, i detta fall den nordiska elmixen.

Tabell (4.4). Information om emissionsfaktor från olika elmixar som används i beräkningar samt andra energikällor

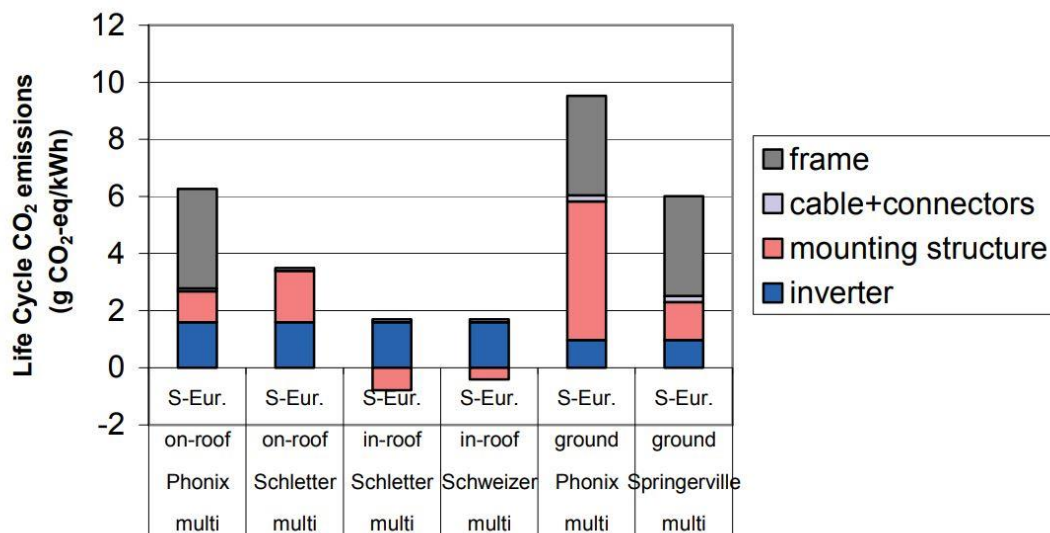
Elmix	Emissionsfaktor (g CO ₂ e kWh)	År	Källa
Nordisk elmix	90	2020	Naturvårdsverket (2022)
Midsummer BOLD	7,4	2022	EPD
SoliTek BLACKSTAR	22,3	2023	Salvi (2023) & SoliTek's klimatdata
Vindkraft	~11	2022	Energimyndigheten (2022)
Vattenkraft	~4	2022	Energimyndigheten (2022)
Kolkraft	740 - 1 689	2022	Energimyndigheten (2022)

En anledning till att Midsummer BOLD får så mycket lägre klimatpåverkan är att Midsummer är ett svenskt företag som använder sig av renare elmix än SoliTek. Tunnsolceller har även i överlag en mindre klimatpåverkan på grund av mindre materialanvändning, då Midsummers paneler inte använder glas alls, utan det yttersta översta skiktet på modulen består av ETFE – ethylene tetrafluoroethylene, ett beständigt polymermaterial som har en blank yta, vilket gör att smuts inte fastnar så lätt. Baksidan av BOLDs modulen består av PET – polyetentereftalat. Användningen av polymerer som ett alternativ till glas kan ge en minskning av klimatpåverkan från modultillverkningen.

I jämförelse med andra förnybara energikällor i Sverige som vindkraft och vattenkraft så ligger Midsummer BOLD inom samma storleksordning medan SoliTek BLACKSTAR får ungefär dubbelt så mycket i klimatpåverkan i jämförelse med vindkraft och femfaldigt så mycket i jämförelse med vattenkraft.

4.2.1.2 Växelriktare

Schablonvärden för klimatpåverkan från växelriktare och resterande BOS komponenter används på grund av okompleta värden på Solaxs växelriktares klimatavtryck. Enligt De Wilde-Scholten (2006) producerar en växelriktare ungefär 1,8 g CO₂e /kWh för växelriktare på tak, se figur (4.3). Denna beräkning är gjord med tyskproducerade växelriktare år 2006, vilket betyder att en elmix på cirka 500 g CO₂e /kWh användes (Fu m.fl., 2015).



Figur (4.3). BOS systems klimatavtryck i g CO₂e /kWh. (De Wild-Scholten, 2006)

Det är svårt att hitta exakt data för växelriktarens klimatpåverkan, men tidigare studier tyder på att BOS komponenter bidrar till ungefär 5 g CO₂e /kWh, vilket stämmer överens med tidigare antagande (Fu m.fl., 2015). 1,8 CO₂e /kWh kommer att användas för beräkningen på växelriktarnas klimatpåverkan medan 5 g CO₂e /kWh kommer att användas för växelriktarna inklusive resterande BOS komponenter.

SoliTek BLACKSTAR

Tabell (4.5). Klimatpåverkan från växelriktare för BLACKSTARs solceller

Växelriktare	MWh (10 år)	g CO ₂ e /kWh	ton CO ₂ e	ton CO ₂ e (inklusive resterande BOS)
Hus 2	423	1,8	0,76	2,1
Hus 3	317	1,8	0,57	1,6
Totalt			1,3	3,7

För SoliTek BLACKSTAR blir växelriktarnas koldioxidutsläpp 1,3 ton CO₂e, och 3,7 ton CO₂e med resterande BOS komponenter installerade. Växelriktare och BOS komponenter kommer att behövas installeras tillsammans med solcellerna och sedan kommer växelriktarna att behövas bytas ut ytterligare två gånger under solcellernas livscykel, vilket blir totalt 6,3 ton CO₂e under solcellsanläggnings livstid. Detta bidrar till att det totala utsläppet från installationer och växelriktareutbyte blir 45 ton CO₂e för SoliTek BLACKSTAR.

$$Total_{växelriktare+BOS} = 3,7 + (1,3 * 2) = 6,3 \text{ ton CO}_2e$$

$$Total_{inklusive solcell} = 39,1 + 6,3 = 45,4 \text{ ton CO}_2e$$

Midsummer BOLD

Tabell (4.6). Klimatpåverkan från växelriktare för BOLDs solceller

Växelriktare	MWh (10 år)	g CO ₂ e /kWh	ton CO ₂ e	ton CO ₂ e (inklusive resterande BOS)
Hus 2	250	1,8	0,45	1,25
Hus 3	187	1,8	0,34	0,94
Totalt			0,78	2,19

För Midsummer BOLD blir det totala koldioxidutsläppet för växelriktare, BOS komponenter och utbyte av växelriktare 3,8 ton CO₂e vilket bidrar till att det totala utsläppet från installationer och växelriktare-utbyte blir 9,6 ton CO₂e för Midsummer BOLD.

$$Total_{växelriktare+BOS} = 2,19 + (0,78 * 2) = 3,8 \text{ ton CO}_2e$$

$$Total_{inklusive solcell} = 7,3 + 3,8 = 11,1 \text{ ton CO}_2e$$

4.2.2 Byggnader utan och med solcellsanläggningar

I detta avsnitt kommer resultat på klimatpåverkan från byggnader, energi- och elanvändning, fjärrvärme presenteras tillsammans med klimatpåverkan från byggnader utan och med solceller.

4.2.2.1 Klimatpåverkan från byggnader

LCA-beräkning för liknande projekt i Uppsala ger ett referensvärde av byggnaders klimatpåverkan på cirka 285,4 kg CO₂e /m² ljus BTA. Ljus BTA är en bruttoarea ovanför mark, som inte inkluderar vare sig källare eller garage. Detta värde är ett genomsnitt av koldioxidekvivalent per kvadrat av byggnader med gröna betong som det huvudsakliga byggmaterialet. Detta ger därmed en klimatpåverkan på ungefär 3 967 ton CO₂e med 13 900 m² golvarea av Södra Änggårdens projekt. Total klimatpåverkan från byggnader och energianvändning blir 5 865 kg CO₂e över dess livstid (25 år). Mer om hur beräkningar redovisas i tabellen nedan:

Tabell (4.7). Klimatpåverkan från byggnader med hänsyn till energianvändning och nordisk elmix

Klimatpåverkan från byggnader			
Klimatpåverkan från byggnadskonstruktion	285.4	kgCO ₂ e/m ²	(Referensprojekt , GICON)
Byggnadsarea	13 900	m ²	
Klimatpåverkan från byggnad	3 967	tonCO ₂ e	
Byggnadens elanvändning (1 år)	459	MWh/år	
Elanvändning under dess livslängd (25 år)	11 486	MWh	
Fjärrvärme användning (1 år)	540	MWh/år	

Fjärrvärme användning (25 år)	13 508	MWh	
Klimatpåverkan från nordisk elmix	90	gCO ₂ e/kWh	
Klimatpåverkan från elanvändning (25 år)	1 033	ton CO ₂ e	
Klimatpåverkan från standard fjärrvärme (förbränning, transport, produktion)	64	gCO ₂ e/kWh	(Göteborg Energi, 2022)
Klimatpåverkan från fjärrvärme (25 år)	864	tonCO ₂ e	
Total klimatpåverkan från byggnaden och energianvändning	5 864	ton CO ₂ e	
varav klimatpåverkan från byggnaden och elanvändning	5 000	ton CO ₂ e	

4.2.2.2 Klimatpåverkan från byggnader utan och med solcellsanläggningar

Tabeller nedan demonstrerar klimatpåverkan från byggnader utan och med solcellsanläggningarna. Tabellerna visar även de resultat som förväntas om klimatpåverkan från elmix och fjärrvärmen minskar enligt nuvarande trendlinjer under solcellernas livslängd på 25 år.

Beräkningarna genomförs genom att räkna bort solelproduktionen från byggnadens elproduktion för att se hur mycket av elen som det besparas på. Sedan läggs klimatpåverkan från BOS komponenterna och solcellerna till för att jämföra hur stor del av byggnaden egentligen sparar in på koldioxidutsläpp.

Tabell (4.8). Byggnader utan och med solceller

Klimatpåverkan från byggnad utan och med solcellsanläggning	SoliTek BLACKSTAR [ton CO ₂ e]	Midsummer BOLD [ton CO ₂ e]
Byggnad	3 967	3 967
Köpt el	1 033	1 033
Fjärrvärme	864	864
Totalt (utan solceller)	5 864	5 864
Byggnad	3 967	3 967
Köpt el	876	945
Solel (solcellers klimatpåverkan)	45	11
Fjärrvärme	864	864
Totalt (med solceller)	5 752	5 787
Minskning [ton CO₂]	1,9%	1,3%

Tabell (4.9). Byggnader utan och med solceller [framtidsvision, 2048]

Klimatpåverkan från byggnad utan och med solcellsanläggning (framtidsvision)	Solitek BLACKSTAR [ton CO ₂ e]	Midsummer BOLD [ton CO ₂ e]
Byggnad	3 967	3 967
Köpt el	729	729
Fjärrvärme	648	648
Total (utan solceller)	5344	5 344
Byggnad	3 967	3 967
Köpt el	618	667
Solel (solcellers klimatpåverkan)	45	11
Fjärrvärme	648	648
Total (med solceller)	5 278	5 292
Minskning [ton CO₂]	1,2%	1,0%

Utifrån dessa resultat minskar BLACKSTAR moduler ungefär 1,9% av den totala klimatpåverkan av fastigheten, medan BOLD moduler minskar 1,3%. Samma beräkning görs med framtidsscenario (år 2048) där elmix- och fjärrvärmes klimatpåverkan minskar med ett antagande på 2,1 g CO₂e per år, baserad på tidigare trender. Resultaten blir 1,2% respektive 1,0%.

Beräkningarna ger följande värde under 25 år:

- Klimatpåverkan från byggnader utan solcellsanläggning: 5 864 ton CO₂e
- Klimatpåverkan från byggnader med solcellsanläggning:
 - Med SoliTek BLACKSTAR: 5 752 ton CO₂e, vilket motsvarar 1,9 % CO₂e - besparing
 - Med Midsummer BOLD: 5 787 ton CO₂e, vilket motsvarar 1,3% CO₂e - besparing

4.3 Lönsamhetsberäkningar

Tabellen nedan illustrerar en rad av olika parametrar som tas i beaktande för att få fram resultat för livscykelkostnad och lönsamhetsbedömning av olika åtgärder med och utan solcellsanläggningar.

Tabell (4.10). Indata för LCC-beräkning av Midsummer BOLD och SoliTek BLACKSTAR

	BOLD	BLACKSTAR
Installerad effekt (kW)	51	88
Effekt (W)	195	370
Pris per solpanel (kr/panel)	2 853	3 255
Antal solpaneler (st)	264	237
Specifik investering (kr)	753 192	771 435
Arbetskostnad (kr/panel)	1 200	1 200

Investeringskostnad (kr)	1 069 992	1 055 835
Årsproduktion solel (MWh/år)	47	77
Årligt elbehov utan solceller (MWh/år)	459	459
Årligt elbehov efter investering (MWh/år)	412	382
Årlig ersatt köpt el (MWh/år)	47	77

Investeringskostnad inkluderar den specifika investeringen för solpaneler och även arbetskostnad som utgör cirka 30–40% av pris på solpaneler, dock i detta fall förenklas beräkningar genom att anta samma arbetskostnader för båda solcellstyper. Det årliga elbehovet efter solelinvesteringen är 412 MWh/år för Midsummer BOLD respektive 382 MWh/år för SoliTek BLACKSTAR.

Kalkylperiod antas vara 25 år med avseende på solcellsanläggningars livstid. Mer om indata finns i bilaga 5. Drift- och underhållskostnad inkluderar två byten av växelriktare var 10:e år och det första året. Pris på växelriktare samt för vilka solcellsanläggning de använt sig av presenteras nedan:

Tabell (4.11). Valda växelriktare för solcellsanläggningar

Växelriktare	Pris (kr)	Solcellsanläggning
Solax 50 kW	28 600	SoliTek BLACKSTAR
Solax 30 kW	24 000	Midsummer BOLD SoliTek BLACKSTAR
Solax 17 kW	16 000	Midsummer BOLD

Med hjälp av nuvärdesmetod blir livscykelkostnad för olika system enligt följande:

Tabell (4.12). Beräkningar och resultat på LCC baserad på nuvärdesmetod

Beräkningar och resultat

	Alt A utan solceller	Alt B Midsummer BOLD	Alt C SoliTek BLACKSTAR
Nuvärde investering minus restvärde (kr)	- kr	1 069 992 kr	1 055 835 kr
Nuvärde drift- och underhållskostnader (kr)	- kr	56 717 kr	74 583 kr
Nuvärde övriga kostnader (kr)	- kr	- kr	- kr
Nuvärde energikostnader (kr)	28 728 581 kr	26 604 373 kr	25 246 030 kr
Livscykelkostnad, LCC (kr)	28 728 581 kr	27 731 083 kr	26 376 448 kr

Lönsamhetsbedömning av åtgärd B och C (jämfört mot Alt A)

Rak återbetalningstid, payoff (år)	16,3	9,8
Nettonuvärde av investering, Minskning LCC (kr)	997 499 kr	2 352 133 kr

Lönsamhetsbedömning av åtgärd B (BOLD) och C (BLACKSTAR), jämfört mot alternativ A (utan solceller) ger en rak återbetalningstid på 16 år för BOLD och cirka 10 år för BLACKSTAR. Detta ger en förväntad besparing på 997 499 kr respektive 2 352 133 kr under 25 år av drift. Med hänsyn till beräknade data har SoliTek BLACKSTAR lägst LCC-kostnad och kortare återbetalningstid.

5 Diskussion

Denna studie hade för avsikt att jämföra olika lösningsförslag på solsystem med hänsyn till solcellsanläggnings klimatpåverkan, effektivitet och ekonomiska fördelar. Dessa lösningsförslag hade tillämpats i ett pågående projekt av kommersiella byggnader i Södra Änggården, Göteborg och lett till resultat som ska diskuteras i detta kapitel.

5.1 Solelproduktion

Fastigheten förväntas använda cirka 100% av solelen direkt i huset med hänsyn till fastighetens höga elförsörjning och minimal solelproduktion från båda solcellstyperna. Detta bidrar till både solcellsanläggningens ekonomiska nytta samt ett reducerat elköp i fastigheten. Då all solel går till egenanvänd el har den ett större värde än den överskottsel som matas ut på nätet för den ekonomiska nyttan. Eftersom solcellsanläggningar inte genererar tillräckligt el för att få överskottsproduktion, tas det därmed inte hänsyn till energilagring i form av batterier. Vidare är alla hustak utformade med olika lutningar (45- och 10 grader), vilket inte alltid är optimala för en effektiv solelproduktion i nordiska förhållanden. Platta tak anses vara bättre i det här fallet då de kan använda sig av en ställning och anpassas efter placeringar och väderstreck för att få en bättre lutning för solceller.

Beräkningar i denna studie är utförda för skuggfria förhållanden mellan klockan 9 och 15 under sommarhalvåret som är de mest betydelsefulla timmarna på året. Elproduktionen är uträknad med hjälp av IDA ICE:s instrålningsdata från centrala Göteborg, vilket kan ge en mindre produktion i det verkliga förhållandet.

5.2 Klimatpåverkan

5.2.1 Solcellsanläggning

5.2.1.1 Solcellsmoduler

Som det nämndes i kapitel 3.3 fanns det flera aspekter som togs hänsyn till vid valet av SoliTek BLACKSTAR och Midsummer BOLD. Den största anledningen var för att jämföra monokisel- med tunnfilmstekniker för att se vad skillnader av dessa tekniker blir på större projekt som Södra Änggården. Midsummer BOLD, som är tunnfilm, har en mycket mindre klimatpåverkan från sin livscykel, men dess låga verkningsgrad gör att klimatavtrycket på hela byggnaden blir ungefär samma som för SoliTek. Däremot hör tunnfilm till andra generationens solceller och kan förväntas bli bättre med tiden. Det finns redan i dagsläget tunnfilmssolceller CIGS som har en verkningsgrad på upp till 28%. Dessa används främst till solpaneler på rymdfarkoster, dock i dagsläget är dess kostnader för höga för att rimligtvis installeras på fastigheter.

För beräkningar av solcellernas klimatpåverkan fanns det begränsat med data för SoliTek's totala klimatpåverkan. Därför togs ett estimerat värde fram med hjälp av data på tillverkningens klimatpåverkan och ett fördelningsdiagram för en annan kristallin solcell från SoliTek, SOLID pro P60. Eftersom det inte är samma solcell blir datan inte exakt, men båda solcellerna använder liknande mängd material vid sina produktioner. Därav kräver dessa data och resultat en försiktig tolkning vid kommande diskussioner. Eftersom SoliTek's-, lik Midsummers solceller har en väldigt liten inverkan på hela byggnadens koldioxidutsläpp så påverkar denna osäkerhet inte resultaten något drastiskt.

En annan faktor som inte togs med i klimatberäkningar är avfallshantering (skede D i livscykelanalys). Anledningen är att SoliTek BLACKSTAR saknade detaljer i sitt produktblad

kring hur kiselsolceller skulle hanteras i slutskede, medan Midsummer BOLD visade klimatpåverkan för avfallshantering i sin EPD. Av dessa skäl valdes detta skede bort från studien för att underlätta klimatberäkningar, samt göra en jämn jämförelse, vilket bör beaktas vid tolkning av klimatpåverkan av solceller.

5.2.1.2 Växelriktare

Vid val av växelriktare fanns det många tekniska egenskaper som behövdes tas hänsyn till. Schablonvärden användes istället på grund av begränsade data för specifika växelriktares klimatpåverkan. För att få så rimliga värden som möjligt behövdes därför ett företag som producerade växelriktare som hade efterliknande egenskaper till de som schablonvärdena var baserade på. Utöver detta behövde tillverkaren även ha produkter som upplevde de olika tekniska egenskaper och behov som solcellsanläggningen krävdes samt priser på produkterna. Solax, som var företaget som valdes, är ett internationellt företag som har kontor i ett flertal europeiska länder men som producerar sina växelriktare i Kina. Schablonvärdena är från Tyskland när de hade en elmix på cirka 500 g CO_2e/kWh , vilket efterliknar Kinas elmix i dagsläget enligt erfarenhetsvärde.

5.2.2 Byggnader och soletproduktion

Likt SoliTek BLACKSTAR saknades en komplett klimatdeklaration för projektet Södra Änggården. Däremot fanns det data för A_{temp} - byggnadens totala golv area som ligger på 13 900 m^2 . Ett liknande projekt från Uppsala användes för att få fram ett värde på klimatavtrycket i enheten $kg\ CO_2e / m^2$ för ljus BTA - bruttoarean över marknivå. Mörk BTA utesluts då det enbart utgör en liten del av klimatpåverkan och Södra Änggården kan bara jämföras med projektet i Uppsala till en viss säkerhet på ljus BTA. Resultatet för Södra Änggårdens klimatavtryck per kvadrat bör därmed vara liknande med tanken på osäkerheter. Byggnadens klimatpåverkan utan solceller ligger mellan 5 865 ton CO_2e till 5 344 ton CO_2e beroende på om beräkningen genomförs med framtida trender för minskad klimatpåverkan från elmix och fjärrvärme eller inte. Oavsett vilken beräkning som används så täcker det insparade koldioxidutsläppet bara 1–2% av hela byggnadens utsläpp under de 25 år av livstid som solcellerna har. En faktor till varför produktionen blir så låg i Sverige är den geografiska placeringen av solcellerna, men framför allt i detta fall är byggnadens storlek och energibehov relativt stor till tillgänglig takyta för installation av solceller. Ytan för solcellsininstallationerna är 450 m^2 för både Midsummer BOLD och SoliTek BLACKSTAR, vilket bara motsvarar ungefär 3% av den totala byggnads arean 13 900 m^2 . Hade byggnaden varit mindre med samma takyta, eller varit lika stor fast med en större takyta, så hade solcellerna haft en större påverkan, där skillnaden mellan SoliTek's BLACKSTARs 1,9% och Midsummer BOLDs 1,3% hade kunnat vara mer betydande. Anläggningen hade dessutom troligtvis haft överproduktion med solet vissa dagar eller veckor om året där överskottet hade kunnat säljas. Däremot för byggnader så som höghus i det här fallet bör det i stället övervägas att möjligtvis installera solceller på fasaden. Även ifall effekten avtappar på lodräta ytor så har solinstrålningen en effektivitet på 75% vid söderriktning enligt tabell (2.4).

När det kommer till framtidsberäkningarna där fjärrvärme och elmix minskar med varje år enligt nuvarande trendlinjer så finns det många variabler och externa faktorer som påverkar hur elmixen egentligen förändras. Det svenska elsystemet sitter ihop med ett flertal grannländer, vilket möjliggör en ökad import och export av el över gränserna. För att svensk- och nordisk elmix ska bli renare så måste Sverige förlita sig på att andra grannländer som exporterar el till landet börjar använda sig av mer klimatsmarta energiproduktioner. En annan påverkan på Sveriges elmix är även självförsörjande energikällor, som i det här fallet är

solceller. Om allt fler fastigheter använder sig av egenproducerad el så minskar detta behov av köpt el från elnät och därmed importen av andra länders el. Detta i sin tur minskar solcellernas ”insparade” klimatpåverkan på fastigheten med dessa kalkyler, men har indirekt minskat hela fastighetens CO₂-utsläpp från elanvändningen.

5.2.3 Fjärrvärme

Som det illustreras i figur (4.1) och (4.2) täcks ungefär 54% av det totala energibehovet av fjärrvärme. För distribution av fjärrvärme krävs en fjärrvärmecentral som likt solceller har en livslängd på cirka 25 år. Som tidigare nämnt för elens emissionsfaktor så är det svårt att estimera hur emissionsfaktorn kommer att variera under årens gång för fjärrvärme, men i dagsläget har standard fjärrvärme nästan hälften av koldioxidekvivalenter av vad elmixen har vilket gör det till ett bra och hållbart alternativ.

5.3 LCC

Trots den mindre klimatpåverkan från Midsummer BOLDs modultillverkningen, då nästan alla skede hanteras i Europa och i Sverige, sparar fastigheten cirka 2,3 miljoner SEK genom att välja SoliTek BLACKSTAR moduler istället. SoliTek BLACKSTAR har en högre verkningsgrad, 19%, vilket medför en större solexproduktion än Midsummer BOLD med verkningsgraden 11%. Detta leder till en kortare återbetalningstid på cirka 10 år för BLACKSTAR, därav gynnas fastigheten mer i längden.

Under 25 år av solcellsanläggningars livslängd är det inte mycket insparat på grund av lägre solexproduktion i jämförelse med energibehov för fastigheten. Efter slutförd analys på byggnadens klimatpåverkan med och utan solceller samt livscykelkostnad drogs slutsatsen att SoliTek verkar mest lämpat både ekonomiskt och ekologiskt, dock obetydligt märkbart i jämförelse med Midsummer BOLD.

Trots dessa minimala solexproduktioner ökar solcellerna fastighetsvärde av olika anledningar. Dels ger solcellerna lägre el- och driftkostnader under 25 år, dels gör solcellsinvestering att fastigheten blir mer attraktivt vid framtidig försäljning. Avkastningen på investerade solceller är hög med dagens elpriser och har en stor sannolikhet att bli ännu bättre.

6 Slutsats

I detta kapitel presenteras de främsta slutsatserna som har framkommit i studien med hänsyn till ovannämnda frågeställningarna:

- Hur mycket av elbehov täcker solelproduktion av monokristallina- och tunnfilmssolceller?

Solelproduktion av monokristallina solceller från SoliTek täcker cirka 17% av elbehovet, medan tunnfilmssolcellers produktion avgör 10% av elanvändningen.

- Vad har dessa två solcellsalternativen för klimatpåverkan med hänsyn till livscykelanalys?

Utifrån rapportens resultat ger solcellsanläggningar med solceller från Midsummer och SoliTek idag ett värde runt 7–22 g CO_2e/kWh i Sverige. Detta är jämförbart med klimatpåverkan från till exempel vindkraft och vattenkraft

Detta blir däremot nära till obetydligt för projekt av liknande natur i jämförelse med vattenkraft och vindkraft som har nära till försumbara klimatavtryck.

- Hur ser resultat ut vid jämförelse av klimatpåverkan från byggnader med och utan solceller? Är det klimatsmart att installera solceller med avseende på nordiska elmix i dagsläget?

Klimatpåverkan beräknas utgående från att solelen ersätter köpt el med en nordisk elmix på 90g CO_2e/kWh . Klimatpåverkan från byggnader utan solcellsanläggning blir 5 865 ton CO_2e . Med solceller på taket blir två olika resultat beroende på vilka solcellsmoduler som installeras:

SoliTek BLACKSTAR bidrar till en minskning av 1,9% CO_2e (5 752 ton CO_2e), medan Midsummer BOLD ger 1,3% CO_2e -besparing (5 786 ton CO_2e). Med ökad användning av förnybara energikällor som vindkraft och solkraft/solel förväntas den nordiska elmixen ge en mindre klimatpåverkan i framtiden.

- Finns det lönsamhetspotential när byggnader installerar och tar vara på egenproducerad energi via solceller? Vilken solcellsteknik är kostnadseffektiv och ge en kortare återbetalningstid?

Lönsamhetsbedömning av alla tre åtgärder (byggnader utan och med två olika solcellslösningar) ger en rak återbetalningstid på 16 år för Midsummer BOLD och cirka 10 år för SoliTek BLACKSTAR. Utan solceller blir livscykelkostnad för byggnader cirka 28,7 miljoner kronor. Solcellsanläggningar bidrar till en förväntad besparing på cirka en miljon kronor respektive 2,3 miljoner kronor under 25 år av drift. Mer om LCC-resultat finns i tabell (4.12). Av dessa anledningar har SoliTek BLACKSTAR lägst LCC-kostnad och kortare återbetalningstid.

Uppsatsen behandlar endast två systemlösningar och tar ej nytta av alla möjliga taktytor på grund av takkupor och väderstreck. Det hade behövts bättre eller större taktytor för solceller. Att tillämpa BIPV (byggnadsintegrerade solceller) på utsidan av hela fasaden, eller endast i skuggfritt söderläge anses vara ett annat alternativ som ger en bättre avkastning på solcellsanläggning.

Förutom att solenergi bidrar till minskad klimatpåverkan genom att ersätta elproduktion från fossila bränslen, är soletproduktion tyst och stör inte omgivningen. Egenkonsumerad solet minskar förlusterna vid elöverföring genom elnäten. Efter installation av solceller på taket ger den flera miljömässiga fördelar som diskuterats tidigare i arbetet. Solenergi minskar behovet av markanvändning och vattenresurser samt skyddar den biologiska mångfalden genom att inte förstöra skog, vattendrag, djur- och fågelliv. Användningen av solenergi minskar också beroende av energiimport från länder som producerar energi från fossila bränslen, som därav reducerar även risken för geopolitiska konflikter relaterade till energiförsörjning.

Gällande den jämförelse av två olika solcellstyper som presenteras i rapporten är det viktigt att fokusera på olika elmixar vid modultillverkningen då dessa utgör de största klimatutsläppen över hela livscykeln. Hade Midsummer BOLD haft SoliTek BLACKSTARs effektivitet, eller SoliTek BLACKSTAR haft Midsummer BOLDs låga klimatpåverkan, så hade de haft en mer märkbar jämförelse. Framtida elmixar förväntas ha mindre klimatpåverkan på grund av en större andel av förnybar energi och en minskning i fossila bränslen. Dock kan det uppkomma oförväntade händelser som de senaste fem åren med pandemin och krig. En ökad användning av fossila bränslen för att ersätta bortfall av energi från länder som är inblandade i konflikten ledde till ett högre utsläpp av växthusgaser och en ökad klimatpåverkan från elproduktionen. Samtidigt ledde dessa händelser också till en ökad satsning på förnybar energi i många andra länder med syfte för en mer självförsörjande elproduktion.

Som tidigare nämnts sker det en extremt snabb teknikutveckling som minskar klimatavtryck för nya solcellsmoduler. Med tiden kommer flera länder som tillverkar solceller, att prioritera förnybar el, vilket möjliggör ett minskat klimatavtryck för kommande solcellsmoduler. Gällande materialåtervinning i en kiselmodul, främst metaller kan detta ske mer miljövänligt. 100% av silvret och cirka 85% av indiumet i tunnfilmssolceller återvinns med en kostnadseffektiv och miljövänlig process, enligt forskningen på Chalmers som nämnts tidigare.

Solceller som installeras och tillverkas i Sverige kommer förmodligen ha ett klimatavtryck på mellan 5–10 g CO_2e /kWh tack vare de fossilfria svenska- och även nordiska elmixar inom en snar framtid. Det finns osäkerheter som föreligger vid beräkning av klimatpåverkan då det är utmanande att få tillgång till exakta siffror gällande klimatavtryck från företag och elmixar från olika länder. Trots detta dras slutsatsen att nettoklimatnyttan är positiv, då utsläppen minskar mer vid användning av solcellerna än vad som släpps ut under produktionen, vilket ger ett positivt resultat. Utifrån solcellsanläggningars klimatpåverkan som behandlas i denna studie är det rekommenderat att investera på solceller mer i Sverige och även i andra länder som inte har lika ren elmix som Sverige och Norden för att öka nettoklimatnyttan för solceller. Avslutningsvis skall dessutom solcellstillverkning ske i länder med fossilfri elmix, såsom Sverige, för att därmed bidra till en minskad klimatpåverkan på en större skala.

Referenser

- Askemar, H., & Van Noord, M. (2021). Jämförelse av klimatpåverkan från tillverkning av olika solcellsmoduler. *RISE*.
- Baumann, H., & Tillman, A.-M. (u.å.). *LCA i ett nötskal*.
- Bernardo, R., Noord, M. van, Kovács, P., & Davidsson, H. (2022). Large-scale Demonstration of Building-Integrated Photovoltaics-Feasibility Study. *Energimyndigheten*. <https://www.e2b2.se/media/vpefnfhp/slutrapport-f%C3%B6rstudie-f%C3%B6r-%C3%B6kad-anv%C3%A4ndning-av-byggnadsintegrerade-solceller.pdf>
- Bonava. (u.å.). *Nyproduktion i Södra Änggården - bostäder till salu i Göteborg*. Hämtad 04 maj 2023, från <https://www.bonava.se/bostad/goteborg/sodra-anggarden>
- Boverket. (2019). *Introduktion till livscykelanalys (LCA)*. <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/introduktion-till-livscykelanalys-lca/>
- Boverket. (2022). *När ska klimatdeklarationen upprättas och registreras* . Klimatdeklaration. <https://www.boverket.se/sv/klimatdeklaration/gor-sa-har/faststall-tidpunkt/>
- CIT Industriell Energi AB, Länsstyrelsen i Skåne, & Energimyndigheten. (2017). *Manual till verktyg för beräkning av livscykelkostnad*. <https://www.energimyndigheten.se/contentassets/dec414945bbf4a2e86365041f49a1f93/manual-till-verktyg-for-berakning-av-livscykelkostnad.pdf>
- Čorba, Z. J., Katić, V. A., Dumnić, B. P., & Milićević, D. M. (2012). In-grid solar-to-electrical energy conversion system modeling and testing. *Thermal Science*, 16(SUPPL. 1). <https://doi.org/10.2298/TSCI120224069C>
- Dahlin, P. (2022). *Regeringen öppnar för ny kärnkraft – och solcellskrav*. Omni. <https://omni.se/regeringen-oppnar-for-ny-karnkraft-och-solcellskrav/a/9K91bM>
- de Wild-Scholten, M. J., Alsema, E. A., ter Horst, E. W., Bächler, M., & Fthenakis, V. M. (2006). A cost and environmental impact comparison of grid-connected rooftop and ground-based PV systems. *European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany*. <http://clca.columbia.edu/papers/21%20EUPVSC%20-%20deWild%20et%20al%20-%20Cost%20and%20environmental%20impact%20comparison.pdf>
- Energimyndigheten. (u.å.). *Växthusgasberäkning*. Hämtad 04 maj 2023, från <https://www.energimyndigheten.se/fornybart/hallbarhetskriterier/hallbarhetslagen/fr-agor-och-svar/vaxthusgasberakning/>
- Energimyndigheten. (2022). *Minskad elanvändning under 2022*. <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2023/minskad-elanvandning-under-2022-i-sverige/>
- Engberg, S. (2020). *Ny guide förenklar vid solcellsinstallationer*. Energimyndigheten. <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2020/ny-guide-forenklar-vid-solcellsinstallationer/>
- EPIA, & Greenpeace. (2011). *Solar photovoltaic electricity empowering the world*.
- EQUA. (u.å.). *Validering och certifiering - Simulation Software* . Hämtad 04 maj 2023, från <https://www.equa.se/se/ida-ice/validering-certifiering>
- European Commission. (2021). *2030 climate & energy framework*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_en
- European Environment Agency. (2022). *CO2 emission intensity* . <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-5#tab->

- googlechartid_chart_11_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_ugeo%22%3A%5B%22European%20Union%20(current%20composition)%22%5D%7D%7D
- Europeiska rådet - Europeiska unionens råd. (2022). *EU:s senaste klimatpolitiska åtgärder*.
<https://www.consilium.europa.eu/sv/policies/climate-change/eu-climate-action/>
- Fu, Y., Liu, X., & Yuan, Z. (2015). Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China. *Journal of Cleaner Production*, 86, 180–190.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.07.057>
- Göteborgs Stad. (u.å.). *Solenergianläggningar - solceller, solpanel och solfångare*. 2023. Hämtad 04 maj 2023, från <https://goteborg.se/wps/portal/start/bygga-bo-och-leva-hallbart/bygga-riva-och-forandra/vad-ska-du-bygga/bygga-nytt-och-bygga-till/solenergianlaggningar---solceller-solpanel-och-solfangare>
- Hakkarainen, V. (2022). Environmental Product Declaration - Midsummer BOLD. *The International EPD System*.
<https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/bd2e7b8a-4852-4c6f-adaf-08da599e304a/Data>
- Ipn, J., & Bismark, C.-I. (2018). Råd och anvisning 122. *Räddningstjänsten StorGöteborg*.
<https://www.rsgbg.se/globalassets/dokument/rad-och-anvisningar/rad-och-anvisning-122-solceller-och-batterilagersystem.pdf>
- ISO. (2021). *ISO 14040:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*.
https://www.iso.org/standard/37456.html?fbclid=IwAR2A_ILk93W_RuLpMaTxF6Mi9g6lIIovOaDMHgBlvEVCSjyv7U095Bsmn4A
- Kovacs, P., & Petterson, J. (2019). Marknadsöversikt för solcellsmoduler, växelriktare, infästningsanordningar och kompletta system. *RISE*.
<https://www.pvxchange.com/de/>
- Malmsten, J. (2015). *Solceller på tak. Möjligheter och fallgropar*. BELOK.
<https://docplayer.se/13176816-Solceller-pa-tak-mojligheter-och-fallgropar-utarbetad-av-jon-malmsten-solkompaniet.html>
- Masson, G., & Kaizuka, I. (2020). IEA PVPS report - Trends in Photovoltaic Applications 2020. *IEA PVPS - International Energy Agency*. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/11/IEA_PVPS_Trends_Report_2020-1.pdf
- Midsummer. (u.å.). *Midsummer BOLD*. Hämtad 04 maj 2023, från <https://midsummer.se/midsummer-bold/>
- Naturvårdsverket. (2022). *Klimatklivet – Vägledning om beräkning av utsläppsminskning*.
 pvXchange. (2023). *Solar Wholesale Photovoltaics Shop*. <https://www.pvxchange.com/>
- Regeringskansliet. (2020). *Agenda 2030 | Mål 7 | Hållbar energi för alla*.
<https://www.regeringen.se/regeringens-politik/globala-malen-och-agenda-2030/agenda-2030-mal-7-hallbar-energi-for-alla/>
- Rollet, C. (2020). *Recycling PV panels: Why can't we hit 100%?* PV magazine International.
<https://www.pv-magazine.com/2020/08/26/recycling-pv-panels-why-cant-we-hit-100/>
- Salvi, A., Arosio, V., Monzio Compagnoni, L., Cubiña, I., Scaccabarozzi, G., & Dotelli, G. (2023). Considering the environmental impact of circular strategies: A dynamic combination of material efficiency and LCA. *Journal of Cleaner Production*, 387, 135850. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.135850>
- Sandgren, A., & Nilsson, J. (2021). Emissionsfaktorer för nordiskelmix med hänsyn till import och export. *IVL Swedish Environmental Research Institute*.
<https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ivl:diva-3822>

- Solcellskollen. (2022). *Vilken lutning och väderstreck är bäst för solceller?* .
<https://www.solcellskollen.se/vanliga-fragor/vilken-lutning-och-vaderstreck-ar-bast-for-solceller>
- Teknetzi, I., Holgersson, S., & Ebin, B. (2023). Valuable metal recycling from thin film CIGS solar cells by leaching under mild conditions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 252, 112178. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2022.112178>
- UNDP. (2017). *Vad betyder hållbar utveckling?* . <https://www.globalamalen.se/fragor-och-svar/vad-betyder-hallbar-utveckling/>
- Upphandlingsmyndigheten. (u.å.). *Verktyg för att räkna på livscykelkostnader (LCC)* . Hämtad 04 maj 2023, från <https://www.upphandlingsmyndigheten.se/om-hallbar-upphandling/ekonomiskt-hallbar-upphandling/lcc-for-langsiktigt-hallbara-inkop/lcc-verktyg/>
- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2022). *Solar energy and the environment*. <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/solar-energy-and-the-environment.php>
- Världsnaturfonden WWF. (2022). *Klimatförändringar - Vad är det?* .
<https://www.wwf.se/klimat/klimatforandringar/>
- Wallnér, E. (2019). *Om kW, kWp och hur man får fram effekten för en solcellsanläggning*. Solcellskollen. <https://www.solcellskollen.se/blogg/om-kw-kwp-och-hur-man-far-fram-effekten-for-en-solcellsanlaggning>
- WSP. (2021). *Möjligheter för solenergin att bidra till energiomställningen genom fastighetsbranschen*. <https://www.wsp.com/sv-se/insikter/goda-mojligheter-for-solenergin-att-bidra-till-energiomstallningen-genom-fastighetsbranschen>

För data som fås via mail från företag:

- Andersson, G. (2023). *LCA från referensprojekt – Uppsala*. GICON Installationsledning AB.
- Kassabian, D., Jordberg, R. (2023). *Midsummer BOLD data – Klimatpåverkan, materials ursprung och kostnader*. Midsummer AB.
- Humlén, E. (2023). *Produktblad, CRE3 Footprint Calculation, Deklarering CO2 vid produktion*. SellPower AB.
- Radavičius, T., Aleknavičius, V. (2023). *LCA calculations on SoliTek modules*. SoliTek EU.

Bilagor

Bilaga 1. Energiförbrukning för byggnader samt solexproduktion

	Energibehov (kWh)	Elbehov (kWh)	Solel - Midsummer BOLD (kWh)	Solel - SoliTek BLACKSTAR (kWh)
Januari	103467	37811	935	1533
Februari	100910	34160	1841	3018
Mars	92565	37877	3976	6518
April	73720	36789	6185	10141
Maj	71828	38999	6396	10485
Juni	70587	38917	6128	10046
Juli	75192	42465	6575	10779
Augusti	75195	42468	5776	9470
September	69204	37528	4389	7196
Oktober	74375	37942	3005	4926
November	90271	36656	875	1435
December	102473	37833	854	1401
Totalt	999787	459445	46935	76948

Bilaga 2. Solelexproduktion från hustak 2 och 3

Väderstreck: Söder - 45 grad lutning

Förklaring för 45 grad lutning energi * 1: Hustak 3 lutar sig mot söder med 45 grader lutning, därmed absorberas cirka 100% av solstrålning av solceller, under ett normalt år.

Hus 3	Midsummer BOLD	SoliTek BLACKSTAR
Januari [kWh]	435	714
Februari [kWh]	822	1348
Mars [kWh]	1694	2777
April [kWh]	2649	4343
Maj [kWh]	2687	4406
Juni [kWh]	2523	4136
Juli [kWh]	2729	4474
Augusti [kWh]	2407	3946
September [kWh]	1398	3177
Oktober [kWh]	1401	2296
November [kWh]	411	674
December [kWh]	415	680
Energi/år [kWh]	20110	32969

Väderstreck: Sydost- 10 grad lutning

Förklaring för 10 grad lutning energi * 0.85: Hustak 2 lutar sig mot sydost med 10 grader lutning, därmed absorberas cirka 85% av solstrålning av solceller, under ett normalt år.

Hus 2	Midsummer BOLD	10 grad lutning energi*0.85	SoliTek BLACKSTAR	10 grad lutning energi*0.85
Januari [kWh]	588	499	963	819
Februari [kWh]	1199	1019	1965	1670
Mars [kWh]	2685	2282	4401	3741
April [kWh]	4161	3537	6821	5798
Maj [kWh]	4363	3708	7152	6079
Juni [kWh]	4241	3605	6952	5909
Juli [kWh]	4525	3846	7418	6306
Augusti [kWh]	3964	3369	6499	5524
September [kWh]	2884	2452	4728	4019
Oktober [kWh]	1887	1604	3094	2630
November [kWh]	546	464	896	761
December [kWh]	517	440	848	721
Energi/år [kWh]	31558	26824	51738	43977

Bilaga 3

Klimatpåverkan från SoliTek's BLACKSTARs solceller

Klimatpåverkan BLACKSTAR	22,3	gCO ₂ e/kWh	(beräkning)
Klimatpåverkan (1:a året)	1715	kgCO ₂ e/kWh/år	
Solelproduktion (1:a året)	77	MWh/år	
Solelproduktion (25 år)	1749	MWh	(deg=0,38%)
	39 076 000	gCO ₂ e	
	39,1	ton CO₂e	

Klimatpåverkan från Midsummer BOLDs solceller

Klimatpåverkan BOLD	7,4	gCO ₂ e/kWh	(datablad)
Klimatpåverkan (1:a året)	281	kgCO ₂ e/kWh/år	
Solelproduktion (1:a året)	47	MWh/år	
Solelproduktion (25 år)	984	MWh	(deg=0,7%)
	7 303 000	gCO ₂ e	
	7,3	ton CO₂e	

Bilaga 4. Klimatpåverkan från växelriktare (Midsummer BOLD & SoliTek BLACKSTAR)

Klimatpåverkan växelriktare	Midsummer	SoliTek	Enhet
Klimatpåverkan växelriktare	1,8	1,8	g CO ₂ /kWh
Klimatpåverkan BOS	5	5	g CO ₂ /kWh
Solelproduktion (10 år) tak 3	187	317	MWh
Solelproduktion (10 år) tak 2	250	423	MWh

Tak 3	337,4	571,3	kg CO2e
Tak 2	450,1	762,1	kg CO2e
Tak 3 inklusive BOS	937,3	1587,0	kg CO2e
Tak 2 inklusive BOS	1250,2	2116,9	kg CO2e
Totalt	3,7	6,3	ton CO2e

Bilaga 5. Lönsamhetsberäkning

Indata

Generella indata

Kalkylperiod (år)	25	
Kalkylränta (%)	4,0%	
Energislag 1	El	elområde 3
Energipris energislag (kr/kWh)	1,40	
Förväntad real årlig energiprisförändring (%)	6,0%	
Utsläppsfaktor (gCO2e/kWh)	90	nordisk elmix
Energislag 2	Fjärrvärme	
Energipris energislag (kr/kWh)	0,94	
Förväntad real årlig energiprisförändring (%)	0,0%	
Utsläppsfaktor (gCO2e/kWh)	64	

Data för olika åtgärder/utrustningsalternativ

	Alt A	Alt B	Alt C
Åtgärd/utrustningsalternativ	Ingen åtgärd	Installation av solceller BOLD	Installation av solceller BLACKSTAR
Investeringskostnad (kr)	0	1 069 992	1 055 835
Årligt energibehov, energislag 1 - El (kWh)	459 445	412 510	382 497
Årligt energibehov, energislag 2 - Fjv (kWh)	540 342	540 342	540 342
Årligt energibehov, energislag 3 (kWh)			
Drift- och underhållskostnad (kr/år)		0	0
Underhållskostnad år 1		40 000	52 600
10		40 000	52 600
20		40 000	52 600

Växelriktare för Midsummer BOLD består av Solax 30 kW och 17 kW med totala kostnader på 40 000 kr, medan SoliTek BLACKSTAR består av Solax 50 kW och 30 kW med kostnader på 52 600 kr för en byte för varje 10:e år.