

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Nya möjligheter för integration av solceller i byggnader och transportsystem	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska New possibilities for integration of solar cells in buildings and transportation systems	
Universitet/högskola/företag Uppsala Universitet	Avdelning/institution Kemi-Ångström, Fysikalisk kemi
Adress Ångströmlaboratoriet, 751 20, Uppsala	
Namn på projektledare Erik Johansson	
Namn på ev övriga projektdeltagare AFRY (tidigare namn ÅF)	
Nyckelord: 5-7 st Solenergi, transporter, elvägar, järnvägar, solceller	

Förord

Energimyndigheten har finansierat projektet.

Andra som har bidraget till projektet är dels forskare i forskargruppen, forskare på AFRY och flera andra personer genom diskussioner.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	1
Summary	2
Inledning/Bakgrund	4
Genomförande	5
Resultat	6
Diskussion och slutsats	31
Publikationslista.....	31

Sammanfattning

Det här projektet utfördes för att öka kunskapen om möjlig användning av solceller i transportsystem nu och i framtiden. Transporter står i nuläget för stora koldioxidutsläpp, och det är därför intressant att undersöka hur solceller skulle kunna användas för att minska dessa koldioxidutsläpp. Projektet har resulterat i kunskap om hur solceller av olika typer kan användas i takbeläggning och bullerplank för elvägar och hur solceller på liknande sätt även kan kopplas in och användas till järnvägar. Vidare undersöktes hur den producerade solenergin matchar behovet i de olika systemen.

Som ett exempel gjordes simuleringar för solceller placerade som ett tak ovanför elvägen utanför Sandviken och för solceller placerade som ett bullerplank längs

med elvägen. Det undersöktes hur elproduktionen från solcellerna ser ut för olika tider under dygnet och för olika månader under året. Resultaten för produktionen av solel från solpanelerna längs med eller ovanför elvägen jämfördes med den förväntade elförbrukningen från fordon på elvägen, och vi har gjort uppskattningar av hur solelproduktionen kan matcha behovet från lastbilar på en del av vägsträckningen. Resultaten är lovande och visar att solceller kan stå för en stor del av elektriciteten som behövs för lastbilar på elvägen under sommarhalvåret.

I projektet simulerades även hur solceller skulle kunna användas för att tillgodose behovet av el till järnvägar. En specifik järnvägssträckning mellan Göteborg och Alingsås användes som ett första typexempel för hur solceller skulle kunna användas för framdrivning av järnvägstrafik. På denna sträcka fanns tillgång till data för elanvändning av tågtrafiken och även tillgång till de tekniska specifikationer som gör det möjligt att undersöka hur solceller skulle kunna kopplas in i ett sådant system. Resultaten för dessa simuleringar är mycket lovande och visar att solceller skulle kunna användas för att tillgodose en del av elen som behövs till järnvägstrafiken.

I simuleringarna av elproduktionen användes kommersiella kiselbaserade solceller, men vi utförde även simuleringar av hur paneler baserade på solceller i forskningsstadiet (så kallade perovskit-solceller) skulle kunna fungera. För att kunna simulera hur paneler baserade på perovskitsolceller fungerar har vi gjort små solceller i vårt forskningslaboratorium på Uppsala Universitet och tagit fram parametrar från dessa små solceller och utifrån dessa parametrar gjort en modell för hur paneler med perovskitsolceller fungerar, eftersom paneler med perovskitsolceller inte finns kommersiellt realiserade ännu. Denna modell har sedan implementerats i beräkningsprogrammet PV-syst för att göra simuleringar på samma sätt som med kiselsolceller. En jämförelse av resultaten för kisel- och perovskitpaneler visar att solelproduktionen är liknande för de två olika systemen, vilket är lovande för en framtida användning av perovskitsolceller, som förväntas kunna tillverkas med lägre kostnad. Vi har även gjort jämförelser med kvantpricksolceller, och försökt förstå vilka fördelar och nackdelar det finns för de olika nya solcellstyperna i användning till transportsystem. Vi har även utfört forskning på nya typer av halvgenomskinliga och flexibla kvantpricksolceller och perovskitsolceller, som skulle fungera bra som tex. halvgenomskinliga bullerplank eller tak.

Slutligen utfördes även en analys av miljöpåverkan. Perovskitsolcellerna har speciellt en kort "energy payback time" och både perovskitsolcellerna och kvantpricksolcellerna beräknas ha låg miljöpåverkan och har stora möjligheter för återvinning av solcellsmaterialen.

Summary

This project was performed to increase the knowledge of possible utilization of solar cells in transport systems now and in the future. Transports today contribute to large carbon-dioxide emissions, and it is therefore interesting to investigate how

solar cells may be used to reduce these carbon-dioxide emissions. The project has resulted in knowledge of how different types of solar cells can be utilized in roofing or noise-reducing walls for electric roads and how solar cells in similar ways also can be connected to and used for railways. Moreover, it was investigated how the produced solar energy matches the energy needs in these systems.

As one example we performed simulations for solar cells on a roof over the electrified road outside Sandviken, and simulation for a noise reducing wall with solar cells along the electrified road. The energy production from the solar cells at different times of the day and different months of the year were investigated.

The results of the calculated solar energy production from the solar cells above or along the electrical road was compared the expected energy needed for vehicles on the road, and we estimated how the solar energy production may match the energy need from trucks on the electrified road. The results are promising and show that solar energy can supply a large part of the electricity needed for the trucks on the electric road on the summer half of the year.

In the project we also simulated how solar cells may be used to supply the electricity need for railways. A specific railway between Gothenburg and Alingsås was used as an example for how solar cells may be used for driving the trains. On this part of the railway we could use data for electricity usage from the trains, and also we could use the technical specifications that makes it possible to investigate how solar cells may be connected to such a system. The results from these simulations are very promising and shows that solar cells may be used to supply part of the electricity that is needed for the trains on the railway.

In the simulations of the solar energy production we used commercial silicon based solar cells, but we also performed simulations for how panels based on solar cells in research (so called perovskite solar cells) would work. To be able to simulate how solar panels based on perovskite works, we have made small solar cells in our research laboratory at Uppsala University, and derived parameters from these small solar cells, and based on these parameters made a model for how solar panels based on perovskites works, since solar panels based on perovskite solar cells are not commercial available yet.

This model has then been implemented in the simulation program PV-syst, to make simulations similar to the simulations with silicon solar cells. A comparison of the results for silicon and perovskite solar panels shows that the solar energy production is similar for the two types of solar panels, which is promising for the future utilization of perovskite solar cells, which are expected to be possible to produce at lower cost compared to silicon solar cells. We have also made comparisons to quantum dot solar cells, and tried to understand which advantages and disadvantages there are for the new solar cells in the utilization in the transport system. We have also performed research for new types of semitransparent and

flexible quantum dot solar cells and perovskite solar cells, which should work good as for example semitransparent noise reducing walls or roofs.

We also made an analysis of the environmental impact of the solar cells. The perovskite solar cells may have specifically low energy payback time and both the perovskite solar cells and quantum dot solar cell have low environmental impact and large possibilities for recycling the materials in the solar cells.

Inledning/Bakgrund

Tillgång på förnybar energi kommer att vara en av de största utmaningarna i framtiden. Solenergi skulle kunna ge ett stort bidrag till energiproduktionen i världen men även i Sverige och redan idag ser i en snabb ökning av solenergianvändning, dock från väldigt låga nivåer. För att solenergi ska kunna bli en konkurrenskraftig energikälla måste man hitta områden där investeringskostnaden är låg och den producerade energin har ett stort värde. Solceller kan tex. ersätta material för t.ex. tak och fasader och därmed ha funktionerna som tak eller fasad och elproducerande solcell i samma material. Detta ger en totalt sett lägre kostnad för en byggnad jämfört med att installera solceller på redan existerande tak eller fasad. Samtidigt produceras elektriciteten direkt i byggnaden för användning, vilket ger ett högre värde än elproduktion i en storskalig anläggning för försäljning. Sammantaget ger detta en ekonomisk fördel om kostnaden för de byggnadsintegrerade solcellerna inte är alltför hög jämfört med motsvarande byggnadsmaterial utan solceller för tak och fasader. Det har därför länge funnits ett intresse för byggnadsintegrerade solceller [1-3] vilket på senare tid ytterligare har ökat. På liknande sätt kan solceller användas i andra funktioner som tex. bullerskydd längs en väg eller järnväg. På så sätt blir den dubbla funktionen en viktig parameter för att minska den totala kostnaden.

Kiselbaserade solceller dominerar marknaden för solceller, och konkurrensen för kiselbaserade solpaneler har pressat priset till ganska låga nivåer vilket gör det svårt för nya teknologier att få tillräcklig lönsamhet på solpanelmarknaden. Det finns också flera typer av byggnadsintegrerade solceller baserade på kisel, men på grund av att kiselcellerna är ganska tjocka, spröda och med begränsat visuellt utseende kan andra solcellsteknologier ha fördelar för integrering i byggnader. Nya solcellsteknologier baserade på perovskit, eller kvantprickar eller organiska material kan göras med låg vikt, billiga, flexibla, halvtransparenta och med olika färger, vilket är extra intressant för byggnadsintegrering [2], eller för användning i tex. halvgenomskinliga bullerplank.

Perovskitsolceller, som bara har forskats på i ca 10 år, har redan nått en verkningsgrad på över 25%, vilket är ungefär lika bra som de bästa tunnfilmssolcellerna och kiselcellerna. Kvantpricksolceller är en annan ny teknologi som även den bara funnits i ca 10 år, och även den visar lovande egenskaper speciellt för halvgenomskinliga solceller. Perovskitsolcellerna och kvantpricksolcellerna har en väldigt låg material- och processkostnad vilket kan göra dem till viktiga tekniker för framtida solceller. Dessa nya typer av solceller

bedöms ha stora möjligheter för integrering i olika material och ge nya olika estetiska möjligheter såsom olika färger, transparens och flexibla solceller.

I det här projektet har vi länkat samman våra resultat från forskning på nya solceller med simuleringar av solceller för transportsystem. Projektet har genomförts som ett nära samarbete mellan Uppsala Universitet och AFRY. AFRY har stor erfarenhet av solesystem och genomför beräkningar för elproduktion från solceller och installerar hela system i byggnader.

För att möta målet att 100% av transportererna i Sverige år 2030 ska vara fossilfria skulle en integrering av solceller för järnvägar, spårvägar och i framtiden även elvägar kunna tillföra en stor mängd energi genom integrering av solceller i t.ex. halvtransparenta tak eller bullerplank. Ytan för ett halvtransparent tak med solceller på en järnväg-, spårväg eller elvägssträcka skulle bli väldigt stor, vilket kan ge ett väsentligt tillskott av den elenergi som behövs i för framdrivning av trafiken på sträckan. Solcellerna skulle även kunna placeras mer koncentrerat på fält invid elvägen, eller järnvägen beroende på vad som fungerar bäst i det specifika systemet. För att få överblick av hur mycket elenergi som kan genereras av solceller och hur detta stämmer överens med energibehovet för trafiken vid olika tider är det även viktigt att analysera solelproduktionen jämfört med elanvändningen.

[1] B. P. Jelle, *Energies*, 2016, 9, 21

[2] M. Tripathy et. al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016, 61, 451-465

[3] M. van Noord, *Elforsk rapport 10:41, Byggnadsintegrerade solcellsanläggningar*, 2010

Genomförande

Vi har i projektet genomfört analyser av solceller för elvägar och järnvägar genom att utföra simuleringar av solenergi från solceller i samband med vägarna och järnvägarna, som tex. bullerplank eller tak. Dessutom har vi tagit fram och forskat på nya solcellstekniker som skulle kunna fungera speciellt bra för tex halvgenomskinliga bullerplank eller tak med låg vikt och låg kostnad. Nedan beskrivs de olika delarna och resultaten.

Resultat

Solceller till Elväg

Ett av Sveriges första pilotprojekt för elvägar för lastbilar finns sträckan Trafikplats Hillsta (Kungsgården) till Trafikplats Sandviken Västra en bit utanför Sandviken och Gävle.

Kraftförsörjningssystemet består av en kontaktledning som hålls upp över den fil där lastbilarna kör under en sträcka på ungefär 2 km. Lastbilarnas elmotorer får sedan ström via ett pentagram, likt systemet för spårvagnsnätet i Göteborg.

Ett vanligt sätt att koppla solpaneler på är att seriekoppla ett antal paneler tills en spänningsnivå om mellan 700-1000 V uppnås. Elen från sådana solelsystem brukar vanligtvis omvandlas till 220V, 50 Hz för att matas ut till elnätet.

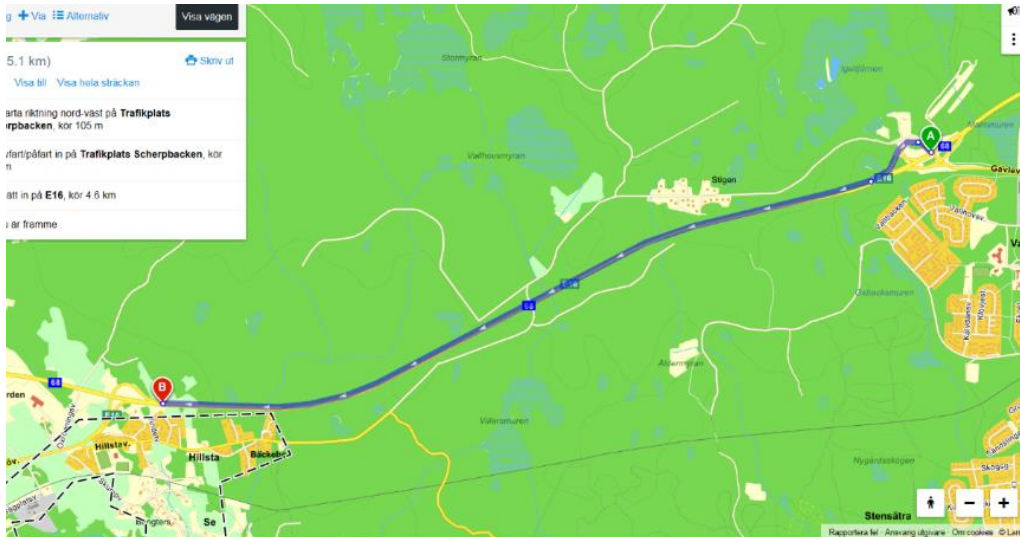
Elsystemet för elvägen har en spänning på ca 700 V likström. Detta är samma som den spänningen de sammankopplade solpanelerna vanligtvis brukar ha och därför kan solelen i ett sådant system direkt kopplas till elvägens elsystem utan konverteringssteg. Därför kan förluster i konverteringsstegen undvikas och en hög total effektivitet uppnås.

Eftersom solelsystemet tidvis ger mer effekt än den som används i systemet kan det vara fördelaktigt att sälja överskottselen till andra konsumenter via det vanliga elnätet. Detta kräver dock en konvertering till 220 V, 50 Hz. För ett solelsystem kopplat till nätet skulle överskottet mitt på dagen kunna säljas till andra konsumenter och det extra behovet på eftermiddag och kväll skulle kunna tillföras från nätet (från andra kraftkällor). Ett alternativ skulle kunna vara att lagra överskottsolelen lokalt vid elvägen för användning då solelmängden är för liten. Rekommendationen är att koppla in sig direkt på kontaktledningen eftersom elanvändningen är stor dagtid när solen skiner. Hur tätt det kan ske är inte känt i dagsläget. Ju tätare det är möjligt att ansluta, desto bättre för att minska kabellängder och därmed också överföringsförluster.

Spårvagnsnäten i Göteborg och Lund, vilka matas med 750 V likspänning, liknar elvägen i Sandviken i dess uppbyggnad. För de tre systemen finns potential för solelproduktion då omvandling till AC kan undvikas och med det kan omvandlingsförluster minimeras. Eftersom de tre systemen liknar varandra finns också potential i att utveckla ett solcellssystem för en bana som sedan kan appliceras på de övriga två.

Simulering av solceller anslutna till elväg

Till att börja med utförs solcellssimuleringar för att ta reda på hur mycket solel som skulle kunna produceras om ett solcellstak byggs över denna kontaktledning genom att använda sig av befintliga stolpar och balkar. Stolparna står med 60 meters mellanrum idag så pga att solcellsmoduler av kisel är väldigt tunga skulle stolparna behöva stå tätare och dimensioneras för att klara den ökade tyngden. Gissningsvis är de horisontella balkarna 5 meter långa varvid solcellspaneler läggs över dessa för att täcka den fil som lastbilarna kör i.



Figur 1: Kartbild på sträckning elväg.

Sträckan är som visas i figur 1 ovan är 2 km lång och har en stäckning i västlig till östlig riktning.

Simuleringsresultat elväg med solcellstak

Om solcellspanelerna placeras som ett tak på den sida av vägen som ligger längst åt söder (dvs när lastbilarna kör mot öster) så kommer solcellstaket luta svagt åt söder och eventuell snö kommer då att kana av taket och hamna i vägrenen. Om solpanelerna sträckningen istället skulle placeras som ett tak över norra körfältet lutar solcellspanelerna inåt vägbanan och således kommer snö kana in över vägbanan när den smälter vilket medför problem, så vi simulerar därför bara det första fallet.

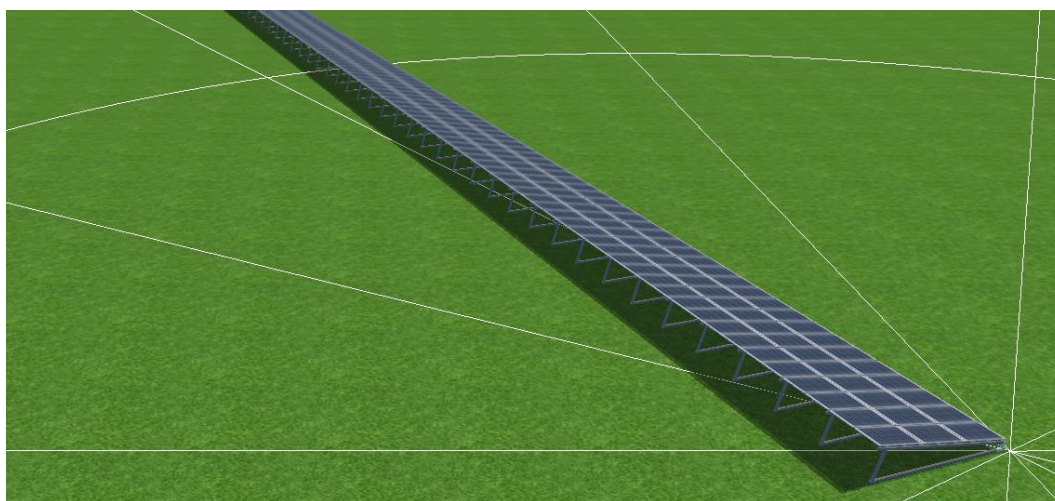
Sträckan avviker 0-30 grader mot syd-sydost och därför används azimut 160 grader i medeltal i simuleringen för att förenkla.

Stolparna skuggar solcellerna något om sträckningen är i väst-östriktning så därför kan alternativ med DC optimerare ses över. 294 paneler i 3 rader på varandra får plats över ytans bredd som antagits till 5 m, per 100 meter väg. Detta ger en total topp effekt om 80,85 kWp/100 m (med en kiselsolcellspanel på 275 W/st). Elproduktionen blir för 100 m väg ca 64 MWh/år (792 kWh/kWp) med 10 graders lutande tak. Om 20 graders lutning mot horisontalplanet väljs så blir elproduktionen ca 73 MWh/år (907 kWh/kWp).

En extrapolering upp till en sträcka på 2 km med samma typ av solcellsmontage ger då en total topp effekt på 1,6 MWp vilket beräknas ge en energiproduktion på 1300-1500 MWh/år, beroende på vald lutning för taket (se tabell 1 nedan). Uppskattad kostnad för en sådan installation är minst 20 miljoner SEK (beroende på monteringsätt mm). Total generatoryta (solcellsyta) är 9620 m².

Plats Elvägen Gävle	Vinkel solcellsmodul	Effekt kWp	Årsenergi MWh
100 m elväg	10	80,6	64
100 m elväg	20	80,6	73
2 km elväg	10	1600	1300
2 km elväg	20	1600	1500

Tabell 1: Beräkningar av olika montagealternativ solcellsanläggningar Elvägen.



Figur 2: Skiss från simuleringsprogrammet PV Sol för solcellsinstallation för Elvägen.

Simuleringsresultat elväg med bullerplank

I denna simulering antas att bullerplanket monteras helt vertikalt dvs 90 graders lutning mot horisontalplanet vilket medför en sämre produktion jämfört med 10-20 graders lutning i föregående simulering. Bullerplanket antas ha samma mått som solcellstaket dvs 5 meter högt och består således av lika många paneler på både höjden och längden. Därav blir toppeffekten densamma, 1,6 MWp, medan produktionen beräknas minska till 1200 MWh/år. Det motsvarar en minskad elproduktion med 20% jämfört med ett solcellstak monterat i 20 graders lutning. Det finns dock flera fördelar med att placera solpanelerna vertikalt; Dels kommer det inte bli någon snöbelastning på solcellerna vintertid, vilket gör det möjligt att använda lättare balkar och monteringsystem för solpanelerna. Vintertid blir också elproduktionen högre pga. den vertikala positionen och mindre problem med

snötäcke på solcellerna. Den vertikala placeringen ger även ett minskat vägbuller utanför vägen, vilket är fördelaktigt för bostäder i närheten av vägen.

Jämförelser kisel och perovskitsolceller

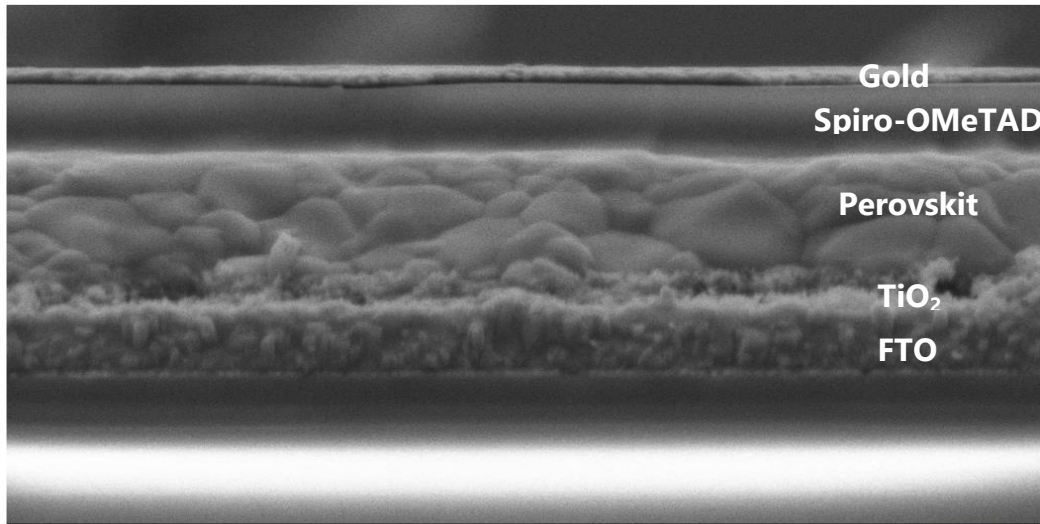
I detta kapitel redovisas resultat från simuleringar för elvägen utanför Sandviken, där jämförelser mellan kiselceller och perovskitsolceller har gjorts för att se om resultaten skiljer sig åt för dessa olika material. I dessa simuleringar har en annan kiselcell valts med ungefär samma verkningsgrad som perovskitsolcellen för att tydligare se skillnader i funktionen vid olika tider på dygnet och året.

För att förenkla simuleringarna över en 2 km lång elväg måste sträckan delas upp i delsträckor om 100 meter var. Simuleringarna har gjorts i programmet PV Syst där det har antagits en yta på 100*5 meter över elvägen i riktningen (azimut) 160 grader, dvs mot sydost.

Modell för panel av perovskitsolceller

Perovskitsolceller är en ny typ av solceller som upptäcktes för bara ca 10 år sedan. Perovskitsolcellerna är därför fortfarande på forskningsstadiet men de har haft en enorm utveckling och effektiviteten för solljus till elektricitet har redan nått över 25%, vilket är nära den högsta effektiviteten för kiselceller och andra kommersiella solceller. Det är därför intressant att se vilka eventuella fördelar som skulle kunna finnas för perovskitsolceller jämfört med de solceller som redan finns på marknaden idag.

För att i detta projekt kunna simulera hur en panel av perovskitsolceller fungerar har vi använt oss av parametrarna från små perovskitsolceller som vi har gjort i vårt forskningslaboratorium på fysikalisk kemi på Uppsala Universitet. De små solceller vi har undersökt har en area på 0,2 cm², och är preparerade på glassubstrat. Solcellerna består av ett antal lager av olika material. På glassubstratet finns ett genomskinligt lager (ca 400 nm tjockt) av dopad tennoxid, vilket är den ena (negativa) kontakten i solcellen. På tennoxid lagret läggs ett lager titandioxid (ca 50 nm tjockt) genom spray-deponering. På detta lager läggs ännu ett lager (ca 400 nm tjockt) titandioxid nanopartiklar (med storlek på ca 20 nm i diameter). På detta lager läggs en lösning med de salter (blyjodid och metylammoniumjodid) som sedan bildar perovskitfilmen. Lösningen deponeras på titandioxid och värms sedan upp till ca 100°C, och då bildas filmen av perovskit som är ca 600 nm tjock. På lagret av perovskit läggs ett lager (ca 400 nm tjockt) med en organisk molekyl (spiro-OMeTAD), och slutligen ett lager guld (ca 80 nm tjockt) som är den andra (positiva) kontakten i solcellen. Nedan i figur 3 visas en elektronmikroskopbild på de olika lagren som finns i solcellen.



Figur 3: Elektronmikroskopbild över genomskärning av en perovskitsolcell med de olika lagren som finns i solcellen.

Spänning och ström från ett flertal perovskitsolceller uppmättes vid olika ljusintensitet för att kunna få fram de värden som behövs i modellen för en solcellspanel. För de små labsolcellerna uppmättes de värden som finns i tabellen nedan för olika ljusintensiteter på solcellen. Beroende på hur spänningen över solcellen varierar får vi lite olika effektivitet, men i genomsnitt blir effektiviteten ca 16,1% från ljuseffekt till elektrisk effekt vid 1000 W/m² (motsvarande fullt solljus en solig dag på sommaren).

Mätningar vid lägre ljusintensiteter ger ungefär samma effektivitet, förutom då ljusintensiteten blir ca 11% av fullt solljus, då effektiviteten för solcellen blir lägre. Från dessa mätningar kunde vi bestämma de parametrar som behövs för att göra en modell för hur en perovskitsolcellspanel fungerar.

Ljusintensitet, 1=1000W/m	Scan direction	Från ström-spänning mätning			
		Efficiency (%)	Voc (V)	Isc (A)	FF
1	b	17,0	1,025	2,7E-02	0,766
	f	15,2	1,010	2,8E-02	0,687
	avg	16,1	1,018	2,7E-02	0,726
0,85	b	17,0	1,010	2,4E-02	0,744
	f	15,0	1,000	2,4E-02	0,662
	avg	16,0	1,005	2,4E-02	0,703
0,46	b	17,2	0,985	1,4E-02	0,733
	f	15,3	0,985	1,4E-02	0,651
	avg	16,2	0,985	1,4E-02	0,692
0,32	b	16,8	0,970	9,7E-03	0,720
	f	14,8	0,975	9,6E-03	0,638
	avg	15,8	0,973	9,7E-03	0,679
0,114	b	14,9	0,925	3,2E-03	0,729
	f	12,7	0,930	3,2E-03	0,615
	avg	13,8	0,928	3,2E-03	0,672

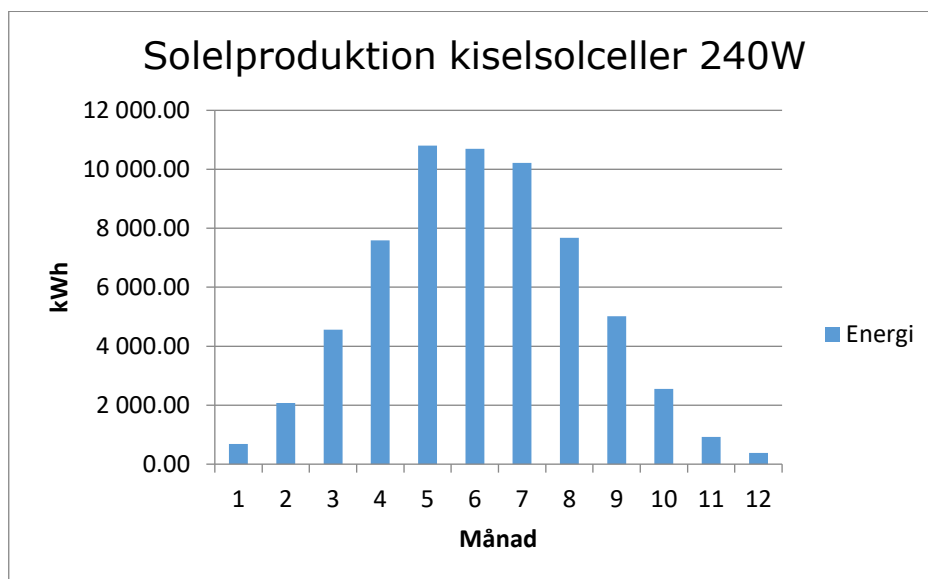
Tabell 2: Paramterar från perovskitsolceller som används i simuleringar av perovskitsolpaneler. Parameterarna effektivitet (Efficiency %), spänning vid öppen krets (Voc), kortslutningsström (Isc) och fyllnadsfaktor(FF). b,f står för olika riktningar för spänningsändringen i mätningen (back resp. forward) och avg står för medelvärdet som användes i simuleringen.

Parametrarna från de små lab-solcellerna användes i en modell baserad på att sätta samman dessa till en stor panel. I den teoretiska modellen av panelen kopplade vi samman 50 stycken små lab-solceller i en minimodul, och 20 stycken av dessa minimoduler kopplades sedan samman för att simulera en stor solpanel av perovskitsolceller. I denna modell använde vi förutom parametrarna i tabell 2 även serieresistans och shunt-resistans från den lilla lab-solcellen.

Denna teoretiska modell kunde sedan implementeras i programmet PV-syst, för att göra simuleringar för hur perovskitsolceller skulle kunna fungera i ett större system.

Produktion per månad kisel solcellstak

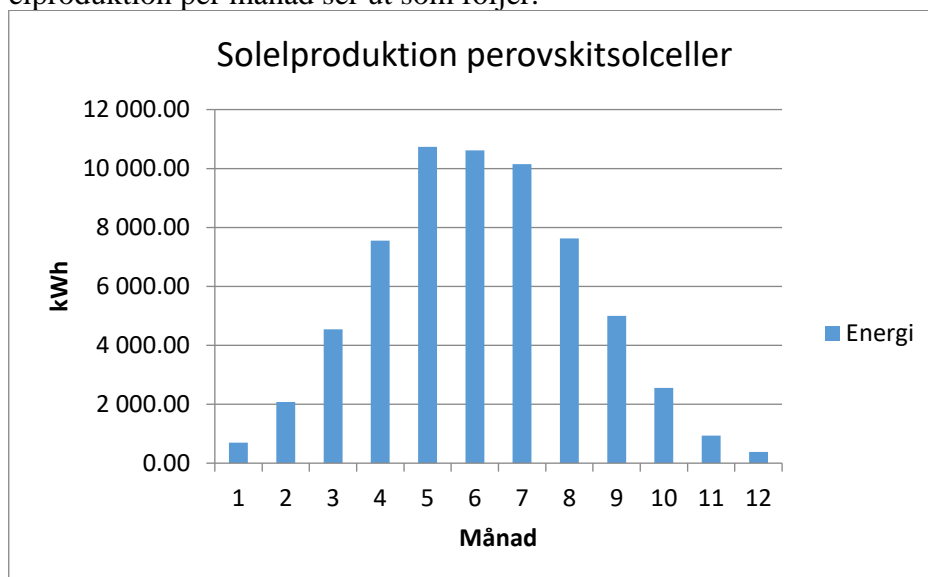
Vid simulering av ett solcellstak på 500 m² som lutar 10 grader och monteras över elvägen används kisel-solceller med en moduleffekt på 240W för att så bra som möjligt matcha verkningsgraden för perovskitsolcellen. Totaleffekt vid denna simulering var 71,8 kWp vilket ger en total produktion på 63,2 MWh vid en solinstrålning på 929 kWh/m² för Sandviken. Fördelningen av elproduktion per månad ser ut som följer.



Figur 4: Diagram solelproduktion kiselsolceller elvägen.

Produktion per månad perovskit solcellstak

Vid simulering av ett solcellstak på 500 m² som lutar 10 grader och monteras över elvägen används perovskitsolceller med en modulverkningsgrad på ca 15%. Totaleffekt vid denna simulering var 71,2 kWp vilket ger en total produktion på 62,9 MWh vid en solinstrålning på 929 kWh/m² för Sandviken. Fördelningen av elproduktion per månad ser ut som följer.



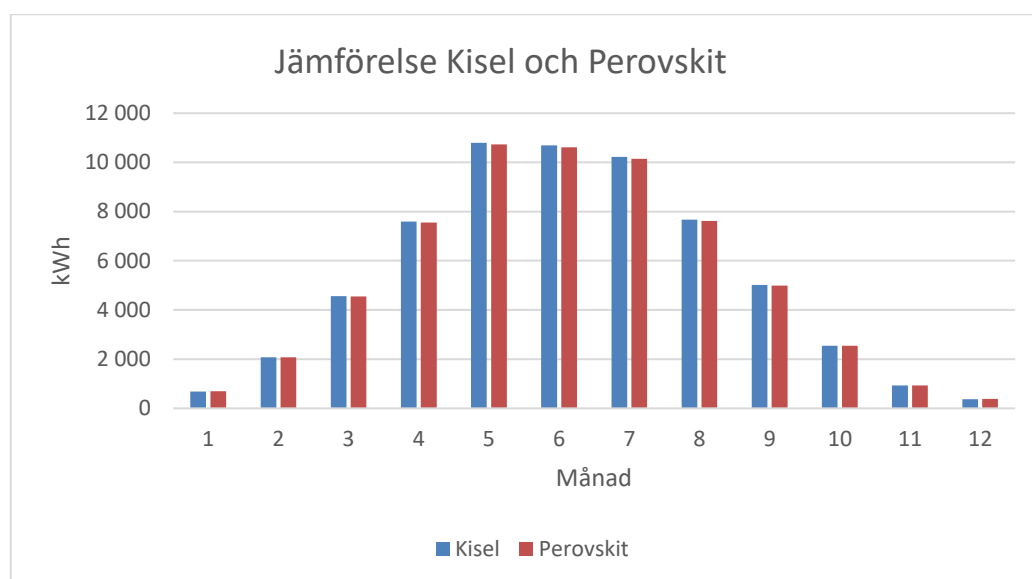
Figur 5: Diagram solelproduktion perovskitsolceller elvägen.

Jämförelse månadsproduktion solcellstak

För att kunna jämföra de båda graferna över månadsproduktionen från ett solcellstak bestående av kiselsolceller respektive perovskitsolceller har båda dessa

mätvärden lagts in i samma graf och samma tabell. Det går att urskilja, särskilt i tabellform är att perovskitsolcellen förväntas producera något mer energi under vintermånaderna oktober till februari då solen står lågt på himlen och ljusintensiteten är lägre. Dessutom träffas solcellen av mer diffust ljus under denna period.

Detta fenomen inträffar trots att årsproduktionen för perovskitsolcellen blev något lägre än för kiselcellen. Fenomenet skulle förmodligen vara ännu tydligare om årsproduktionerna hade kunnat matcha varandra exakt.



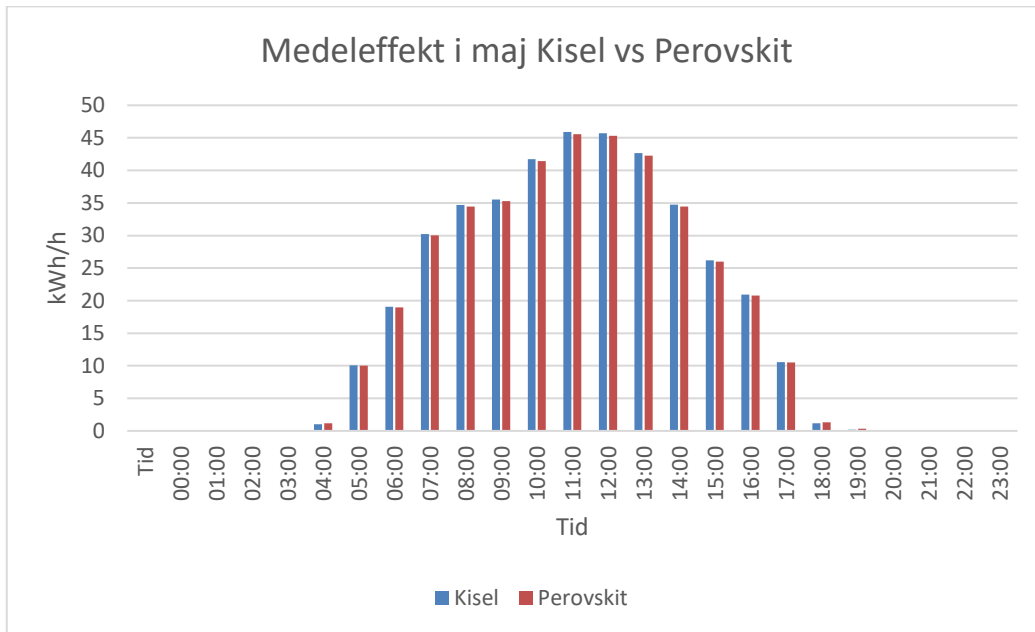
Figur 6: Diagram jämförelse av produktion kisel- och perovskitsolceller.

Månad	Kisel (kWh/månad)	Perovskit (kWh/månad)
1	684	699
2	2 080	2 081
3	4 562	4 547
4	7 588	7 551
5	10 802	10 734
6	10 692	10 618
7	10 220	10 142
8	7 676	7 624
9	5 015	4 994
10	2 549	2 550
11	924	935
12	376	386

Tabell 3: Jämförelse kisel- och perovskit-solpaneler

Medeleffekt för en dag i maj

För att se om det finns någon skillnad mellan kiselceller och perovskitcellers energiproduktion över de olika timmarna på en dag har timvärden från en simulering lagts in i samma graf för att jämföra. Skillnaden mellan graferna beror delvis på att det inte är exakt samma effekt och verkningsgrad mellan den valda kiselcellen och perovskitcellen (kisel hade något högre totaleffekt och produktion på 500 m²) men det framgår i grafen att perovskitcellen verkar vara något bättre på att fånga upp och tillgodogör sig det svagare ljuset på tidig morgon och kvällar jämfört med kiselcellen.



Figur 7: Diagram jämförelse effekt kisel- och perovskitsolceller.

Tid på dygnet 1 maj	Kisel (kWh/h)	Perovskit (kWh/h)
00:00	0,0	0,0
01:00	0,0	0,0
02:00	0,0	0,0
03:00	0,0	0,0
04:00	1,0	1,2
05:00	10,1	10,0
06:00	19,1	18,9
07:00	30,2	30,0
08:00	34,7	34,5
09:00	35,5	35,3
10:00	41,7	41,4
11:00	45,9	45,6
12:00	45,7	45,3
13:00	42,6	42,3
14:00	34,7	34,5
15:00	26,2	26,0
16:00	20,9	20,8
17:00	10,6	10,5
18:00	1,2	1,3
19:00	0,2	0,4
20:00	0,0	0,0
21:00	0,0	0,0
22:00	0,0	0,0
23:00	0,0	0,0

Tabell 4: Effekter för kisel-resp perovskit-solcellsmoduler olika tider på dygnet.

Jämförelse av genererad solel och förbrukning av el på elvägen

Effekt för lastbil jämfört med maximal effekt från solceller

För en uppskattning av förbrukning av eleffekten som trafiken på elvägen behöver så använder vi effekten från en typisk lastbil som har en motoreffekt på ca 200 kW. Vid antagande av 50% effekt vid jämn hastighet på elvägen ger det omkring 100 kW för en lastbil.

Den använda effekten behöver jämföras med den genererade effekten från solcellerna. Beräkningen med solcellerna gav en topp effekt på 81 kWp/100 m. Vid maximal solinstrålning kan därför solcellerna generera ström motsvarande ca 1 lastbil per hundra meter vägbana, vilket ungefär är det maximala antalet lastbilar som kan köra på vägen samtidigt vid ett avstånd mellan lastbilarna på 100-150 m.

Jämförelse av effektbehov och effekt från solceller på olika tider

För vägavsnittet vid Sandviken finns ingen statistik på trafikmängden för olika tider på dygnet tillgänglig, däremot finns trafikstatistik för Essingeleden vid Gröndal utanför Stockholm för olika tider på dygnet (från rapporten: Utvärdering av stockholmsförsökets effekter på biltrafiken, juni 2006, med mätningar av trafik från trafikkontoret). Trafikstatistiken visar att trafikmängden är väsentligt större under dagtid jämfört med på natten och att det finns en trafiktopp på förmiddagen och en trafiktopp på eftermiddagen. Även om trafiken i de olika områdena skiljer, antar vi här att de generella trafikmängderna för olika tider på dygnet ser liknande ut.

Om vi jämför trafikmängden på olika tider om dygnet med effekten genererad från solcellerna för en dag i maj, ser vi att soleffekt börjar genereras lite tidigare än trafiken ökar. Därför skulle effekten från solcellerna fungera bra med trafikflödet i början på dagen. I mitten på dagen minskar trafikflödet medans effekten från solcellerna når ett maximum, vilket ger ett överskott av solel mitt på dagen. Senare ökar trafikflödet igen vid 15 tiden, för att sedan avta efter klockan 18. Soleffekten minskar tidigare på eftermiddagen och mellan 18-20 finns fortfarande ett ganska stort trafikflöde medans soleffekten är mycket liten. Sammanfattningsvis överensstämmer soleltillgången i stora drag med elbehovet från elvägen eftersom trafiken är mycket större dagtid än nattetid. Speciellt på förmiddagen passar effekten från solcellerna ökningen i trafik. Mitt på dagen producerar solcellerna som mest medan trafiken minskar något, och på eftermiddagen sker minskningen av trafikflödet senare än minskningen av solel. Det finns därför perioder då soleffekten och effektbehovet på elvägen ej helt överensstämmer.

Solceller till Järnväg

Järnvägens elkraftsystem

Elkraftsystemet för den Svenska järnvägen består övergripande av två delsystem, ett banmatningssystem för kraftförsörjning av tågdriften och ett hjälpkraftsystem för kraftförsörjning av anläggningar längs banan så som signalsystem, växlar, belysning, lok och tågvärme osv.

Banmatningssystemets huvudkomponenter är 1) **Omformarstationer** med omformare och tillhörande utrustning för omvandling av elkraften från kraftleverantörens nät till rätt frekvens och spänning, 2) **Överföringssystemet** för överföring av elkraft till tågen, bestående av kontaktledningsanläggningen, matarledningar, transformatorer och ställverk. Systemet kallas även kontaktledningssystemet.

Hjälpkraftsystemets huvudkomponenter är hjälpkraftledningen med tillhörande fördelningsstationer, transformatorer och ställverk. Som komplement till

hjälpkraftledningen används även ortsnät (lågspänning) och batterisystem för avbrottsfri kraft.

Kontaktledningssystemet använder systemfrekvensen 16,7 Hz och nominell spänning 16,5 kV och är ett enfasigt system. Hjälpkraftsystemet använder systemfrekvens 50 Hz och nominell spänning 10 eller 20 kV och är ett trefasigt system.

Nedan beskrivs några av de ingående komponenterna mer detaljerat och slutligen följer ett resonemang kring anslutning av ett solcellssystem.

Omformarstationer

I stationerna finns det huvudsakligen två typer av omformare som delas in som roterande omformare och statiska omriktare. De roterande omformarna består av en motor på primärsidan och en generator på sekundärsidan medan de statiska omriktarna byggs upp av styrbar kraftelektronik. Roterande omformare kan skicka effekt i båda riktningar, alltså även regenererad effekt från tågen till regionnätet.

Distansen mellan omformarstationer kan variera mellan allt från 40 till 160 km, detta beror på hur belastningen är på sträckan samt om det finns 132 kV matarledning med transformatorstationer eller inte. När ett tåg befinner sig mellan två omformarstationer är det optimalt ifall de två stationerna delar på lasten proportionellt mot avståndet till respektive omformarstation. I detta fall minimeras överföringsförlusterna. Eftersom omformarstationerna i Sverige är av olika typ med olika storlekar på effektinmatning finns det svagare och starkare omformarstationer, och lastdelningen går inte alltid till på detta optimala sätt. Det kan också vara så att det inte bara är de närmsta två omformarstationerna som delar på lasten utan fler närliggande omformarstationer hjälper till.

Överföringssystem

Det finns två möjliga alternativ vid val av överföringssystem, BT¹- och AT²-system. Dessa system är anpassade för kraftförsörjning av tågdrift och är uppbyggda för att förhindra att störströmmar går genom marken till närliggande bebyggelse eller andra utsatta delar.

Både BT- och AT-systemen är representerade i Trafikverkets anläggningar samt andra europeiska länder såsom Tyskland, Österrike och Norge.

Nedan beskrivs de båda systemen översiktligt samt deras för- och nackdelar.

BT-system

BT-systemet utvecklades i början av 1900-talet och består av transformator med omsättningen 1:1 som är ansluten mellan kontaktledningen (eng. catenary) och återledaren (eng. return circuit). På det här sättet tvingas en lika stor ström tillbaka

¹ BT = Booster Transformer system (Sugtransformatorsystem)

² AT = Autotransformer system (Sparkopplade autotransformatorsystem)

till återledaren som i kontaktledningen, vilket minimerar riskerna för vagabonderade strömmar.

AT-system

AT-systemet är ett senare system som infördes i Sverige i slutet på 1990 talet och använder istället sparkopplade transformatorer med två faser som är motriktade varandra, för att tvinga tillbaka en lika stor ström i återledaren (eng. negative feeder) som i kontaktledningen. På det här sättet blir spänningen mellan kontaktledning och återledning dubbelt så stor (30 kV), vilket sänker impedansen i systemet.

Jämförelse mellan AT- och BT-system

Ett AT-system ger mindre spänningsfall, högre effektkapacitet och möjlighet till längre avstånd mellan inmatningspunkterna jämfört med ett BT-system. Impedansen i ett AT-system är 4-7 gånger lägre än ett BT-system, vilket ger en väsentlig skillnad i möjlig överförbar effekt. Den lägre siffran (4) är i jämförelse med ett BT-system med den bästa prestandan, medans den högre siffran (7) gäller för det sämsta alternativet.

AT-systemet är det primära systemet som används i Sverige och i övriga europeiska länder vid elektrifiering av befintliga och nya banor. Trafikverket har sedan år 2009 beslutat att framtida banmatningssystem³ i första hand ska byggas med AT-system samt att i vissa områden uppgradera befintliga BT-system till AT-system. Även Bane Nor i Norge har under senare år infört motsvarande strategieriktning.

Generering

För att överföra effekt till banmatningssystemet behöver effekten först genereras. I Trafikverkets banmatningssystem sker detta via omformarstationer som är anslutna till det allmänna stamnätet. Det allmänna stamnätet använder frekvensen 50 Hz, och eftersom frekvensen på kontaktledningssystemet är 16,7 Hz behövs en frekvensomvandling för en anslutning mot det allmänna nätet. Frekvensomvandlingen sker i så kallade omformarstationer, dessa är ca 50 till antalet i Sverige. Utformningen av omformarstationer kan se olika ut och ett resonemang kring detta förs senare i detta avsnitt.

Hjälpkraft för övrig infrastruktur

Utöver kraftförsörjningen till tågdriften finns andra delar i infrastrukturen som behöver kraftförsörjning. Exempelvis växelvärm, belysning, signalsystem osv, vilket kan realiseras på lite olika sätt. I Sverige nyttjas i huvudsak ett separat högspänningsnät (10-20 kV, 50 Hz) som placeras i samma stolpe som kontaktledningen. Som redundans till detta hjälpkraftnät används ortsnät. För järnvägen i Norge (Bane Nor) används uteslutande ortsnät (lågspänningsanslutningar) tillsammans UPS som reservkraft. Det finns även banor

³ Tex Botniabanan, Ådalsbanan, Malmbanan, Blekinge kust banan osv.

inom Trafikverkets anläggningar som följer det norska byggsättet, t ex delar av Malmbanan (Kiruna – Riksgränsen).

Anslutning av solceller till järnvägen

Grundlasten i en omformarstationerna varierar i olika delar av landet på grund av att belastningen från tågtrafiken varierar. Utredningen har tittat närmare på omformarstationerna i Olskroken och Alingsås som erbjuder en tågsträcka i väst-östlig riktning, vilket tillåter en solcellsanläggning att vara riktad söderut.

Omformarstationerna i Olskroken och Alingsås har en grundlast om ca 5 MVA. Detta motsvarar en solcellsanläggning om ca 6 km á tre rader av solceller.

Utredningen har kollat på tre alternativ till anslutning av en solcellsanläggning till järnvägssystemet:

1. Ansluta till kontaktledningssystemet
2. Ansluta till hjälpkraftssystemet
3. Ansluta till omformarstationen

Nedan presenteras dessa alternativ samt ett resonemang om deras för- och nackdelar.

Anslutning till kontaktledningssystemet

Att ansluta till kontaktledningssystemet har följande identifierade för- och nackdelar:

Fördelar:

- Effekten kommer till direkt nytta för tågen.

Nackdelar:

- Osäkert hur det skulle gå att ansluta med jämna, korta, intervall.
- Innebär en stor osäkerhet kring hur strömtillförseln från solcellerna påverkar resten av systemet.
- Stort ingrepp i elkraftssystemet som innebär att det behövs detaljerade utredningar och analys av strömvägar och dess påverkan på tågdriften.

Anslutning till hjälpkraftssystemet

Att ansluta till hjälpkraftssystemet har följande identifierade för- och nackdelar:

Fördelar:

- Anslutningsmöjligheter finns med jämna mellanrum, var 60e meter.
- Hjälpkraftssystemet är stabilare än kontaktledningssystemet. Det är troligare att en anslutning direkt mot hjälpkraftssystemet är möjlig.

Nackdelar:

- Effekten används inte till tågens framdrift, alltså frångår utredningen målet om att solenergin används till transport.

- Hjälpkraftsystemet har betydligt mindre laster än kontaktledningssystemet, baslast om några hundra kilowatt i snitt. Solcellsanläggningar av större karaktär skulle troligtvis överdimensionera systemet.

Anslutning till omformarstation

En alternativ lösning är att sätta solcellerna som bullerplank eller dylikt längs med järnvägen, på var sida om en omformarstation. Solcellsanläggningen bör då sträcka sig så långt att transmissionsförlusterna inte blir för stora vid anslutning till omformarstationen.

Att ansluta till en omformarstation innebär följande identifierade för- och nackdelar:

Fördelar:

- Genom att dela upp solcellsanläggningen på var sida om omformarstationen minskar överföringssträckan och då även överföringsförlusterna.
- På detta sätt kan solcellsanläggningen mata in effekt från solcellsanläggningen då den finns tillgänglig och under övrig tid mata in effekt från överliggande nät.

Nackdelar:

- Solcellsanläggningen behöver placeras i närheten av omformarstationen. Det krävs därför plats för en solcellsanläggning antingen utmed järnvägsspåren, eller på en yta nära omformarstationen.

Val av lösning i projektet

Från de olika för- och nackdelarna för de olika alternativen ovan är anslutning till omformarstationer i nuläget det mest funktionella alternativet. I projektet har vi därför undersökt hur vi kan placera solceller nära en omformarstation vid sidan av järnvägen, exempelvis som bullerskydd eller som en större anläggning på närliggande åker eller öppen yta.

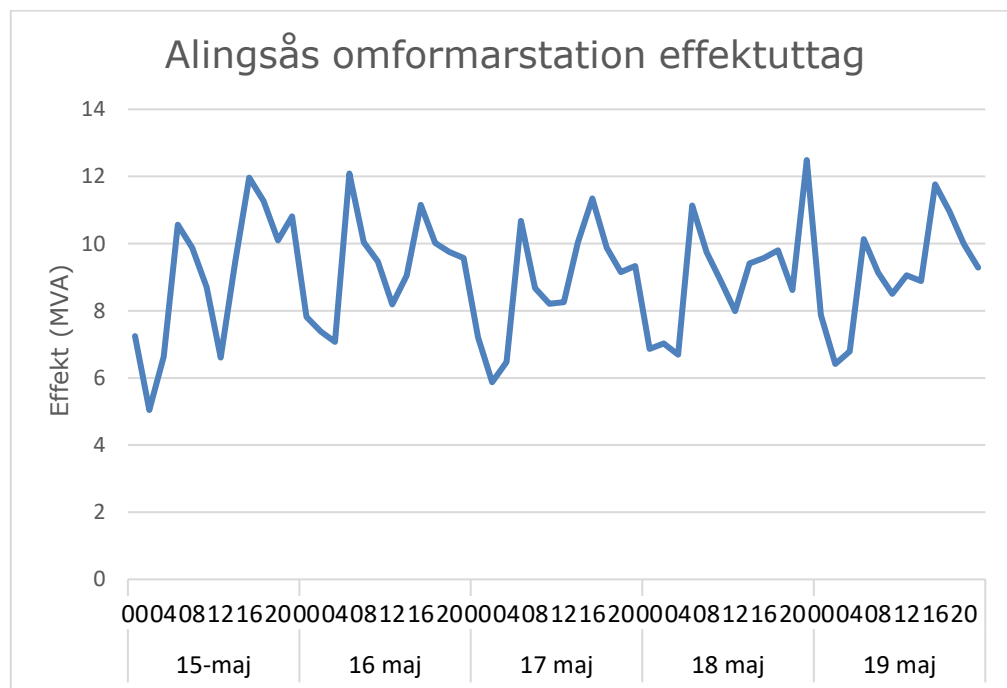
Simulering av solceller anslutna till järnvägen

Då anslutning direkt mot omformarstationerna visade sig vara mest fördelaktigt framför att ansluta sig mot kontaktledningen eller hjälpkraftsystemet, har två omformarstationer valts ut för att utföra simuleringar. För att minimera förluster i kablar samt onödigt lång kabeldragning har potentiella placeringar valts ut så nära omformarstationerna som möjligt.

De omformarstationer som har valts ut för vidare utredning är Alingsås och Olskroken eftersom det i närheten av dessa finns järnväg som är orienterad i väst-östlig riktning, vilket ger en sydlig riktning på solcellerna, och det finns andra potentiella mark- och takytor som lämpar sig för solcellsanläggningar. Simuleringarna i detta kapitel har gjorts i PV Sol med en kisel-solcellsmodul om 275W/modul.

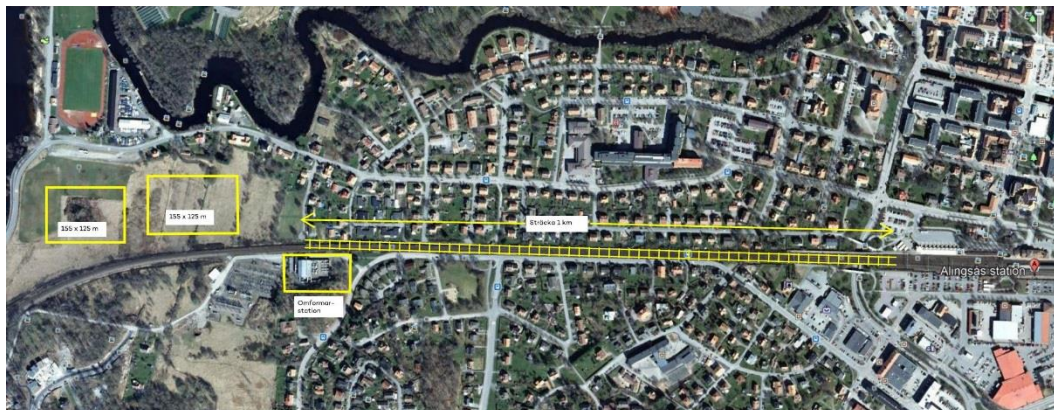
Simulering vid Alingsås omformarstation

Alingsås omformarstation har som tidigare nämnts en baslast kring 5 MVA. I figur 8 nedan visas effektuttaget per timme för en typvecka. För att dimensionera en solcellsanläggning som kan mata in el direkt in i omformarstationen utan att ett överskott behöver skickas ut på elnätet bör därför solcellsanläggningens storlek begränsas till 5 MWp toppeffekt.



Figur 8: Diagram över effektuttag för Alingsås omformarstation.

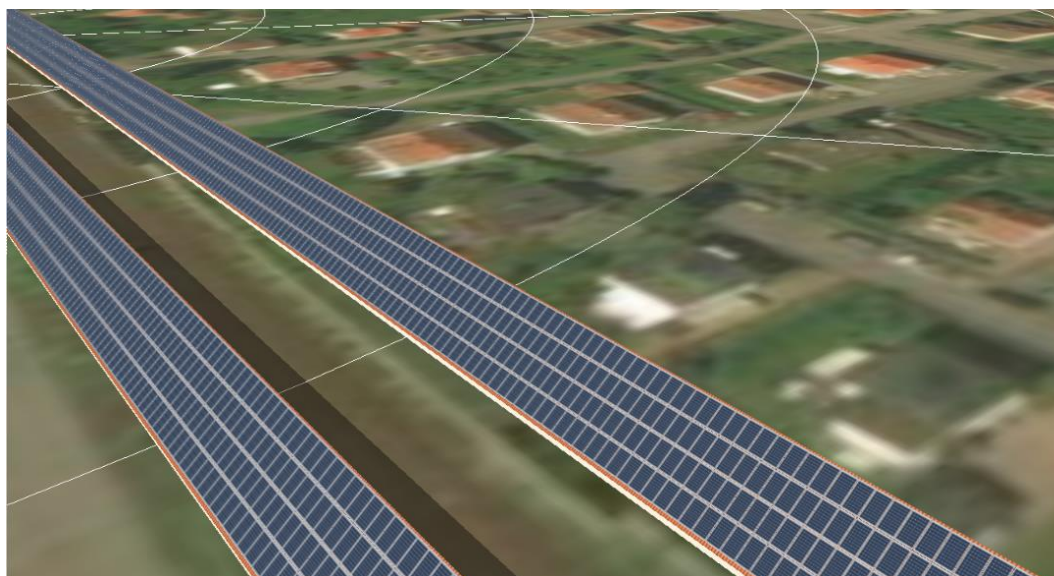
I figur 9 nedan har ytor och sträckningar markerats som potentiella ytor för att placera solcellsanläggningar på. Ytorna har valts ut för att de ligger placerade nära omformarstationen, för att de är fria från annan bebyggelse samt för att de är någorlunda fria från skuggning. Sträckan längs med tågrälsen mellan omformarstationen och tågstationen är ca 1 km och sträcker sig nästan exakt i väst-östlig riktning. Därav lämpar den sig bra för att montera bullerplank med solceller längs med banvallen.



Figur 9: Karta över potentiell sträcka och ytor för solcellsinstallation.

Bullerplank 45 graders lutning

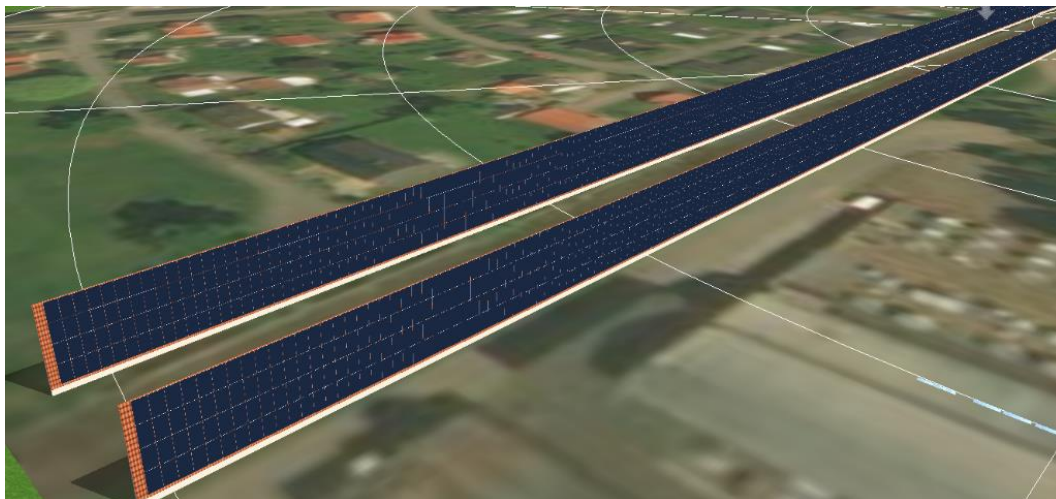
Som synes på översiktsbilden, får det plats ett bullerplank på var sida om spåret och varje 2*500 m bullerplank motsvarar 1078 kWp och 1021 MWh elproduktion per år. Solcellsmodulerna placeras då som ett högt plank som lutar 45 grader mot horisontalplanet där 4 solcellsmoduler placeras i porträttläge ovanpå varandra dvs det lutande bullerplanket blir ca 6,6 m högt. 1 km dubbelt bullerplank skulle kunna ge 2156 kWp och 2042 MWh elproduktion per år.



Figur 10: Simulering av bullerplank bestående av solcellsmoduler i 45 graders lutning.

Bullerplank 90 graders lutning

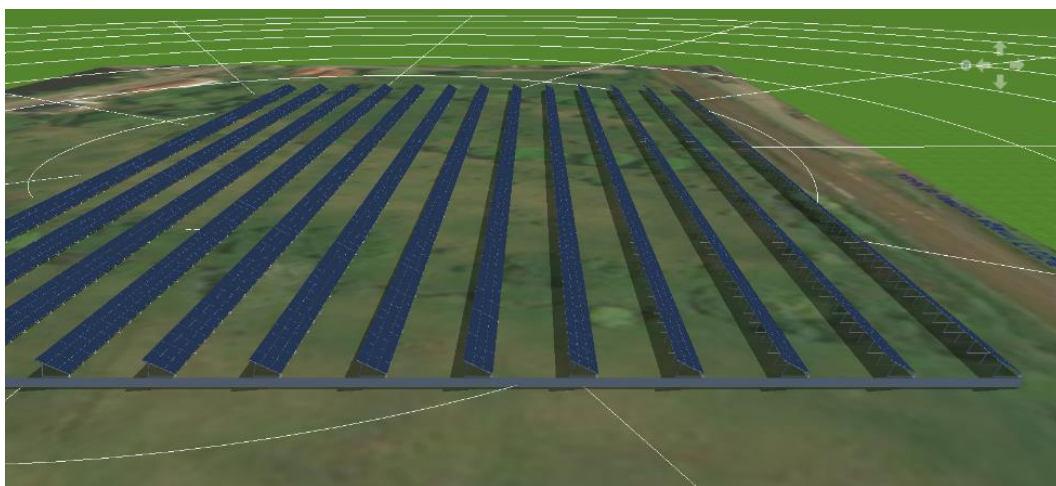
Om bullerplanket istället skulle monteras helt lodrätt förloras 28 % av elproduktionen per år samt att endast bullerplank på ena sidan av spåret förslås pga ökade skuggningsförluster.



Figur 11: Simulering av bullerplank bestående av solcellsmoduler i 90 graders lutning.

Fristående montage 30 graders lutning

Ytan väster om omformarstationen är idag fri från bebyggelse och här har två potentiella ytor mätts upp. Vardera ytan mäter 125 gånger 155 m vilket rymmer en solcellsanläggning om 987 kWp dvs 1974 kWp för båda ytorna. Solcellsmodulerna placeras i rader med tre liggande solcellmoduler per rad, uppvinklade 30 grader mot horisontalplanet och 7 m radavstånd mellan. Produktionen från de två fälten beräknas bli 1857 MWh per år.



Figur 12: Simulering av yta med fristående montage bestående av solcellsmoduler i 30 graders lutning.

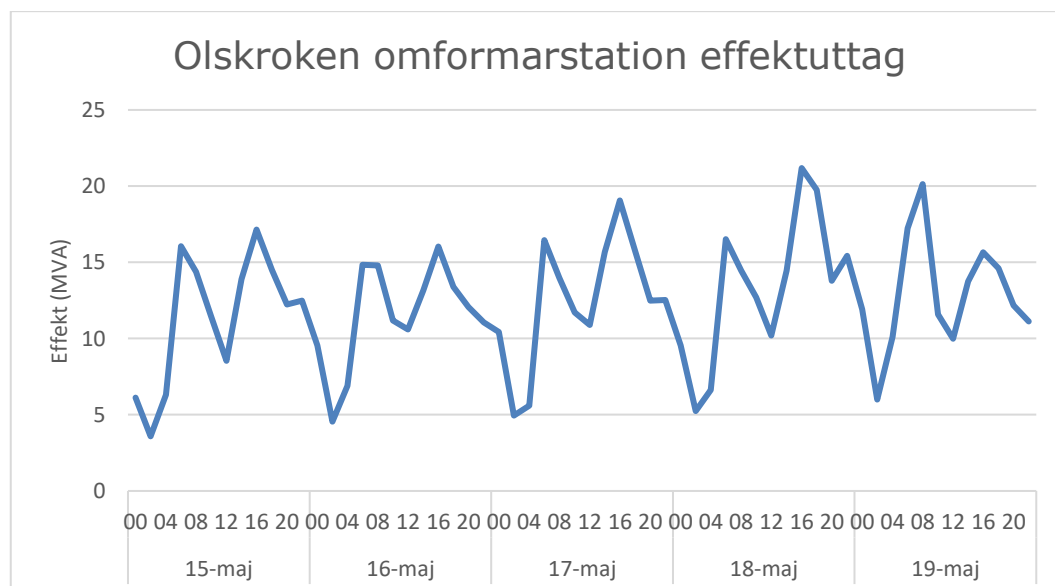
Tabell och summering Alingsås

Plats Alingsås omformarstation Montagealternativ	Vinkel solcellsmodul	Effekt kWp	Årsenergi MWh
1 km dubbelt vinklat bullerplank	45	2156	2042
1 km dubbelt upprätt bullerplank	90	2156	1474
Fält väster 125 x155 m	30	1974	1857
Summa med vinklat bullerplank	45/30	4130	3890
Summa med upprätt bullerplank	90/30	4130	3330

Tabell 5: Beräkningar och summering av olika montagealternativ solcellsanläggningar Alingsås omformarstation.

Simulering vid Olskroken omformarstation

Omformarstationen i Olskroken har även den en baslast kring 5 MVA, även om topparna är högre, under de tider då det går många pendeltåg i rusningstid. Se figur 13 nedan, som visar effektuttaget per timme under en typvecka. För att slippa hantera överskottsproduktion kan solcellsanläggningens topp effekt begränsas till 5 MVA, även det genom att studera kurvan framgår att effektuttaget under dagtid, när solen skiner som mest, sällan går under 10 MVA. Därför har ett genomsnittsvärde på 8 MVA använts.



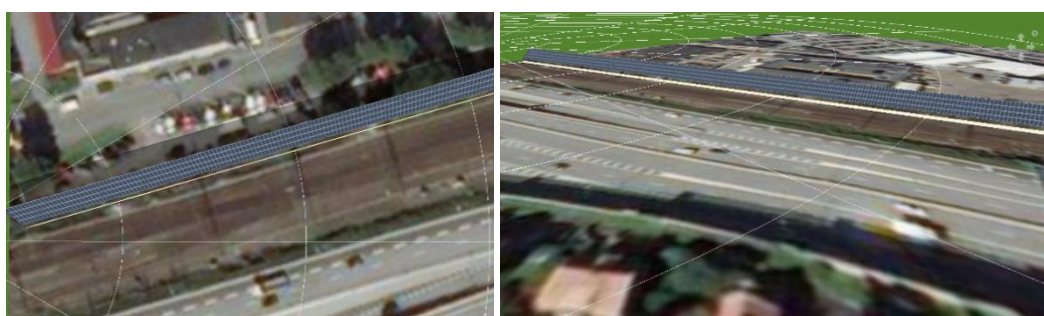
Figur 13: Diagram över effektuttag för Olskrokens omformarstation.

I området kring Olskrokens omformarstation, som markerats ut i figur 14 nedan, finns gott om ytor att placera ut stora solcellsanläggningar. Dessa ytor skulle kunna vara tak till lokstallar eller verkstäder för tåg och andra byggnader invid rälsen, men den största användbara ytan finns invid järnvägsnät och motorvägar. I figur 14 nedan visas förslag till ytor där bullerplank med solceller skulle kunna placeras. I bilden visas en sträcka som är 2 km lång, men om båda sidor om motorvägen samt andra sidan om bangården utnyttjas kan sammanlagt 5 km sträckning i nära väst-östlig riktning föreslås så att solcellsmodulerna blir orienterade nästintill rakt i söderläge.



Figur 14: Kartbild över förslag aktuella sträckor Olskrokan.

Solcellsmodulerna placeras, precis som i förslaget i Alingsås, som ett högt plank som lutar 45 grader mot horisontalplanet där 4 solcellsmoduler placeras i porträttläge ovanpå varandra dvs det lutande bullerplanket blir ca 6,6 m högt. 1 km enkelt bullerplank skulle kunna ge 1080 kWp och 1052 MWh elproduktion per år. (Produktionen blir något högre per km i detta förslag än i Alingsås eftersom avståndet mellan bullerplanken blir längre och därför inte skuggar varandra.) 5 km enkelt bullerplank skulle kunna ge 5400 kWp (dvs 5,4 MW) och 5260 MWh elproduktion per år.



Figur 15: Diagram över effektuttag för Olskrokens omformarstation.

Tabell Olskroken

Plats Olskroken omformarstation	Vinkel solcellsmodul	Effekt kWp	Årsenergi MWh
1 km enkelt vinklat bullerplank	45	1080	1052
5 km enkelt vinklat bullerplank	45	5400	5260

Tabell 6: Beräkningar av olika montagealternativ solcellsanläggningar Olskrokens omformarstation.

Effektmatchning

Solelproduktionen ska inte överskrida baslasten vid omformarstationerna. Därför matchades den potentiella toppeffekten av solcellsproduktionen grovt mot baslasterna. Simuleringarna i rapporten visar att det i närområdena kring omformarstationerna finns plats för minst 4,1 MW solcellsanläggningar i Alingsås och 5,4 MW i Olskroken. Det ger utrymme att bygga ännu större solcellsanläggningar, både avseende yta på plats och utifrån baslast.

Om en viss mängd energi tillåts överproduceras eller lagras, kan solcellsanläggningarna istället dimensioneras efter medellasten, som är betydligt högre. Antal bullerplank och storlek kan utökas på de undersökta sträckorna, samt att det finns gott om fria markytor och tak som ännu ej undersökts i rapporten.

Nya typer av solceller för transportsystem

Forskningsresultat för nya typer av solceller

I projektet har vi framförallt jämfört resultaten från kiselbaserade solceller med perovskitsolceller. I forskningslaboratoriet på Uppsala Universitet har vi i projektet därför gjort små perovskitsolceller och undersökt de parametrar som behövs till simuleringar av solcellspaneler i programmet PV-syst, som beskrivits i avsnittet jämförelse kisel och perovskitsolceller, ovan. Vi har även i projektet jobbat med att utveckla perovskitsolcellerna och kvantpricksolcellerna ytterligare för att speciellt fungera som tex. halvgenomskinliga bullerplank eller lätta tak.

Halvtransparenta solceller skulle vara speciellt intressant för bullerplank till elvägarna, järnvägar eller spårvägar för att fortfarande få en visuell utsikt över omgivningen från fordonen. En annan möjlighet skulle vara att använda det i halvtransparenta tak för att minska solinstrålning på vägen och undvika solreflexer från andra bilar på vägen.

I projektet har vi även undersökt hur de nya typerna solceller (perovskit och kvantpricksolceller) kan användas för att bygga extra lätta solpaneler vilket skulle

vara fördelaktigt för att minska kostnaden för bärande konstruktioner för monteringen av panelerna. Eftersom dessa nya typer av solceller består av extremt tunna filmer av material som är ganska flexibla, kan de läggas på en tunn plast och håller för att böjas.

Perovskitsolceller

För perovskitsolceller har vi jobbat med nya material för att göra perovskitsolcellerna stabilare och mer effektiva. I ett antal forsknings artiklar (1-4 i publikationslistan nedan) har vi använt nya molekyler, så kallade hålledarmaterial (HTM) för att kunna ta ut den positiva laddningen från perovskiten på ett effektivt sätt. Våra resultat visar att det går att använda nya molekyler för att mer effektivt ta ut de positiva laddningarna från perovskiten, och dessa molekyler kan även göras billiga, så att kostnaden för perovskitsolcellen blir lägre jämfört med tidigare materialkombinationer.

Kvantpricksolceller

Förutom perovskitsolceller har vi i projektet forskat på nya kvantpricksolceller (se 5-14 i publikationslistan nedan), där vi fokuserat på halvgenomskinliga och lätta kvantpricksolceller som skulle passa som bullerplank eller tak.

I experiment har vi lyckats göra små kvantpricksolceller med en vikt på endast 7 gram per kvadratmeter, vilket kan vara intressant för applikation för takbeläggning över vägar eller till bullerplank (se 10 i publikationslistan). Effektiviteten för dessa solceller var ca 10% för omvandlingen av solljus till elektricitet, vilket är högt för solceller baserade på kvantprickar.

För kvantpricksolceller har vi gjort mätningar vid olika ljusintensiteter och från dessa tagit fram parametrar för simuleringar i PV-syst, på samma sätt som vi gjort för perovskitsolceller ovan. Resultaten visar att kvantpricksolceller i nuläget har lägre verkningsgrad än kisel och perovskitsolceller, men de har lite högre verkningsgrad (från solljus till elektricitet) vid lite lägre ljusintensitet än fullt solljus, vilket kan ge fördelar jämfört med kiselceller speciellt vid molnigt väder eller på vinterhalvåret.

Livscykelanalys av solcellerna

En viktig faktor för användningen av solceller för elvägar och järnvägar för att minska koldioxidutsläppen är hur miljövänlig och klimatvänlig solcellsproduktionen är. Vi har därför undersökt studier som finns för tex. livscykelanalyser och miljöstudier hos perovskitsolceller och kvantpricksolceller.

Det finns nu ganska många studier för miljöanalys och livscykelstudier för perovskitsolceller. Eftersom perovskitsolcellerna fortfarande är på

forskningsstadiet och ingen storskalig produktion finns ännu, så varierar resultaten hos olika studier [1-3]. Det går att producera perovskitsolcellerna på en mängd olika sätt och i kombination med olika substrat och ledande lager, vilket ger en stor variation av miljövänligheten hos solcellerna och även olika resultat i livscykelanalyser. Andra viktiga delar som påverkar resultaten i studierna är effektiviteten hos solcellerna och livstiden hos solcellerna.

Ett värde som kan användas för att jämföra olika typer av solceller är Energy Pay-Back Time (EPBT), vilket beskriver hur lång tid det tar för solcellen att producera den energi som krävdes för att tillverka solcellen. För de bästa kiselbaserade solpanelerna är EPBT i bästa fall ca 1,5 år (men det beror på var solcellerna placeras), vilket kan jämföras med ca 0,2-5 år för perovskitsolcellerna [1-3]. Den stora variationen beror bland annat på de faktorer som nämnts ovan. Om vi tittar på de nyaste rapporterna så ligger de inom det lägre intervallet för EPBT, jämfört med de tidigare rapporterna, vilket bland annat beror på att effektiviteten för perovskitsolcellerna har förbättrats under denna tid. Samtidigt har flera effektiva metoder för deponering av perovskitlagret utvecklats, tex. Slot-die coating, där mindre materialförluster förekommer.

Ett annat sätt att jämföra solceller är GWP (Global warming potential), som är ett mått på hur de påverkar den globala uppvärmningen och kan uttryckas i tex. kg of CO₂ equivalents/kW_{peak}. Olika studier på perovskitsolceller ger värden på 500-2000 kg of CO₂ equivalents/kW_{peak} [1,2]. Den stora variationen beror bland annat på de faktorer som nämnts ovan. Kiselbaserade solcellspaneler har idag in GWP på ca 1000-3000 kg of CO₂ equivalents/kW_{peak} [1], även här finns en ganska stor variation för olika studier.

Ett annat sätt att jämföra solceller är CED (Cumulative energy demand), som är summan av den energi som krävs under solcellens hela livscykel (produktion, användning och skrotning). CED har uppskattats till ca 10 000-70 000 MJ/kWp för perovskitsolceller jämfört med ca 30 000 MJ/kWp för monokristallina standard kisel moduler [1].

Det finns studier på hur en industriell produktion skulle påverka EPBT och CED för perovskitsolceller. Vid en industriell produktion räknas EPBT till ca 0.28 år och CED till ca 3600 MJ/kWp [1]. Det är därför rimligt att anta att EPBT och CED för perovskitsolceller i industriell produktion ligger lågt och förmodligen lägre jämfört med kiselbaserade solceller.

En viktig slutsats är att i alla olika studier står elektriciteten som behövs vid produktionen av solcellerna för en stor del av GWP (Global warming potential) [1,2], och om enbart förnybara energikällor skulle användas i produktionen så skulle GWP minska betydligt.

För kvantprickbaserade solcellerna är de flesta lagren i solcellen i stort sett identiska med perovskitsolceller, men vi behöver uppskatta hur lagret av kvantprickar påverkar livscykelanalysen jämfört med perovskitlagret. PbS kvantprickar är de som vi har använt i våra kvantpricksolceller i detta projekt, och de passar speciellt bra för tex. halvgenomskinliga solceller till bullerplank. En livscykelstudie på PbS

kvantprickar visar att de har en klimatpåverkan på ca 4-5 kg CO₂ equivalents per gram [4], vilket ger ca 5 kg CO₂ equivalents/m² för kvantpricklagret i solcellen. För perovskitlagret finns uppskattningar på ca 100-16 kg CO₂ equivalents/m² [2]. PbS kvantprickarna kan därför ge ett lite lägre klimatavtryck än perovskitlagret vilket ändå en liten del av den totala klimatpåverkan.

En viktig fråga är hur blyinnehållet kan vara ett problem för en framtida användning av perovskitsolceller och PbS kvantprickar. Perovskiten kan lösas upp av vatten, och bly kan därför läcka ut från en skadad perovskit solcell. Om en solcell går sönder och allt bly läcker ut på marken under solcellen så kommer koncentrationen av bly att öka till ca 70 ppm i marken under solcellen, vilket kommer att minska då blyet sprids längre ner i marken [2]. I naturlig mark är blyinnehållet <10-30 ppm, och i urbana miljöer är blykoncentrationen upp till 200 ppm. En blykoncentration på 150-400 ppm räknas som "blykontaminerad i låg grad" [2]. I det värsta fallet kommer alltså blykoncentrationen ändå att vara förhållandevis låg, så risken för allvarlig blyförorening är låg. Det finns ändå en risk att blykoncentrationen i grundvatten ökar om flera perovskitpaneler skulle kasseras på ett område, så noggrannare analyser behövs för att veta mer.

En fördel med perovskit och även kvantprickarna är att dessa material lätt kan lösas upp och därför går att återanvända. Det har gjorts flera experiment där perovskitsolceller har återanvänts genom att perovskitlagret löses upp och används i en ny solcell. Detsamma borde kunna göras med PbS kvantprickar, men med ett annat lösningsmedel. Vid en sådan återvinning behövs inte nytt bly tillföras vilket både ger en besparing i kostnad och miljö för minskad blyutvinning.

[1] Comparison of Perovskite Solar Cells with other Photovoltaic Technologies from the Point of View of Life Cycle Assessment, R. Vidal, J. Alberola-Borras, N. Sanches-Pantoja, I. Mora-Sero, *Advanced Energy & Sustainability Research*, 2, 2000088, 2021

[2] Life-cycle environmental impacts of single-junction and tandem perovskite PVs: a critical review and future perspectives, E. Leccisi and V. Fthenakis, *Prog. Energy* 2, 032002, 2020

[3] Life cycle energy use and environmental implications of high-performance perovskite tandem solar cells, X. Tian, S. D. Stranks, F. You, *Science Advances*, 6, eabb0055, 2020

[4] Prospective Life-Cycle Modeling of Quantum Dot Nanoparticles for Use in Photon Upconversion Devices, S. Wickerts, R. Arvidsson, B. A. Sanden, G. Peters, L. Hou, B. Albinsson, *ACS Sustainable Chem. Eng.* 9, 5187-5195, 2021

Diskussion och slutsats

Från resultaten i projektet kan vi sammanfatta att det är möjligt att tillgodose en stor del av energibehovet för både elvägar och järnvägar med solceller, speciellt på sommarhalvåret. Om solceller användes för elvägar och järnvägar skulle vi kunna minska utsläppen av koldioxid från transporter, vilket kanske främst är viktigt för vägtrafiken. Om elvägar kommer att byggas ut i framtiden skulle därför solenergi kunna bidra med hållbar energi till dessa och därmed minska koldioxidutsläppen från trafiken väsentligt. En fördel med att placera solcellerna vid elvägarna och järnvägarna är de minskade förlusterna vid eltransport och elomvandling. Dessutom finns det stora outnyttjade markområden vid vägar och järnvägar som då skulle utnyttjas på ett effektivt sätt. Bullerplank med solceller skulle också minska bullret från vägar och järnvägar och därmed kombinera elproduktionen med en annan viktig funktion.

Utvecklingen av halvgenomskinliga och lätta solceller skulle kunna vara speciellt gynnsam för solceller för transportsystemet som tex. halvgenomskinliga bullerplank eller halvgenomskinliga tak. Lättare solceller skulle också minska kostnaden för de ställningar som behövs för att sätta upp solcellerna. I projektet har vi därför speciellt utvecklat nya typer av kvantpricksolceller som är halvgenomskinliga och har låg vikt.

Den praktiska betydelsen av projektet kommer att vara beroende på om elvägar kommer att byggas i större utsträckning i Sverige. Vid en större utbyggnad av elvägar kommer resultaten i projektet kunna användas i stor utsträckning, och även utvecklingen av de nya solcellerna i projektet skulle kunna användas för tillverkning av solceller anpassade till detta användningsområde. Redan i nuläget skulle resultaten för solceller till järnvägar i projektet kunna användas för att använda solenergi för att driva järnvägstrafiken.

Publikationslista

1. The Importance of Pendant Groups on Triphenylamine-Based Hole Transport Materials for Obtaining Perovskite Solar Cells with over 20% Efficiency, J. Zhang, B. Xu, L. Yang, C. Ruan, L. Wang, P. Liu, W. Zhang, N. Vlachopoulos, L. Kloo, G. Boschloo, L. Sun, A. Hagfeldt and **E. M. J. Johansson***, *Adv. Energy Mater.* 8, 1701209, 2018

[This publication shows how the structure of the hole transport material in metal-halide perovskite solar cells can be tuned to achieve very high solar cell performance.](#)

2. In situ growth of perovskite stacking layers for high-efficiency carbon-based hole conductor free perovskite solar cells, J. H. Liu, Q. S. Zhou, N. K. Thein, L. Tian, D. L. Jia, **E. M. J. Johansson**, X. L. Zhang, *Journal of Materials Chemistry A*, 7, 13777-13786, 2019

[This publication shows how the perovskite can be modified and combined with carbon contacting for low cost perovskite solar cells.](#)

3. Tailor-Making Low-Cost Spiro[fluorine-9,9-xanthene]-Based 3D Oligomers for Perovskite Solar Cells, B. Xu, J. Zhang, Y. Hua, P. Liu, L. Q. Wang, C. Q. Ruan, Y. Y. Li, G. Boschloo, **E. M. J. Johansson**, L. Klöö, A. Hagfeldt, A. K. Y. Jen, L. C. Sun, *Chem*, 2, 676-687, 2017

This publication shows how a type of organic molecule can be used for efficient perovskite solar cells.

4. Incorporation of Counter Ions in Organic Molecules: New Strategy in Developing Dopant-Free Hole Transport Materials for Efficient Mixed-Ion Perovskite Solar Cells, J. Zhang, B. Xu, L. Yang, A. Mingorance, C. Ruan, Y. Hua, L. Wang, N. Vlachopoulos, M. Lira-Cantú, G. Boschloo, A. Hagfeldt, L. Sun*, **E. M. J. Johansson***, *Adv. Energy. Mater.* 7, 1602736, 2017

This publication shows how ions can be included in the organic hole transport layer for efficient perovskite solar cells.

5. Metal nanowire networks: Recent advances and challenges for new generation photovoltaics, J. H. Liu, D. L. Jia, J. M. Gardner, **E. M. J. Johansson**, X. L. Zhang, *Materials Today Energy*, 13, 152-185, 2019

This publication shows how metal nanowires can be used for flexible and semitransparent contacts in solar cells.

6. Cubic AgBiS₂ Colloidal Nanocrystals for Solar Cells, Öberg, VA; Johansson, MB; Zhang, XL; **Johansson, EMJ***; *ACS APPLIED NANO MATERIALS*, 3, 4014-4024, 2020

This publication shows how lead-free quantum dots can be used in solar cells.

7. Dual Passivation of CsPbI₃ Perovskite Nanocrystals with Amino Acid Ligands for Efficient Quantum Dot Solar Cells, Jia, DL; Chen, JX; Yu, M; Liu, JH; **Johansson, EMJ**; Hagfeldt, A; Zhang, XL, *SMALL*, 16, 2001772, 2020

This publication shows how amino acids can be used in quantum dot solar cells for surface passivation.

8. Emerging perovskite quantum dot solar cells: feasible approaches to boost performance, J. Chen, D. Jia, **E. M. J. Johansson**, A. Hagfeldt, X. Zhang, *Energy and Environmental Science*, 14, 224-261, 2021

This publication summarizes the development of perovskite quantum dot solar cells.

9. Probing and Controlling Surface Passivation of PbS Quantum Dot Solid for Improved Performance of Infrared Absorbing Solar, Zhang, X. L.; Cappel, U. B.; Jia, D. L.; Zhou, Q. S.; Du, J.; Sloboda, T.; Svanstrom, S. Johansson, F. O. L.; Lindblad, A.; Giangrisostomi, E.; Ovsyannikov, R.; Liu, J. H.; Rensmo, H.; Gardner, J. M.; **Johansson, E. M. J.***, *Chemistry of Materials*, 31, 4081-4091, 2019

This publication shows how it is possible to probe and control the surface passivation of quantum dots in solar cells.

10. Extremely lightweight and ultra-flexible infrared light converting quantum dot solar cells with high power-per-weight output using a solution-processed bending durable silver nanowire based electrode, X. Zhang, V. A. Öberg, J. Du, J. Liu, and **E. M. J. Johansson***, *Energy Environ. Sci.*, 11, 354-364, 2018

This publication shows that quantum dot solar cells can be made extremely lightweight and flexible.

11. Highly photostable and efficient semitransparent quantum dot solar cells by using solution-phase ligand exchange, X. Zhang*, D. L. Jia, C. Hägglund, V. A. Öberg, J. Du, J. H. Liu, **E. M. J. Johansson***, *Nano Energy*, 53, 373-382, 2018

This publication shows that efficient semitransparent QD solar cells can be made using a solution based ligand exchange method for the quantum dots.

12. Highly efficient, transparent and stable semitransparent colloidal quantum dot solar cells: a combined numerical modeling and experimental approach, X. Zhang, C. Hägglund, **E. M. J. Johansson***, *Energy Environ. Sci.* 10, 216-224, 2017

This publication shows that efficient semitransparent QD solar cells can be made, and shows how the optical and electrical properties can be modelled.

13. Highly Efficient Flexible Quantum Dot Solar Cells with Improved Electron Extraction Using MgZnO Nanocrystals, X. Zhang, P. K. Santra, L. Tian, M. B. Johansson, H. Rensmo, **E. M. J. Johansson***, *ACS Nano*, 11, 8478-8487, 2017

This publication shows how MgZnO nanocrystals are used to efficiently extract electrons in flexible QD solar cells.

14. Enhanced Charge Carrier Extraction by Highly Ordered Wrinkled MgZnO Thin Film for Colloidal Quantum Dot Solar Cells, X. Zhang, K. Welch, L. Tian, M. B. Johansson, L. Häggman, J. Liu, **E. M. J. Johansson***, *J. Mater. Chem. C*, 5, 11111-11120, 2017

This publication shows how a wrinkled MgZnO thin film can be used for electron extraction in quantum dot solar cells.